ISSN 0002-3515

Том 59, Номер 7 Декабрь 2023

ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

www.sciencejournals.ru

Журнал оригинальных и обзорных статей по всем аспектам теоретических, модельных и экспериментальных работ по физике атмосферы и океана.

СОДЕРЖАНИЕ

Том 59, номер 7, 2023

Обзоры Секции метеорологии и атмосферных наук Национального геофизического комитета

Российские исследования в области атмосферных наук и метеорологии в 2019–2022 гг.
И. И. Мохов 827

Российские климатические исследования в 2019–2022 гг.
И. И. Мохов 830

Российские исследования в области динамической метеорологии в 2019–2022 гг.
И. А. Репина 852

Российские исследования облаков и осадков в 2019–2022 гг.
Н. А. Безрукова, А. В. Чернокульский 882

Российские исследования в области полярной метеорологии в 2019–2022 гг.
А. В. Клепиков 915

Российские исследования средней атмосферы в 2019–2022 гг.
А. А. Криволуцкий, С. В. Веретененко 930

Российские исследования планетных атмосфер в 2019–2022 гг.
О. И. Кораблев 955

Российские исследования в области атмосферной радиации в 2019–2022 гг.
Ю. М. Тимофеев, В. П. Будак, Я. А. Виролайнен, Т. Б. Журавлева, И. В. Пташник, А. Б. Успенский, Н. Н. Филиппов, Н. Е. Чубарова 976

Российские исследования в области атмосферной химии в 2019–2022 гг.
И. К. Ларин 1008

Российские исследования в области атмосферного электричества в 2019–2022 гг.
Е. А. Мареев, В. Н. Стасенко, М. В. Шаталина 1021

Российские исследования атмосферного озона и его предшественников в 2019–2022 гг.
В. В. Андреев, О. Е. Баженов, Б. Д. Белан, П. Н. Варгин, А. Н. Груздев, Н. Ф. Еланский, Г. С. Жамсуева, А.С. Заяханов, С. Н. Котельников, И.Н. Кузнецова, М. Ю. Куликов, А. В. Невзоров, В. А. Оболкин, О.В. Постыляков, Е. В. Розанов, А. И. Скороход, А. А. Соломатникова, Е. В. Степанов, Ю. М. Тимофеев, А. М. Фейгин, Т. В. Ходжер 1034

Contents

Vol. 59, No. 7, 2023

Reviews of the Meteorology and Atmospheric Sciences Section of the Russian National Geophysical Committee

Russian Research in Meteorology and Atmospheric Sciences in 2019–2022
I. I. Mokhov 827

Russian Climate Research in 2019–2022
I. I. Mokhov 830

Research in Dynamic Meteorology in Russia in 2019–2022
I. A. Repina 852

Russian Studies on Clouds and Precipitation in 2019–2022
N. A. Bezrukova and A. V. Chernokulsky 882

Russian Research in 2019–2022 of Polar Meteorology
A. V. Klepikov 915

Russian Studies of the Middle Atmosphere in 2019–2022
A. A. Krivolutsky and S. V. Veretenenko 930

Planetary Atmosphere Studies in Russia in 2019–2022
O. I. Korablev 955

Russian Investigations in the Field of Amtospheric Radiation in 2019–2022
Yu. M. Timofeyev, V. P. Budak, Ya. A Virolainen, T. B. Zhuravleva, I. V. Ptashnik, A. B. Uspensky, N. N. Filippov, and N. E. Chubarova 976

Russian Research in the Field of Atmospheric Chemistry in 2019–2022
I. K. Larin 1008

Russian Studies of Atmospheric Electricity in 2019–2022
E. A. Mareev, V. N. Stasenko, and M. V. Shatalina 1021

Russian Investigations of Atmospheric Ozone and its Precursors in 2019–2022
V. V. Andreev, O. E. Bazhenov, B. D. Belan, P. N. Vargin, A. N. Gruzdev, N. F. Elansky, G. S. Zhamsueva, A. S. Zayakhanov, S. N. Kotel'nikov, I. N. Kuznezova, M. Yu. Kulikov, A. V. Nevzorov, V. A. Obolkin, O. V. Postylyakov, E. V. Rozanov, A. I. Skorokhod, A. A. Solomatnikova, E. V. Stepanov, Yu. M. Timofeyev, A. M. Feigin, and T. V. Khodzher 1034

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2023, том 59, № 7, с. 827–829

УДК 551.58

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНЫХ НАУК И МЕТЕОРОЛОГИИ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. И. И. Мохов[a, b, *]

[a] *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., д. 3, Москва, 119017 Россия*

[b] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119992 Россия*

**e-mail: mokhov@ifaran.ru*

Поступила в редакцию 30.08.2023 г.
После доработки 07.11.2023 г.
Принята к публикации 15.11.2023 г.

DOI: 10.31857/S000235152307009X, **EDN:** RPOVGD

Секция метеорологии и атмосферных наук (СМАН) Национального геофизического комитета раз в четыре года готовит обзор основных результатов российских исследований для Генеральной ассамблеи Международного геодезического и геофизического союза (International Union of Geodesy and Geophysics – IUGG), в который входит Международная ассоциация метеорологии и атмосферных наук – IAMAS (International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences). Наряду с IAMAS в IUGG входят еще семь международных ассоциаций – Международные ассоциации криосферных наук (IACS), геодезии (IAG), геомагнетизма и аэрономии (IAGA), гидрологических наук (IAHS), физических наук об океане (IAPSO), сейсмологии и физики недр Земли (IASPEI), вулканологии и химии недр Земли (IAVCEI). Последний обзор СМАН по результатам российских исследований в области атмосферных наук и метеорологии, опубликованным в 2019–2022 гг., был подготовлен к XXVIII Генеральной ассамблее МГГС (11–20 июля 2023 г., г. Берлин, Германия) [Russian National Report., 2023].

В национальном обзоре [Russian National Report., 2023], опубликованном СМАН в 2023 г. под общей редакцией председателя СМАН И.И. Мохова и ученого секретаря СМАН А.А. Криволуцкого, представлены результаты по десяти направлениям исследований. Как и в IAMAS, этим направлениям соответствуют десять национальных комиссий – по атмосферной радиации (председатель комиссии Ю.М. Тимофеев, Санкт-Петербургский государственный университет), атмосферной химии (председатель комиссии И.К. Ларин, Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН), атмосферному электричеству (председатель комиссии В.Н. Стасенко, Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Росгидромет), атмосферному озону (председатель комиссии Б.Д. Белан, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН), динамической метеорологии (председатель комиссии И.А. Репина, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН), климату (председатель комиссии И.И. Мохов – Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова), облакам и осадкам (председатель комиссии Н.А. Безрукова, Центральная аэрологическая обсерватория, Росгидромет), планетным атмосферам (председатель комиссии О.И. Кораблев, Институт космических исследований РАН), полярной метеорологии (председатель комиссии А.В. Клепиков, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Росгидромет), средней атмосфере (председатель комиссии А.А. Криволуцкий, Центральная аэрологическая обсерватория, Росгидромет).

Обзоры СМАН публикуются на английском языке и доступны на сайте Национального геофизического комитета (http://ngc.gcras.ru/). Достаточно детальные и информативные обзоры, подготовленные в рамках десяти национальных комиссий по основным направлениям атмосферных и климатических исследований за последние годы, как и ранее, [Безрукова и Чернокульский, 2016, 2020; Данилов и Лагун, 2009; Еланский, 2009, 2012, 2016, 2020; Клепиков и Данилов, 2021; Кораблев и др., 2012; Кораблев, 2016, 2020; Криволуцкий, 2009; Криволуцкий и Репнев, 2012; Криволуцкий и Куколева, 2016; Криволуцкий и др., 2019; Курганский и Крупчатников, 2016, 2019; Лагун и др., 2017; Ларин, 2009, 2012, 2016, 2019; Лыкосов и Крупчатников, 2009; Лыкосов и Крупчатников, 2012; Мареев и Стасенко, 2009; Мареев и др., 2016, 2019; Мохов, 2004, 2009а, 2009б, 2012, 2013, 2016, 2017, 2019, 2020; Тимофеев и Шульгина, 2009, 2013, 2016, 2020; Russian National Report.,

2003, 2007, 2011, 2015, 201, 2023], публикуются в ведущем российском периодическом издании в этой области наук о Земле – журнале “Известия РАН. Физика атмосферы и океана”. В данном номере журнала представлены русские версии обзоров российских исследований, опубликованных в 2019–2022 гг., подготовленные в рамках комиссий СМАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безрукова Н.А., Чернокульский А.В. Российские исследования облаков и осадков в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 577–589.

Безрукова Н.А., Чернокульский А.В. Российские исследования облаков и осадков в 2015-2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 397–417.

Данилов А.И., Лагун В.Е. Полярная метеорология (результаты российских исследований в 2003–2006 гг.) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 554–564.

Еланский Н.Ф. Исследования атмосферного озона в России в 2003–2006 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 2. С. 218–231.

Еланский Н.Ф. Российские исследования атмосферного озона в 2007–2010 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 3. С. 314–333.

Еланский Н.Ф. Российские исследования атмосферного озона в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 2. С. 150–166.

Еланский Н.Ф. Российские исследования атмосферного озона и его предшественников в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 170–185.

Клепиков А.В., Данилов А.И. Полярная метеорология (результаты российских исследований в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 3. С. 261–277.

Кораблев О.И., Засова Л.В., Федорова А.А., Титов Д.В., Игнатьев Н.И., Родин А.В., Шематович В.И., Беляев Д.А., Хатунцев И.В., Изаков М.Н., Шакун А.В., Бурлаков А.В., Майоров Б.С. Российские исследования планетных атмосфер в 2007–2010 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 3. С. 346–371.

Кораблев О.И. Российские исследования планетных атмосфер (2011–2014 гг.) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 546–560.

Кораблев О.И. Российские исследования планетных атмосфер в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 158–169.

Криволуцкий А.А. Результаты российских исследований средней атмосферы (2003–2006 гг.) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 565–576.

Криволуцкий А.А., Репнев А.И. Результаты российские исследований средней атмосферы в 2007–2010 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 3. С. 334–345.

Криволуцкий А.А., Куколева А.А. Результаты российских исследований средней атмосферы (2011–2014 гг.) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 561–576.

Криволуцкий А.А., Репнева А.И., Миронова И.А., Груздев А.Н., Куниянц Т.И. Результаты российских исследований средней атмосферы в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 48–65.

Курганский М.В., Крупчатников В.Н. Российские исследования в области динамической метеорологии в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 2. С. 132–149.

Курганский М.В., Крупчатников В.Н. Российские исследования в области динамической метеорологии в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 6–47.

Лагун В.Е., Клепиков А.В., Данилов А.И. Полярная метеорология (результаты российских исследований в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 641–557.

Ларин И.К. Российские исследования в области атмосферной химии в 2003–2006 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 2. С. 209–217.

Ларин И.К. Российские исследования в области атмосферной химии в 2007–2010 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 3. С. 304–313.

Ларин И.К. Российские исследования в области атмосферной химии в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 2. С. 167–174.

Ларин И.К. Российские исследования в области атмосферной химии в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 66–78.

Лыкосов В.Н., Крупчатников В.Н. Некоторые направления развития динамической метеорологии в 2003–2006 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 2. С. 164–179.

Лыкосов В.Н., Крупчатников В.Н. Некоторые направления развития динамической метеорологии в 2007–2010 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 3. С. 284–303.

Мареев Е.А., Стасенко В.Н. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2003–2006 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 5. С. 709–720.

Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Булатов А.А., Дементьева С.О., Евтушенко А.А., Ильин Н.В., Кутерин Ф.А., Слюняев Н.Н., Шаталина М.В. Российские исследования атмосферного электричества в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 2. С. 175–186.

Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Шаталина М.В., Дементьева С.О., Евтушенко А.А., Свечникова Е.К., Слюняев Н.Н. Российские исследования атмосферного электричества в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 79–93.

Мохов И.И. Российские климатические исследования в 1999–2002 гг. // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т.40. № 2. С. 147–155.

Мохов И.И. Российские исследования в области атмосферных наук и метеорологии в 2003–2006 гг. //

Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 2. С. 163.

Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2003–2006 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 2. С. 180–192.

Мохов И.И. Российские исследования в области атмосферных наук и метеорологии в 2007–2010 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 3. С. 283.

Мохов И.И. Результаты российских исследований климата в 2007–2010 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 1. С. 3–18.

Мохов И.И. Российские исследования в области атмосферных наук и метеорологии в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 2. С. 131.

Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 624–640.

Мохов И.И. Российские исследования в области атмосферных наук и метеорологии в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 3–5.

Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 376–396.

Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М. Российские исследования в области атмосферной радиации в 2003–2006 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 2. С. 193–208.

Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М. Российские исследования в области атмосферной радиации в 2007–2010 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 1. С. 19–36.

Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М. Российские исследования в области атмосферной радиации в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 529–545.

Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М. Российские исследования в области атмосферной радиации в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 1. С. 3–19.

Russian National Report. Meteorology and Atmospheric Sciences. 1999–2002. Ed. By I.I. Mokhov and A.A. Krivolutsky. Moscow. MAKS Press 2003. 136 pp.

Russian National Report. Meteorology and Atmospheric Sciences. 2003–2006. I.I. Mokhov and A.A. Krivolutsky (Eds.). Moscow: MAKS Press 2007. 179 p.

Russian National Report. Meteorology and Atmospheric Sciences. 2007–2010. Ed. By I.I. Mokhov and A.A. Krivolutsky. National Geophysical Committee RAS, MAKS Press, Moscow, 2011, 213 p.

Russian National Report. Meteorology and Atmospheric Sciences. 2011–2014. Ed. By I.I. Mokhov and A.A. Krivolutsky. National Geophysical Committee RAS, MAKS Press, Moscow, 2015, 270 p.

Russian National Report. Meteorology and Atmospheric Sciences. 2015–2019. Ed. By I.I. Mokhov and A.A. Krivolutsky. National Geophysical Committee RAS, MAKS Press: Moscow, 2019. 330 p.

Russian National Report. Meteorology and Atmospheric Sciences. 2019–2022. Ed. By I.I. Mokhov and A.A. Krivolutsky. National Geophysical Committee RAS. MAKS Press: Moscow, 2023. 440 p.

Russian Research in Meteorology and Atmospheric Sciences in 2019–2022

I. I. Mokhov[1, 2, *]

[1]Obukhov Institute of Atmospheric Physcs, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per., 3, Moscow, 119017 Russia

[2]Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119992 Russia

**e-mail: mokhov@ifaran.ru*

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2023, том 59, № 7, с. 830–851

УДК 551.58

РОССИЙСКИЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. И. И. Мохов[a, b, *]

[a]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., д. 3, Москва, 119017 Россия
[b]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119992 Россия
*e-mail: mokhov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 31.08.2023 г.
После доработки 07.11.2023 г.
Принята к публикации 15.11.2023 г.

Представлены результаты российских исследований климата и его изменений (опубликованных в 2019–2022 гг.) на основе обзора, подготовленного для Национального доклада по метеорологии и атмосферным наукам к XXVIII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (г. Берлин, Германия, 11–20 июля 2023 г.).

Ключевые слова: глобальные и региональные климатические изменения, моделирование, естественные и антропогенные факторы, адаптация, регулирование

DOI: 10.31857/S0002351523070106, **EDN:** BONZIT

1. ВВЕДЕНИЕ

Цель данного обзора – представить информацию о результатах российских исследований климата и его изменений (опубликованных в 2019–2022 гг.) для Национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам за 2019–2022 гг. к XXVIII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (г. Берлин, Германия, 11–20 июля 2023 г.) [Russian National Report, 2023] (см. также [Мохов, 2023]). Предыдущий аналогичный обзор был опубликован в [Мохов, 2020] (см. также [Мохов, 2019; Russian National Report, 2019]). Росгидромет ежегодно публикует доклады об особенностях климата на территории Российской Федерации (http://meteorf.ru), в 2022 г. был опубликован Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [Третий оценочный доклад, 2022], регулярно информация об исследованиях климата публикуется в бюллетене “Изменение климата”.

Проблема изменений климата – одна из ключевых глобальных проблем. Современные изменения климата с увеличением глобальной приповерхностной температуры сопровождаются быстрым ростом региональных природных аномалий. При этом наиболее значимый вклад связан с гидрологическими и метеорологическими экстремальными явлениями (https://www.munichre.com/). Последние десятилетия характеризуются значительными глобальными и региональными климатическими изменениями, особенно в высоких широтах [Доклад об особенностях климата, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023; Russian National Report, 2019, 2023; Мохов, 2020; Третий оценочный доклад, 2022]. Максимальное потепление в последние полвека в арктических широтах достигало значений около 5°C – в пять раз больше, чем для Земли в целом. Наибольшая скорость температурных изменений в арктических широтах – так называемое Арктическое усиление – формируется под влиянием ряда климатических обратных связей, в том числе из-за зависимости альбедо поверхности от температуры.

В России, как северной стране, современное повышение средней приповерхностной температуры на 0.5°C за десятилетие более, чем вдвое превышает скорость глобального потепления. При этом и внутригодовые и межгодовые температурные вариации в России в целом также значительно превышают глобальные вариации. В связи с этим проблема климатических изменений и связанных с ними экологических изменений в российских регионах имеет особое значение, в том числе социально-экономическое и политическое. Тем более, что Россия подписала и ратифицировала Парижское соглашение – международное соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата.

2. КЛИМАТ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ, ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА И ПАЛЕОРЕКОНСТРУКЦИЯМ

В рамках климатических исследований по данным наблюдений в сравнении с данными реанализа и палеореконструкции в последние годы получено много значимых результатов (см. список

литературы). Также отмечены значительные современные глобальные и региональные изменения климата, особенно в высоких широтах.

Широкий спектр результатов исследований климатических аномалий и изменений на региональном и глобальном уровнях, полученных в последние годы, представлен в Третьем оценочном докладе об изменении климата и его последствиях на территории Российской Федерации, опубликованном в 2022 г. [Третий оценочный доклад, 2022].

По данным Росгидромета (https://www.meteorf.gov.ru/), линейный тренд общего потепления в России, заметно проявившийся с середины 1970-х гг., объясняет более 50% межгодовой дисперсии среднегодовой приповерхностной температуры [Доклад об особенностях климата, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023]. За последние полвека во всех регионах России и во все времена года отмечается общее потепление. Максимальная скорость потепления в арктических регионах достигает и превышает 1 K за десятилетие. Осадки имеют тенденцию менять знак в зависимости от региона. В то же время количество осадков в год для России в целом значительно увеличилось за последние полвека со скоростью около 2% за десятилетие. Количество осадков увеличивается во все сезоны, но наиболее значительно весной. На значительной части территории России наблюдается тенденция к уменьшению продолжительности снежного покрова и, вместе с тем, к общему увеличению максимальной высоты снежного покрова в течение зимы. Потепление в Арктике сопровождается сокращением площади морского льда в Северном Ледовитом океане, и это еще более заметно на Северном морском пути [Климат Арктики, 2022].

Данные измерений с 1990 года мощности сезонно-талого слоя, являющегося индикатором состояния многолетнемерзлых грунтов, в рамках Международной программы мониторинга CALM (Circum Polar Active Layer Monitoring) свидетельствуют об общей устойчивой тенденции увеличения глубины таяние вечной мерзлоты в XXI веке. В последние десятилетия наметилась тенденция к увеличению продолжительности вегетационного периода (с температурами выше 5°C) со средней для России скоростью около 4 дней в десятилетие, при этом весенний переход через 5°C происходит раньше на около 2 дней каждое десятилетие. На фоне потепления в России наблюдается общее снижение скорости приземного ветра во все сезоны. Отмеченные климатические изменения проявляются на фоне закономерного повышения концентрации CO_2 в атмосфере, в том числе по измерениям на российских арктических станциях Териберка и Тикси, среднегодовая концентрация CO_2 превысила 420 ppm. В то же время после 2020 г. при минимальном годовом увеличении концентрации CO_2 около 2 млн$^{-1}$ годовой прирост превысил 3 млн$^{-1}$.

Для диагностики механизмов формирования климатических изменений с оценкой роли природных и антропогенных факторов необходимы исследования изменений температуры на разных уровнях атмосферы. По данным Росгидромета, при общем потеплении в последние десятилетия тропосферного слоя на 850–300 гПа в Северном полушарии (СП) со скоростью около 0.2 K за десятилетие нижняя стратосфера (слой 100–50 гПа) охлаждалась на скорость примерно в два раза больше - около –0.4 K за декаду. В то же время в тропических широтах скорость охлаждения нижней стратосферы примерно в 3.5 раза превышает скорость нагрева тропосферного слоя над пограничным слоем [Доклад об особенностях климата, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023]. В [Dalin et al., 2020] представлены результаты анализа данных по температуре на уровне мезопаузы за период 2000–2018 гг. По полученным оценкам температура на уровне мезопаузы статистически значимо снижалась в летние сезоны со скоростью –2.5 K за десятилетие; в зимние сезоны изменения оценены как статистически незначимые.

На фоне стремительного потепления в последние десятилетия наиболее заметные изменения проявляются в частоте и интенсивности экстремальных погодно-климатических явлений, в частности в регионах России [Бардин, Платова, 2019, 2022; Доклад об особенностях климата, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023; Russian National Report, 2019; Куликова и др., 2022; Мохов, 2022; Мохов, Тимажев, 2022а, 2022б]. По данным Росгидромета, с конца XX века количество опасных метеорологических явлений в России увеличилось более чем в два раза. Средняя скорость роста их числа за последнюю четверть века составляла около двух десятков явлений в год. При этом доля экстремальных явлений летом превышает 40% от их количества в целом году [Мохов, 2022]. В формировании экстремальных погодно-климатических явлений особый вклад связан с гидрологическим циклом. В том числе с потеплением увеличивается вероятность выпадения экстремальных осадков из-за увеличения влагоемкости атмосферы. К наиболее частым явлениям в регионах России относятся экстремальные осадки, особенно в летние месяцы, а также сильные ветры.

В [Chernokulsky et al., 2019] представлены количественные оценки многолетних изменений различных типов осадков, включая конвективные осадки, в регионах Северной Евразии за последние полвека. Из исходных 538 станций основной анализ проводится для 326 станций с более полными данными. Отмечено увеличение

общего количества осадков за анализируемый период с относительно сильным ростом конвективных осадков и одновременным уменьшением осадков из слоистых облаков. Основные изменения общего количества осадков, их интенсивности и количества сильных осадков проявляются в летние сезоны. Существенно, что вклад сильных конвективных ливней в общее количество осадков статистически значимо увеличивается для протяженных регионов Северной Евразии. При этом осадки, связанные со слоистыми облаками, в целом уменьшаются для большинства регионов Северной Евразии во все сезоны, кроме зимнего.

В [Чернокульский и др., 2022] проведен анализ изменения повторяемости и интенсивности опасных конвективных явлений, в том числе сильных ливней, гроз, града, шквалов, смерчей) в регионах России в теплые сезоны с использованием различных данных. Получены количественные оценки повторяемости гроз, кучево-дождевых облаков, града, сильного ветра, экстремальных ливневых осадков на основе данных наблюдений на российских метеорологических станциях для периода 1966–2020 гг. Сделаны количественные оценки повторяемости и интенсивности смерчевых и шкваловых событий, вызвавших ветровалы (1986–2021 гг.), высоты верхней границы облаков глубокой конвекции (за 2002–2021 гг.) с использованием спутниковых данных. На основе данных реанализа ERA5 получены оценки повторяемости условий, характерных для развития умеренных и интенсивных опасных конвективных явлений. Полученные результаты свидетельствуют об общей интенсификации конвективных процессов и явлений в большинстве регионов России.

Наиболее сильные региональные погодно-климатические аномалии связаны с блокингами – блокированиями зонального переноса в тропосфере средних широт, и их предсказуемость имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение [Бардин, Платова, 2019, 2022; Бондур и др., 2020; Куликова и др., 2022; Мохов, 2022; Мохов, Тимажев, 2022а, 2022б]. Проблема предсказуемости атмосферных блокирований в Северном полушарии на внутрисезонных временных масштабах рассматривается в [Куликова и др., 2022] с использованием операционного варианта полулагранжевой модели атмосферы для долгосрочного прогнозирования (SL-AV), а также сопряженной модели атмосфера–океан. модель и реанализ. В [Бардин и др., 2022] рассмотрены особенности изменчивости антициклонической активности, в том числе блокирующей, в атмосфере средних широт Северного полушария с середины XX века в разные сезоны. Отмечена существенная связь между характеристиками антициклонической деятельности и ведущими модами климатической изменчивости.

В [Бардин, Платова, 2019] представлены результаты анализа климатической изменчивости, в частности температурных экстремумов, в регионах России по данным о среднесуточной приземной температуре на 367 станциях за 1960–2016 гг. Отмечено, что с 1980-х годов количество дней с экстремально высокими летними температурами в европейской части России монотонно растет, с сильными пиками в отдельные годы, а в азиатской части – с начала 2000-х рост приостановился. При этом уменьшается количество отрицательных температурных аномалий. Изменения зимних сезонов в целом соответствуют общему тренду потепления, при этом колебания в азиатской части соответствуют ведущим режимам атмосферной циркуляции, включая Североатлантическое колебание и Скандинавский режим. Статистика индексов экстремальности в противоположных фазах режимов выявила сильный отклик зимой, что позволяет качественно объяснить особенности многолетних вариаций.

Для понимания особенностей современных изменений климата особое значение имеют палеоклиматические исследования [Безверхний, 2019а, 2019б; Екайкин и др., 2021; Мухин и др., 2021; Loskutov et al., 2022; Mukhin et al., 2019]. В [Мухин и др., 2021], в частности, представлен обзор приложений метода построения оптимальных эмпирических моделей для климатических систем, в том числе для палеоклиматических систем. Этот метод, включающий построение редуцированных моделей исследуемой системы в форме случайных динамических систем в сочетании с байесовой оптимизацией структуры модели позволяет реконструировать статистически обоснованные закономерности, в том числе для палеоклиматических изменений, в частности в плейстоцене с ледниковыми циклами, а также для явлений Эль-Ниньо-Южное колебание на масштабах порядка года и для климата тропической части Тихого океана на столетних масштабах. Климатические аномалии последних лет свидетельствуют не только об увеличении риска экстремальных явлений, но и о новых процессах и явлениях, характеризующих достижение определенного критического уровня изменения климата. По результатам анализа современных климатических изменений с использованием наряду с данными наблюдений и палеореконструкций модельных оценок с учетом природных и антропогенных факторов можно сделать вывод, что в ходе потепления последних десятилетий климатическая система Земли вышла на режим, сравнимый с режимом оптимум голоцена [Мохов, 2022].

3. ТЕОРИЯ КЛИМАТА И МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Различные направления теории климата и проблемы моделирования климатической системы

рассматриваются в публикациях, ссылки на которые приведены в списке литературы). В рамках исследований используются климатические модели и модели земной системы разной степени сложности – от простейших концептуальных моделей до наиболее сложных и детальных глобальных и региональных моделей. Разрабатываются новые параметризации, алгоритмы и модельные блоки для развития климатических моделей и моделей земной системы в целом. Все более активно развиваются модели земной системы, включающие взаимодействие климатической системы с естественным углеродным циклом и другими природными циклами.

Разносторонние численные эксперименты проводятся с климатической моделью общей циркуляции и моделью земной системы в ИВМ РАН, в том числе в рамках международного проекта сравнения климатических моделей CMIP 6 [Володин, 2019, 2020, 2021а, 2021б; Володин, Грицун, 2020]. Результаты проведенных модельных расчетов используются, в том числе, в докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC).

Развитие моделей Земной системы предполагает, в частности, более детальный учет верхних слоев атмосферы, в том числе ионосферы. В [Дымников и др., 2020] представлена совместная модель глобальной динамики термосферы и ионосферы Земли (для высот 90–500 км). Модель базируется на трехмерной модели общей циркуляции термосферы и динамической модели F – слоя ионосферы, учитывающей плазмохимические процессы, амбиполярную диффузию и адвективный перенос ионов за счет нейтрального ветра. Предложенная модель способна в целом воспроизводить основные характеристики верхней атмосферы. Исследована чувствительность характеристик термосферы к параметрам ионосферы и чувствительность распределения поля электронной концентрации в F – слое ионосферы к параметрам термосферы при заданном суточном цикле.

В [Karagodin et al., 2019] представлены результаты исследования ионосферного потенциала с использованием химико-климатической модели SOCOL (Solar Climate Ozone Links). При этом использовалась параметризация разности электрических потенциалов между поверхностью Земли и нижней границей ионосферы в зависимости от грозовых и наэлектризованных свойств облаков. Полученные результаты способствуют пониманию особенностей изменения ионосферного потенциала в суточном и годовом ходе. Проведено сравнение с сответствующими исследованиями с использованием климатической модели INMCM4 с подобной параметризацией ионосферного потенциала.

В [Елисеев и др., 2019] представлены результаты оценки регионального влияния учета атмосферного блока сернистого газа на наземный углеродный цикл на основе численных экспериментов с климатической моделью промежуточной сложности (КМ ИФА РАН).

Ряд интересных результатов получен в области модельных исследований механизмов климатической изменчивости, включая исследование особенностей проявления и механизмов формирования квазициклических климатических мод и их влияния на глобальные процессы [Володин, 2019, 2020; Дианский, Багатинский, 2019; Яковлев, Смышляев, 2019; Polonsky, 2019; Кузнецова, Башмачников, 2021]. В том числе исследуются климатические процессы, связанные Атлантической мультидесятилетней осцилляцией, квазидухлетней цикличностью, явлениями Эль-Ниньо.

В обзоре [Studholme et al., 2021] рассмотрены вопросы моделирования изменений режимов тропических циклонов, циркуляции Хэдли и струйных течений в атмосфере при глобальном потеплении. Сделан вывод о том, что в XXI веке вероятно наибольшее расширение широтного ареала проявления тропических циклонов за последние 3 млн лет. Также оцениваются тенденции проникновения тропических циклонов во внетропические широты.

Целый ряд климатических исследований выполнен с использованием концептуальных моделей [Мурышев и др., 2019, 2021; Петров, 2019; Bekryaev, 2019; Soldatenko, 2019, 2020, 2021; Солдатенко, Юсупов, 2019; Alexandrov et al., 2020a, 2021, 2022; Colman, Soldatenko, 2020; Мохов, Порошенко, 2021а, 2021б; Ryashko et al., 2021; Мохов, 2022]. В [Bekryaev, 2019], в частности, особенности климатической изменчивости в Северной Атлантике изучаются с помощью простой стохастической модели, использующей случайное воздействие для моделирования теплообмена между атмосферой и океаном и влияния на температуру поверхности океана Атлантической меридиональной циркуляции. В частности, связь между индексами Атлантической меридиональной циркуляции и Атлантической мультидесятилетней осцилляции зависит от океанических обратных связей и интенсивности диссипации.

В [Мохов, 2022] с использованием энергобалансовой климатической модели получены аналитические условия формирования так называемого Арктического (полярного) усиления в зависимости от разного рода радиационных воздействий на климатическую систему Земли, включая солнечную и вулканическую активность и антропогенные изменения содержания углекислого газа в атмосфере, и с учетом различных климатических обратных связей. В частности, условия формирования арктического усиления были получены при одновременном воздействии различных факторов, в частности, при одновременном изменении солнечной постоянной и содержания CO_2 в атмосфере.

Для развития модельных исследований палеоклиматических процессов существенное значение

имеют соответствующие проекты, организованные в рамках международных программ CMIP, в частности PMIP (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project). При этом для оценки способности климатических моделей адекватно воспроизводить палеоклиматические изменения необходимы соответствующие палеореконструкции. В [Malakhova, Eliseev, 2020] с использованием модельных расчетов сделаны оценки неопределенности палеоклиматических режимов в Плейстоцене. В том числе, оценена неопределенность реакции теплового состояния подводных отложений – это существенно при определении устойчивости залежей метангидратов в связи с климатическими изменениями. Поддержан вывод о характерном времени общей инерционности вечной мерзлоты и залежей метангидратов не менее нескольких тысяч лет. В соответствии с этим выделение метана в атмосферу в арктических широтах можно объяснить многотысячелетними климатическими изменениями, а не потеплением последних десятилетий.

В [Alexandrov et al., 2021] сделаны оценки роли в земном углеродном цикле северных торфяников, являющихся естественным поглотителем углерода со времени последнего ледникового максимума. Согласно [Alexandrov et al., 2021] северные торфяники вместе с океанами потенциально должны играть важную роль в снижении концентрации углекислого газа в атмосфере в течение следующих 5 тысячелетий.

В [Мохов и др., 2020] с использованием численных расчетов с глобальной климатической моделью оценены глобальные и региональные изменения климата в голоцене. Согласно полученным модельным результатам, современная среднегодовая глобальная приповерхностная температура в последние десятилетия превысила соответствующие значения для предыдущих 10 тыс. лет, в том числе в период так называемого “оптимума голоцена” (среднего голоцена), около 6 тыс. лет назад. При этом современные температурныережимы для отдельных регионов, в частности в Европе, могут не достигать еще уровня максимального потепления в среднем голоцене. Глобальные и региональные климатические изменения и изменения характеристик углеродного цикла в последнее столетие по модельным расчетам (с учетомантропогенных воздействий) существенно отличаются от изменений в предыдущие столетия и тысячелетия, когда ключевую роль играли естественные воздействия на климатическую систему.

Фундаментальное развитие моделирования климата на длительных интервалах времени, включая моделированием ледниковых циклов в плейстоцене, связано с учетом динамики ледниковых щитов и их взаимодействия с другими подсистемами климатической системы Земли. В [Постникова, Рыбак, 2022] сделан обзор построения и развития гляциологических моделей, которые должны быть включены в модели климата и модели земной системы.

В [Cooper et al., 2021] с помощью глобального химико-климатического моделирования установлено, что минимумы геомагнитного поля около 42 тыс. лет назад в сочетании с солнечными минимумами вызвали значительные изменения концентрации и циркуляции атмосферного озона и синхронные глобальные климатические сдвиги с серьезными экологические изменения, приведшие к массовому вымиранию.

Оценки эмиссии метана в атмосферу имеют большое значение в связи с возможным разложением гидратов метана, в том числе на арктическом шельфе России, при потеплении и таянии вечной мерзлоты [Shakhova et al., 2019; Анисимов и др., 2020, 2022; Малахова, Елисеев, 2020; Arzhanov et al., 2020; Malakhova, 2020; Метан, 2022; Мохов, 2022; Malakhova, Golubeva, 2022]. В настоящее время эти оценки, в частности для морей Восточной Арктики, различаются на порядки [Shakhova et al., 2019; Малахова, Елисеев, 2020; Malakhova, 2020; Метан, 2022; Мохов, 2022; Malakhova, Golubeva, 2022]. Следует отметить, что эмиссия метана в атмосферу, отмеченная по данным наблюдений на арктическом шельфе, может быть связана с адаптацией термического режима донных отложений шельфа (с характерным временем около 10^4 лет) к режиму потепления в оптимуме голоцена. По модельным оценкам дополнительное глобальное потепление с учетом взаимодействия с естественным циклом метана (за счет соответствующей положительной обратной связи с климатом) относительно невелико на фоне ожидаемых изменений температуры в XXI веке по сценариям антропогенного воздействия [Мохов, 2022]. В [Анисимов и др., 2022] с использованием модели наземной системы INM-CM48 не обнаружено значимой положительной связи между эмиссией метана на шельфе и глобальной приповерхностной температурой и сделан вывод, что эмиссия метана на шельфе в основном обусловлена геологические факторы.

Различные международные программы, инициативы и проекты с российским участием, в том числе CMIP6, CORDEX (Arc CORDEX), ISIMIP, NEFI (NEESPI), PEEX, PMIP и другие способствуют развитию различных направлений моделирования климатической системы и Земной системы в целом.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА С ОЦЕНКОЙ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ВКЛАДОВ

Во многих публикациях (см. список публикаций) представлены результаты моделирования глобальных и региональных климатических из-

менений, в частности в российских регионах, с оценкой роли естественных и антропогенных факторов на разных временных горизонтах.

Результаты разносторонних исследований климатических изменений в российских регионах приведены в [Третий оценочный доклад, 2022] (см. также [Катцов и др., 2019, 2022]). Согласно [Третий оценочный доклад, 2022], глобальное потепление в XXI веке будет сопровождаться формированием все более теплого и влажного климата в большинстве российских регионов. Повышение зимней температуры и росте количества осадков в более холодных регионах страны сопровождается увеличением весеннего снегозапаса с осложнением паводковой обстановки на водосборах крупнейших рек в период снеготаяния. При этом в южных российских регионах ожидается увеличение засушливости с усилением влияния экстремально высоких значений температуры и экстремальных осадковв летние сезоны. Существенные экологические и социально-экономические последствия связаны с деградацией многолетней мерзлоты и сокращением протяженности морских льдов в Арктике. В целом, согласно расчетам с моделями CMIP6 для сценариев семейства SSP, оценки ожидаемых изменений климата в российских регионах в XXI веке качественно согласуются с оценками, полученными ранее для сценариев SRES и RCP. Это свидетельствует о достаточно высокой степени устойчивости оценок изменений климата на территории России.

В [Володин, Грицун, 2020] представлены результаты моделирования изменений климата в 2015–2100 гг. с использованием климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 при различных сценариях антропогенных воздействий (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5). В том числе получено, что ни при каком сценарии полное освобождение от морских льдов Северного Ледовитого океана в XXI веке не достигается. Это связано с тем, что для этой климатической модели характерна относительно слабая скорость глобального потепления по сравнению с другими моделями ансамбля CMIP 6. К концу XXI века проявляется ослабление интенсивности циркуляции Хэдли в обоих полушариях с расширением в сторону полюсов. Отмечено также изменение ячейки Ферреля. На фоне потепления тропосферы и выхолаживания стратосферы проявляется изменение режима западных ветров в средних широтах.

В [Алешина, Семенов, 2022] получены оценки изменений характеристик осадков в российских регионах по расчетам с ансамблем климатических моделей CMIP 6 при сценарии антропогенных воздействий SSP 585 для XXI века. Для большинства российских регионов получен общий рост количества осадков и повторяемости экстремальных осадков в зимние сезоны. Для летних сезонов проявляется слабое уменьшение общего количества осадков и их повторяемости на юге европейской части России.

В [Климат Арктики, 2022] проведены разносторонние исследования ключевых процессов и изменений в арктической климатической системе. Представлены оценки возможных региональных изменений температурного режима и морских льдов, в том числе на Северном морском пути, изменений ветро-волновой и циклонической активности, изменений многолетней мерзлоты. Приведены оценки влияния изменений климата на режимы метангидратов, в частности субаквальных залежей метангидратов. Результаты разносторонних исследований изменений цикла метана, включая режимы метангидратов в арктических регионах, при изменениях климата представлены в [Метан, 2022].

В [Акперов и др., 2022] впервые получены количественные оценки изменений ветроэнергетических ресурсов в Арктике с использованием региональной климатической модели при разных сценариях антропогенных воздействий (RCP 4.5 и RCP 8.5) для 21 века. Выявлено заметное увеличение в XXI веке мощности ветроэнергетического потенциала, пропорциональной кубу скорости ветра, над Баренцевым, Карским и Чукотским морями и прибрежными регионами зимой. Летом проявляется общее увеличение мощности ветроэнергетического потенциала над Северным Ледовитым океаном. Изменения более значительные при сценарии с более сильными антропогенными воздействиями (RCP 8.5).

В [Парфенова и др., 2022] проведен анализ продолжительности изменений навигационного периода на Северном морском пути на основе расчетов с климатическими моделями ансамбля CMIP5 при сценарии RCP 8.5 в XXI веке с использованием методов байесового осреднения с выделением различных участков Северного морского пути. Получено, что различия качества воспроизведения моделями продолжительности навигационного периода и ее изменений в западной части Северном морском пути больше, чем в восточной.

В [Мохов, Тимажев, 2019] получены оценки изменения повторяемости атмосферных блокирований в Северном полушарии с разными критериями их детектирования с использованием численных расчетов с климатическими моделями общей циркуляции ансамбля CMIP5 при различных RCP-сценариях антропогенных воздействий для XXI века. Качество воспроизведения разными климатическими моделями характеристик атмосферных блокингов оценивалось сравнением меридиональных сезонных распределений повторяемости атмосферных блокирований с данными реанализа. Согласно полученным результатам, целесообразно выделение ансамблей моделей, лучше воспроизводящих современные режимы атмосферных блоки-

рований и их вариаций. При выделении лучших моделей выявляется, в частности, риск увеличения повторяемости атмосферных блокирований при потеплении, что не выявлено по расчетам с ансамблем всех анализировавшихся моделей.

В [Гельфан и др., 2022] сделан обзор публикаций с оценками изменений стока российских рек при изменениях климата в XXI веке, выполненных в последние годы. Отмечено, что использование региональных гидрологических моделей способствует уменьшению неопределенности возможных в будущем изменений водного режима рек. В [Липавский и др., 2022] проведен анализ изменений стока Амура и Селенги по расчетам с ансамблем климатических моделей CMIP 6 при разных SSP-сценариях в XXI веке с использованием Байесова подхода. Отмеченные для обоих водосборов большие межмодельные различия связаны с оценками и многолетнего среднего стока, и межгодовой изменчивости. Для стока в бассейне Амура проявляется положительный тренд в 21 веке при всех проанализированных сценариях антропогенного воздействия. Для стока Селенги тренды в XXI веке не выявлены при всех использованных сценариях антропогенных воздействий. При этом отмечены существенные междесятилетние вариации межгодовой изменчивости стока.

В [Денисов и др., 2022] получены модельные оценки вклада антропогенных и природных потоков парниковых газов с территории разных стран в глобальные изменения климата в XXI веке при различных сценариях антропогенных воздействий. Сделаны количественные оценки влияния учета изменений региональных климатических условий на интенсивность обмена парниковыми газами между атмосферой и естественными экосистемами на разных временных горизонтах в сопоставлении с антропогенными эмиссиями. В том числе, для России, Китая, Канады и США во второй половине XXI века поглощение CO_2 природными экосистемами уменьшается при всех сценариях антропогенного воздействия с ослаблением соответствующего стабилизирующего климат эффекта. При этом эмиссия метана в атмосферу болотными экосистемами в анализировавшихся регионах значительно увеличивается в XXI веке согласно модельным оценкам. Как следствие, суммарный эффект естественных потоков парниковых газов в атмосферу для отдельных регионов может ускорять потепление.

5. ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ И СМЯГЧЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ

Значительное внимание в климатических исследованиях уделяется проблемам, связанным с последствиями изменений климата, в том числе проблемам адаптации и смягчения последствий (см. список литературы). В связи с быстрыми современными изменениями климата в регионах России, в частности в арктических широтах, актуальны не только вопросы, связанные с адаптацией российской социально-экономической системы к негативным последствиям изменения климата и обеспечением гидрометеорологической безопасности, но и вопросы своевременного учета новых возможностей. Необходимо, например, стратегически оценивать потенциальные возможности сокращения морозного периода и удлинения вегетационного периода в регионах России, перспективы Северного морского пути и т.д. в условиях потепления.

Различные проблемы, связанные с последствиями изменения климата в регионах России, в том числе проблемы адаптации и регулирования, анализируются в [Третий оценочный доклад, 2022]. Отмечено, что для оценки последствий изменения климата по результатам моделирования требуется пространственно-временная детализация прогностических климатических оценок, а также массовые численные расчеты для более надежного статистического описания ожидаемых изменений (см. также [Катцов и др., 2020]). В рамках оценивания воздействий изменения климата на природную среду рассматриваются особенности природных систем суши, углеродного баланса почв, морских природных систем. В числе воздействий климатических изменений на население выделяются проблемы демографической ситуации и миграции, трудовых ресурсов и занятости, влияния погодно-климатических экстремальных явлений на здоровье населения, эпидемиологической обстановки. Рассматриваются также проблемы влияния климатических изменений на различные отрасли российской экономики, в том числе на добывающую промышленность, сельское хозяйство, водное хозяйство, лесное хозяйство, энергетику, транспорт, строительство и жилищно-коммунальное хозяйство, инфраструктуру в зоне многолетней мерзлоты, морскую деятельность, туризм и рекреацию.

Проблемы адаптации в чувствительных к изменениям климата арктических российских регионах анализируются в [Эдельгериев, Романовская, 2020]. В том числе обсуждаются вопросы предотвращения нарушений поверхностных покровов мерзлых пород, минимизации антропогенного загрязнения, сохранения и увеличения альбедо поверхности в зимние сезоны. Отмечено, что анализ всех показателей в системе мониторинга эффективности адаптации и прогностические оценки способствуют принятию обоснованных управленческих решений о целесообразности корректирования применяемых адаптационных решений.

Проблемы, связанные с влиянием изменений климата на здоровье населения, анализируются в [Ревич и др., 2019; Григорьева, Ревич, 2021; Ревич, 2021; Ревич, Григорьева, 2021; Grigorieva,

Revich, 2021; Revich et al., 2022]. В обзоре [Ревич, Григорьева, 2021] представлены основные материалы международных организаций по проблеме оценки воздействия климатических рисков на здоровье городского населения и программ действий по адаптации системы здравоохранения и других управленческих структур. Систематизированы результаты российских исследований по оценке воздействия волн жары и холода на показатели смертности населения мегаполисов и больших городов, расположенных в различных климатических зонах – арктических, приарктических и южных регионах, в том числе в условиях резко континентального и муссонного климата. Отмечено, что волны жары в городах с умеренным континентальным климатом приводят к более значительному приросту смертности от всех причин, чем волны холода, по сравнению с городами в других климатических зонах. С волнами холода в целом связаны гораздо бóльшие риски для здоровья населения в северных городах, чем в южных. Предложены количественные оценки пороговых температурных условий, по достижении которых необходимо проведение соответствующих профилактических мероприятий.

В [Изменение климата, 2022] представлены результаты многолетних исследований в связи с проблемами адаптации к изменениям климата российской экономики. В том числе, обсуждаются методологические вопросы использования климатических данных при социально-экономических оценках, анализируются современные процессы с прогностическими оценками ожидаемых в XXI веке изменений. Представлены соответствующие оценки влияния климатических изменений на экономику и социальную сферу в России, включая развитие ключевых отраслей. Анализируются проблемы стратегии снижения климатических рисков для устойчивого развития России, в том числе основные направления и меры сокращения нетто-выбросов парниковых газов и адаптации населения и экономики к последствиям изменений климата.

В [Башмаков, 2020, 2022] анализируется проблема декарбонизации глобальной промышленности, доминирующей в прямых и косвенных выбросах парниковых газов в атмосферу. Отмечено, что рост выбросов от промышленности в последнее десятилетие замедлился, а решение проблемы декарбонизации требует в ближайшие 30–50 лет динамичного снижения потоков парниковых газов в атмосферу при существенной модернизации глобальной промышленности с масштабным использованием новых технологий.

В соответствии с целями Парижского соглашения в [Акаев, Давыдова, 2020] оценивается возможность энергетического перехода от доминирующих ископаемых углеводородов к преимущественному использованию возобновляемых источников энергии, когда их доля в общем энергобалансе превысит 40% (см. также [Akaev, Davydova, 2021]). Согласно полученным оценкам, подобный переход может состояться в 2060-е гг. при условии увеличения доли ядерной энергетики почти втрое. Отмечено, что только при совместном использовании возобновляемых источников энергии и АЭС можно в достаточной мере заместить углеводороды для достижения поставленных целей климатической безопасности без ущерба экономике.

В связи с необходимостью выполнения условий Парижского соглашения (2015 г.) Рамочной конвенции ООН об изменении климата необходима адекватная количественная оценка всех источников эмиссий парниковых газов в атмосферу и их стоков, в том числе адекватный учет углеродного баланса лесов, наземных и водных экосистем. Наземные экосистемы в российских регионах, поглощая CO_2 из атмосферы, способствуют замедлению роста глобальной температуры у поверхности, а эмитируя в атмосферу CH_4, ускоряют потепление. Общий эффект естественных потоков этих парниковых газов из российских регионов в современных условиях способствует замедлению потепления. При этом, согласно полученным в [Денисов и др., 2019] модельным оценкам, роль этого замедляющего потепление эффекта впервой половине XXI века растет, а после достижения максимума (зависящего от сценария антропогенных выбросов) к концу века уменьшается при различных анализировавшихся сценариях антропогенных воздействий в связи с ростом естественных эмиссий CH_4 и уменьшением поглощения CO_2 наземными экосистемами (см. также [Денисов и др., 2022; Мохов, 2022]).

Необходимо принимать во внимание потенциальные новые риски и возможности. При принятии решений следует учитывать, что в зависимости от горизонта планирования может изменяться роль естественных потоков парниковых газов в атмосферу из наземных экосистем, в том числе стабилизирующий эффект, обусловленный поглощением потоков CO_2 лесами. Необходимы количественные оценки на разных временных горизонтах роли ключевых источников и стоков парниковых газов, связанных с различными естественными экосистемами – от степных до тундровых, а также болотами, озерами и др. [Глобальный климат, 2019; Денисов и др., 2019; Клименко и др., 2019, 2020; Russian National Report, 2019; Winkler et al., 2019; Торжков и др., 2019; Лукина, 2020; Alexandrov et al., 2020; Lukina et al., 2020; Romanovskaya et al., 2020; Ваганов и др., 2021; Anisimov, Zimov, 2021; Schepaschenko et al., 2021; Климат Арктики, 2022; Мохов, 2022; Третий оценочный доклад, 2022; Geraskina et al., 2022].

В [Пекарникова, Полонский, 2021; Полонский, Пекарникова, 2021] отмечены проблемы формирования международной правовой системы, связанной с системой контроля за выбросами

в атмосферу парниковых газов, как причины глобального потепления антропогенного происхождения. Обсуждается развитие международной деятельности по контролю над антропогенными изменениями климата со времени подписания в 1992 г. Рамочной конвенции ООН об изменениях климата до принятия в 2015 г. Парижского соглашения по климату. Анализируется процесс принятия Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН, международная деятельность по формированию рынка торговли квотами на выбросы парниковых газов и принятые в 2012 г. поправки к Киотскому протоколу, продлевающие действие Протокола до 2020 г. Рассматриваются основные положения Парижского соглашения по климату и связанные с его ратификацией проблемы правового регулирования контроля за антропогенными выбросами парниковых газов и аэрозолей на международном и национальном уровнях.

Что касается России, то с продолжением глобального потепления, наряду с учетом новых возможностей, в том числе перспектив использования Северного морского пути, увеличения вегетационного периода и т.д., необходимо решать проблемы адаптации и регулирования. в связи с негативными последствиями таяния вечной мерзлоты, увеличением опасности наводнений, аномальной жары и засух, лесных пожаров и др. [Мохов, 2022].

В связи с происходящими и ожидаемыми изменениями климата для эффективного решения задач адаптации к ним и возможного их регулирования требуется коренной пересмотр системы критериев оценки новых рисков, негативных последствий и потенциальных выгод. Необходим стратегический подход (не только на одно–два десятилетия), а также разработка общей системы взаимосогласованных региональных оценок прогнозируемости сезонных климатических аномалий в межгодовой и междесятилетней изменчивости.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные изменения климата уже диктуют новые требования к своевременному и более детальному и разностороннему учету региональных экологических и социально-экономических последствий с формированием соответствующих систем адаптации и возможного регулирования. Необходимо разработать единую систему взаимно согласованных региональных оценок риска и предсказуемости аномальных климатических режимов и их изменчивости с учетом природных и антропогенных воздействий на разных временных горизонтах. Все большее значение приобретают количественные оценки компонентов углеродного баланса системы Земли, в том числе более детальные региональные оценки роли российских лесов и других природных экосистем в рамках системы углеродных полигонов.

В России в 2019 г. был принят Национальный план действий по первому этапу адаптации к изменению климата до 2022 г. После этого был принят Национальный план действий по второму этапу адаптации к изменению климата до 2025 г. (http://static.government.ru/media/files/). Цель – предотвратить негативное влияние изменения климата на отрасли экономики и качество жизни и заблаговременно учесть новые возможности, открывающиеся на федеральном, отраслевом и региональном уровнях. Должно быть организационное, правовое, научное, методическое и информационное обеспечение необходимых адаптационных мероприятий. Развитие системы адекватного и своевременного учета новых рисков и возможностей, связанных с изменением климата, должно включать в себя соответствующее развитие мониторинга климата, в частности спутникового, и моделирования изменения климата и его последствий при различных сценариях природных и антропогенных воздействий. Этому должна способствовать Федеральная научно-техническая программа в области экологического развития Российской Федерации и изменения климата на 2021–2030 гг. (http://static.government.ru/media/ files/).

Особое внимание следует уделить изменению климата и его последствиям в полярных широтах, имеющим не только региональное, но и быстро возрастающее в последние годы глобальное значение. В Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г. (http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972/) отмечены особенности Арктической зоны, определяющие особые подходы к ее социально-экономическому развитию и обеспечению национальной безопасности в Арктике с учетом экстремальных природно-климатических условий, высокой чувствительности экологических систем и роста конфликтного потенциала. Сильные и быстрые климатические изменения в арктических широтах способствуют возникновению как новых экономических возможностей, так и рисков для хозяйственной деятельности и окружающей среды, в частности для судоходства по Северному морскому пути и использования природных ресурсов на шельфе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акаев А.А., Давыдова О.И. Парижское климатическое соглашение вступает в силу. Состоится ли великий энергетический переход? // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 10. С. 926–938.

Акперов М.Г. и др. Потенциал ветровой энергетики в арктических и субарктических широтах и его изменения в XXI веке по расчетам с использованием региональной климатической модели // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 18–29.

Алешина М.А., Семенов В.А. Изменения характеристик осадков на территории России в XX-XXI вв. по

данным ансамбля моделей CMIP6 // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022.Т. 8. № 4. С. 424–440.

Анисимов О.А., Зимов С.А., Володин Е.М., Лавров С.А. Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 19–27.

Анисимов О.А., Зимов С.А., Володин Е.М. Климатообразующая роль эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 131–143.

Бардин М.Ю., Платова Т.В. Долгопериодные вариации показателей экстремальности температурного режима на территории России и их связь с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции и глобальным потеплением // Метеорология и гидрология. 2019. № 12. С. 5–19.

Бардин М.Ю., Платова Т.В. Волны холода в Европейской части России: структура, циркуляционные условия и изменения сезонных статистик // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8. № 3. С. 5–30.

Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 3. С. 32–58.

Башмаков И.А. Стратегия низкоуглеродного развития российской экономики // Вопросы экономики. 2020. № 7. С. 51–74.

Башмаков И.А. Масштаб необходимых усилий по декарбонизации мировой промышленности // Вопросы экономики. 2022. Т. 8. № 2. С. 151–174.

Безверхний В.А. 100 000-летняя ритмичность в ледниковых циклах и колебаниях уровня Мирового океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 4. С. 37–44.

Безверхний В.А. О 100 тысячелетней ритмичности в геодинамике и палеоклимате // Физика Земли. 2019. № 3 С. 117–125.

Бондур В.Г. и др. Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденции 20-летних изменений // ДАН. 2020. Т. 492. № 1. С. 99–106.

Ваганов Е.А., Порфирьев Б.Н., Широв А.А., Колпаков А.Ю., Пыжев А.И. Оценка вклада российских лесов в снижение рисков климатических изменений // Экономика региона. 2021. Т. 17. № 4. С. 1096–1109.

Володин Е.М. Оценка вклада различных механизмов в эволюцию фазы квазидвухлетнего колебания по результатам климатического моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 35–40.

Володин Е.М. О механизме колебания климата в Арктике с периодом около 15 лет по данным модели климата ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 139–149.

Володин Е.М. Равновесная чувствительность модели климата к увеличению концентрации CO_2 в атмосфере при различных методах учета облачности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 139–145.

Володин Е.М. Связь естественной изменчивости климата и чувствительности модели климата ИВМ РАН к увеличению концентрации CO_2 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 509–513.

Володин Е.М., Грицун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 3. С. 255–266.

Гельфан А.Н., Гусев Е.М., Калугин А.С. и др. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: Обзор публикаций. 2. Влияние изменения климата на водный режим рек России в XXI веке // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 270–285.

Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Национальный доклад. Т. 2. Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева и др. М.: “Издательство МБА”. 2019. 476 с. ISBN 978-5-6043225-6-7 37

Григорьева Е.А., Ревич Б.А. Риски здоровью российского населения от погодных экстремумов в 2010–2020 гг. Часть 2. Наводнения, тайфуны, ледяной дождь, засухи // Проблемы анализа риска. 2021. Т. 18. № 3. С. 10–31.

Денисов С.Н. и др. Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO_2 и CH_4 в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // Доклады АН. 2019. Т. 488. № 1. С. 74–80.

Денисов С.Н. и др. Модельные оценки вклада естественных и антропогенных эмиссий CO_2 и CH_4 в атмосферу с территории России, Китая США и Канады в глобальные изменения климата в XXI веке // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 18–32.

Дианский Н.А., Багатинский В.А. Термохалинная структура вод Северной Атлантики в различные фазы Атлантической мультидекадной осцилляции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 157–170.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М.: Росгидромет. 2019. 79 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М.: Росгидромет. 2020. 97 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет. 2021. 104 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М.: Росгидромет. 2022. 104 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Росгидромет. 2023. 108 с.

Дымников В.П., Кулямин Д.В., Останин П.А. Совместная модель глобальной динамики термосферы и ионосферы Земли // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 3. С. 280–292.

Екайкин А.А., Липенков В.Я., Чихачев К.Б. Сохранность климатического сигнала в слоях древнего льда в районе Купола В (Антарктида) // Лед и снег. 2021. Т. 61. № 1. С. 5–13.

Елисеев А.В., Чжан М., Гизатуллин Р.Д. и др. Влияние сернистого газа в атмосфере на наземный углерод-

ный цикл // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 41–53.

Изменение климата и экономика России: тенденции, сценарии, прогнозы. Под ред. Порфирьева Б.Н., Данилова–Данильяна В.И. М.: Научный консультант, 2022. 514 с.

Катцов В.М., Школьник И.М., Павлова В.Н. и др. Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Ч. 2: Оценки климатических воздействий // Труды ГГО. 2019. № 593. С. 6–52.

Катцов В.М., Хлебникова Е.И., Школьник И.М., Рудакова Ю.Л. Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа Разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 46–58.

Катцов В.М., Павлова Т.В., Говоркова В.А. и др. Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями CMIP6 // Труды ГГО. 2022. № 604. С. 5–54.

Климат Арктики: процессы и изменения. Под ред. И.И. Мохова, В.А. Семенова. М.: Физматкнига, 2022. 360 с.

Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Динамика биотических потоков углерода при различных сценариях изменения площади лесов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 462–472.

Клименко В.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Влияние изменений атмосферы и климата на энергетический потенциал лесов России // ДАН. 2019. Т. 488. № 6. С. 612–618.

Кузнецова Д.А., Башмачников И.Л. О механизмах изменчивости Атлантической меридиональной океанической циркуляции (АМОЦ) // Океанология. 2021. Т. 61. № 6. С. 843–855.

Куликова И.А., Круглова Е.Н., Хан В.М. Оценка практической предсказуемости блокирующих антициклонов с использованием современных гидродинамических моделей // Метеорология и гидрология. 2022. № 1. С. 5–23.

Липавский А.С. и др. Байесовы оценки изменения стока Амура и Селенги в XXI веке по результатам ансамблевых модельных расчетов CMIP6 // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 64–82.

Лукина Н.В. Глобальные вызовы и лесные экосистемы // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 6. С. 528–532.

Малахова В.В., Елисеев А.В. Влияние диффузии солей на состояние и распространение многолетнемерзлых пород и зоны стабильности метан-гидратов шельфа моря Лаптевых // Лед и снег. 2020. Т. 60. № 4. С. 533–546.

Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты. Под ред. В.Г. Бондура, И.И. Мохова, А.А. Макоско. М.: РАН, 2022. 388 с.

Мохов И.И. Российские исследования в области атмосферных наук и метеорологии в 2015–2018 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 3–5.

Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2015–2018 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 1–21.

Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 1. С. 3–14.

Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене // ДАН. 2020. Т. 490. № 1. С. 27–32.

Мохов И.И. Аналитические условия формирования Арктического усиления в Земной климатической системе // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 505. № 1. С. 102–107.

Мохов И.И. Российские исследования в области атмосферных наук и метеорологии в 2019–2022 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 7. С. 827–829.

Мохов И.И., Порошенко А.Г. Статистические и модельные оценки связи размеров и времени жизни полярных мезоциклонов // Вестник Московского университета. 3. Физика. Астрономия. 2021. № 6. С. 53–57.

Мохов И.И., Порошенко А.Г. Статистические и модельные оценки связи интенсивности и времени существования тропических циклонов // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 25–30.

Мохов И.И., Тимажев А.В. Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 5–16.

Мохов И.И., Тимажев А.В. Повторяемость летних атмосферных блокирований в Северном полушарии в разных фазах явлений Эль-Ниньо, Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультидесятилетней осцилляций // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 239–249.

Мохов И.И., Тимажев А.В. Интегральный индекс активности атмосферных блокирований в Северном полушарии в последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 6. С. 638–647.

Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Денисов С.Н. и др. Фазовый сдвиг между изменениями глобальной температуры и содержания CO_2 в атмосфере при внешних эмиссиях парниковых газов в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 11–19.

Мурышев К.Е. и др. Влияние нелинейных процессов на временной лаг между изменениями глобальной температуры и содержания углекислого газа в атмосфере // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 1. С. 52–58.

Мухин Д.Н., Селезнев А.Ф., Гаврилов А.С., Фейгин А.М. Оптимальные эмпирические модели динамических систем с внешними воздействиями: общий подход и примеры из климата // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2021. Т. 29. № 4. С. 571–602.

Парфенова М.Р. и др. Изменения периода навигации на Северном морском пути в XXI веке: Байесовы оценки по расчетам с ансамблем климатических моделей // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 118–125.

Пекарникова М.Е., Полонский А.Б. Антропогенные изменения климата и международно-правовая деятельность по смягчению их последствий. Часть 2. Реализация климатических правовых актов на современном этапе и их перспективы // Государство и право. 2021. № 5. С. 118–124.

Петров Д.А. Свойства частотных спектров аномалий температур поверхности океана и приповерхностного воздуха в простой стохастической модели климата с флуктуирующими параметрами //Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 4. С. 27–36.

Полонский А.Б., Пекарникова М.Е. Антропогенные изменения климата и международно-правовая деятельность по смягчению их последствий. Часть 1. От Рамочной конвенции ООН до Парижского соглашения // Государство и право. 2021. № 4. С. 104–113.

Постникова Т.Н., Рыбак О.О. Глобальные гляциологические модели: новый этап в развитии методов прогнозирования эволюции ледников. Часть 2. Постановка экспериментов и практические приложения // Лед и снег. 2022. Т. 62. № 2. С. 287–304.

Ревич Б.А. Новые и старые риски здоровью в меняющемся климате // Проблемы анализа риска. 2021. Т. 18. № 2. С. 8–11.

Ревич Б.А., Григорьева Е.А. Риски здоровью российского населения от погодных экстремумов в начале XXI в. Часть 1. Волны жары и холода // Проблемы анализа риска. 2021. Т. 18. № 2. С. 12–33.

Ревич Б.А., Малеев В.В., Смирнова М.Д. Изменение климата и здоровье: оценки, индикаторы, прогнозы. М.: ИНП РАН. 2019. 196 с.

Солдатенко С.А., Юсупов Р.М., Колман Р. Кибернетический подход к проблеме взаимодействия общества и природы в условиях беспрецедентно меняющегося климата // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19. № 1. С. 5–42.

Солдатенко С.А., Юсупов Р.М. Модель оценки неравновесного отклика среднеглобальной приповерхностной температуры на изменение концентраций атмосферных аэрозолей и радиационно-активных газов // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 4. С. 309-316.

Торжков И.О., Кушнир Е.А., Константинов А.В. и др. Оценка изменений климата на лесное хозяйство // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 40–49.

Третий оценочный отчет об изменении климата и его последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб: Наукоемкие технологии. 2022. 676 с.

Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А. и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 27–41.

Эдельгериев Р.С.Х., Романовская А.А. Новые подходы к адаптации к изменению климата на примере Арктической зоны Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 12–28.

Яковлев А.Р., Смышляев С.П. Влияние Южной Осцилляции на стратосферы и озоновый слой Арктики // Изв. РАН. Физикаатмосферыиокеана. 2019. Т. 55. № 1. С. 98–113.

Akaev A.A., Davydova O.I. A Mathematical description of selected energy transition scenarios in the 21st century, intended to realize the main goals of the Paris Climate Agreement. Energies, 2021, 14, 2558. https://doi.org/10.3390/ en14092558

*Alexandrov D.V., Bashkirtseva I.A., Ryashko L.B.*Anomalous climate dynamics induced by multiplicative and additive noises //Phys. Rev. E. 2020. V. 102 (1). P. 012217.

*Alexandrov D.V., Bashkirtseva I.A., Ryashko L.B.*Variability in the noise-induced modes of climate dynamics // Phys. Lett. A. 2020. V. 384 (19). P. 126411. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.126411

Alexandrov D.V., Bashkirtseva I.A., Ryashko L.B. How random noise induces large-amplitude oscillations in an El Niño model // Physica D: Nonlin. Phenom. 2022. V. 440. P. 133468.

Alexandrov D.V., Bashkirtseva I.A., Crucifix M., Ryashko L.B. Nonlinear climate dynamics: From deterministic behaviour to stochastic excitability and chaos // Phys. Rep. 2021. V. 902. P. 1–60.

Alexandrov G.A., Brovkin V.A., Kleinen T., Yu Z. The capacity of northern peatlands for long-term carbon sequestration // Biogeosci. 2020. V. 17 (1). P. 47–54.

Alexandrov G.A., Brovkin V.A., Kleinen T., Yu Z. The capacity Of Northern peatlands for long-term carbon sequestration // Biogeosci. 2020. V. 17 (1). P. 47–54.

Anisimov O., Zimov S. Thawing permafrost and methane emission in Siberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling // Ambio. 2021. V. 50. P. 2050–2059.

Arzhanov M.M. et al. Modeling thermal regime and evolution of the methane hydrates stability zone of the Yamal Peninsula permafrost // Permafrost Periglac. Proc. 2020. V. 31 (4). P. 487–496.

Bekryaev R.V. Interrelationships of the North Atlantic multidecadal climate variability characteristics // Russ. J. Earth Sci. 2019. V. 19 (3). https://doi.org/10.2205/2018ES000653

*Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O. et al.*Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. P. 045001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82

Colman R., Soldatenko S. Understanding the links between climate feedbacks, variability and change using a two-layer energy balance model // Cli. Dyn. 2020. V. 54 (7–8). P. 3441–3459.

*Cooper A. et al.*A global environmental crisis 42,000 years ago // Science. 2021. V. 371. P. 811–818.

Dalin P., Perminov V., Pertsev N., Romejko V. Updated long-term trends in mesopause temperature, airglow emissions, and noctilucent clouds // J. Geophys. Res.: Atmos. 2020 V. 125. e2019JD030814. https://doi.org/10.1029/2019JD030814

Geraskina A.P. et al. Wildfires as a factor of loss of biodiversity and forest ecosystem functions. Forest Sci. Iss., 2022, 5 (1), 1–70.

Grigorieva E.A., Revich B.A. Health risks to the Russian population from temperature extremes at the beginning of the XXI century // Atmosphere. 2021. V. 12 (10). P. 1331.

Karagodin A., Mironova I., Golubenko K. et al. The representation of ionospheric potential in the global chemis-

try-climate model SOCOL // The Sci. Total Environ. 2019. V. 697. P. 134172.

Loskutov E., Vdovin V., Klinshov V. et al. Applying interval stability concept to empirical model of Middle Pleistocene transition // Chaos. 2022. V. 32 (2). P. 021103.

*Lukina N. et al.*Linking forest vegetation and soil carbon stock in northwestern Russia. Forests. 2020.V. 11 (9). P. 979–980.

Malakhova V.V. The response of the Arctic Ocean gashydrate associated with subsea permafrost to naturaland anthropogenic climate changes // IOP Conf. Ser.:Earth Environ. Sci. 2020. V. 606. P. 012035.

Malakhova V.V., Eliseev A.V. Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments // Glob. Planet. Change. 2020. V. 192. P. 103249.

*Malakhova V., Golubeva E.*Model study of the effects of climate change on the methane emissions on the Arctic shelves // Atmosphere. 2022. V. 13 (2). P. 274. https://doi.org/10.3390/atmos13020274

Mukhin D., Gavrilov A., Loskutov E. et al. Bayesian data analysis for revealing causes of the middle Pleistocene transition // Sci. Rep. 2019. V. 9 (1). P. 7328. https://www.nature.com/articles/s41598-019-43867-3

Polonsky A.B. The Ocean's Role in Climate Change. Cambridge Scholars Publ., Newcastle upon Tyne. 2019. 276 pp.

Revich B.A., Eliseev D.O., Shaposhnikov D.A. Risks for public health and social infrastructure in Russian Arctic under climate change and permafrost degradation // Atmosphere. 2022. V. 13 (4). P. 532.

Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D. et al. Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation. Mitigat. Adapt. Strateg. Glob. Change. 2020. V. 25 (4). P. 661–687.

Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences (2015–2018). Ed. by *I.I. Mokhov, A.A. Krivolutsky*. Moscow, MAKS Press, 2019, 332 pp.

Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences. 2019-2022. Ed. by *I.I. Mokhov, A.A. Krivolutsky*. Moscow, MAKS Press, 2023, 440 pp.

Ryashko L., Alexandrov D.V, Bashkirtseva I. Analysis of stochastic generation and shifts of phantom attractors in a climate–vegetation dynamical model // Mathematics. 2021. V. 9. P. 1329.

Schepaschenko D. et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // Sci. Rep. 2021. V. 11 (1). P. 252.

Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost–hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic shelf // Geosci. 2019. V. 9. P. 251.

Soldatenko S.A. Estimated impacts of climate change on eddy meridional moisture transport in the atmosphere // Appl. Sci. 2019. V. 9 (23). P. 4992.

Soldatenko S.A. Estimating the effect of radiative effect uncertainties on climate response to changes in the concentration of stratospheric aerosols // Atmosphere. 2020. V. 11 (6). P. 654.

Soldatenko S.A. Effects of global warming on the poleward heat transport by non-stationary large-scale atmospheric eddies, and feedbacks affecting the formation of the Arctic climate // J. Marine Sci. Engin. 2021. V. 9 (8). P. 867.

Soldatenko S.A., Colman R. Climate variability from annual to multi-decadal timescales in a two-layer stochastic energy balance model: Analytic solutions and amplications for general circulation models // Tellus A. 2019. V. 71 (1). P. 1–15.

Studholme J., Fedorov A.V., Gulev S.K., Emanuel K., Hodges K. Poleward expansion of tropical cyclone latitudes in warming climates //Nature Geosci. 2021. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00859-1

Volodin E. The mechanisms of cloudiness evolution responsible for equilibrium climate sensitivity in climate model INM-CM4-8 // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48 (24), e2021GL096204.

Winkler A.J., Myneni R.B., Brovkin V., Alexandrov G.A. Earth system models underestimate carbon fixation by plants in the high latitudes // Nature Comm. 2019. V. 10 (1). P. 885.

Дополнительный список литературы к разделу 2.

Акперов М.Г. и др. Особенности температурной стратификации и ее изменений в тропосфере арктических широт по данным реанализа и модельным расчетам // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 19–27.

Алексеев Г.В., Глок Н.И., Вязилова А.Е. и др. Влияние температуры поверхности океана в тропиках на антарктический морской лед в период глобального потепления // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 213–221.

Бабина Е.Д., Семенов В.А. Внутримесячная изменчивость среднесуточной приземной температуры воздуха на территории России в период 1970–2015 гг. // Метеорология и гидрология. 2019. № 8. С. 21–33.

Багатинский В.А., Дианский Н.А. Изменчивость термохалинной циркуляции Северной Атлантики в различные фазы Атлантической мультидекадной осцилляции по данным океанских объективных анализов и реанализов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 231–244.

Багатинский В.А., Дианский Н.А. Вклады климатических изменений температуры и солености в формирование трендов термохалинной циркуляции Северной Атлантики // Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2022. № 3. С. 73–88.

Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я., Платова Т.В. и др. Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 29–45.

Бокучава Д.Д., Семенов В.А. Роль естественных колебаний и факторов внешнего воздействия на климат в потеплении середины XX века в Северном // Лед и снег. 2022. Т. 62. № 3. С. 455–474.

Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина М.Н., Зима А.Л. Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным // Исследование Земли из космоса. 2020. № 4. С. 3–17.

Бондур В.Г., Воронова О.С., Гордо К.А., Зима А.Л. Космический мониторинг изменчивости площадей природных пожаров и эмиссий вредных примесей в атмосферу на территории различных регионов России за 20-летний период // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 216–222.

Борзенкова И.И., Ершова А.А., Жильцова Е.Л., Шаповалова К.О. Морской лед Арктического бассейна в

свете современных и прошлых климатических изменений // Лед и снег. 2021. Т. 61. № 4. С. 533–546.

Вакуленко Н.В., Даценко Н.М., Сонечкин Д.М. Изменение общей циркуляции атмосферы Северного полушария за 1998–2018 гг. // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 5–13.

Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Ракушина Е.В., Володин Е.М., Погорельцев А.И. Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и параметров стратосферного полярного вихря в Арктике по данным моделирования и реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 5. С. 526–539.

Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В., Облогов Г.Е., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Стрелецкая И.Д., Стрелецкий Д.А., Устинова Е.В., Широков Р.С. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 2. С. 15–30.

Выручалкина Т.Ю., Дианский Н.А., Фомин В.В. Эволюция уровня Каспийского моря под влиянием климатических изменений поля ветра // Труды ГОИН. 2019. № 220. С. 135–147.

Выручалкина Т.Ю., Дианский Н.А., Фомин В.В. Влияние на эволюцию уровня Каспийского моря многолетних изменений режима ветра над его регионом в 1948–2017 гг. // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 230–240.

Гочаков А.В., Антохина О.Ю., Крупчатников В.Н., Мартынова Ю.В. Долговременная изменчивость опрокидывания волн Россби в районе субтропического течения // Метеорология и гидрология. 2022. № 2. С. 5–19.

Гущина Д.Ю., Калиновская М.В., Матвеева Т.А. Влияние Тихоокеанского десятилетнего колебания на характеристики Эль-Ниньо двух типов при возможных изменениях климата // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 14–28.

Даценко Н.М., Сонечкин Д.М., Янг Б. и др. Сравнительный анализ спектров 2000-летних реконструкций средней приземной температуры воздуха Северного полушария // Метеорология и гидрология. 2021. № 10. С. 5–13.

Зуев В.В., Савельева Е.С. Динамика стратосферных полярных вихрей. Новосибирск: “Гео”. 2020. 115 с.

Кислов А.В., Морозова П.А. Вариации уровня Каспийского моря в различных климатических условиях по данным моделирования в рамках проекта CMIP6 // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 6. С. 622–632.

Макаров А.С., Миронов Е.У., Иванов В.В., Юлин А.В. Ледовые условия морей Российской Арктики в связи с происходящими климатическими изменениями и особенности эволюции ледяного покрова в 2021 году // Океанология. 2022. Т. 62. № 6. С. 845–856.

Матвеева Т.А., Семенов В.А., Астафьева Е.С. Ледовитость арктических морей и ее связь с приземной температурой воздуха в Северном полушарии // Лед и снег. 2020. Т. 60. № 1. С. 134–148.

Мелешко В.П., Мирвис В.М., Говоркова В.А. и др. Потепление климата Арктики и аномально холодная погода зимой в 1979–2017 гг. в Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 15–25.

Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2015–2018 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 1–21.

Мохов И.И. Особенности современных изменений в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 446–462.

Мохов И.И. Аномальные зимы в регионах Северной Евразии в разных фазах явлений Эль-Ниньо // ДАН. 2020. Т. 493. № 2. С. 93–98.

Мохов И.И. Экстремальные атмосферные и гидрологические явления в российских регионах: связь с Тихоокеанской десятилетней осцилляцией// ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 183–188

Мохов И.И. Изменения частот фазовых переходов разных типов явлений Эль-Ниньо в последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 3–9.

Мохов И.И., Бондур В.Г., Ситнов С.А., Воронова О.С. Космический мониторинг природных пожаров и эмиссий в атмосферу продуктов горения на территории России: связь с атмосферными блокированиями // ДАН. 2020. Т. 495. № 2. С. 61–66.

Мохов И.И., Макарова М.Е., Порошенко А.Г. Тропические циклоны и их трансформирование во внетропические: оценки полувековых тенденций изменения // ДАН. 2020. Т. 493. № 1. С. 83–88.

Мохов И.И., Медведев Н.Н. Амплитудно-частотные особенности явлений Эль-Ниньо разного типа и их изменения в последние десятилетия // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика и астрономия. 2022. № 3. С. 51–57.

Мохов И.И., Парфенова М.Р. Особенности изменчивости антарктических и арктических морских льдов в последние десятилетия на фоне глобальных и региональных климатических изменений // Вопросы географии. 2020. Сб. 150. С. 304–319.

Мохов И.И., Парфенова М.Р. Связь протяженности антарктических и арктических морских льдов с температурными изменениями в 1979–2020 гг.// ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 71–77.

Мохов И.И., Парфенова М.Р. Изменения протяженности снежного покрова в Евразии по спутниковым данным в связи с полушарными и региональными температурными изменениями // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 1. С. 63–70.

Мохов И.И., Парфенова М.Р. Связь площади снежного покрова и морских льдов с температурными изменениями в Северном полушарии по данным для последних десятилетий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 4. С. 411–423.

Мохов И.И., Парфенова М.Р. Взаимосвязь площади снежного покрова в Северном полушарии по спутниковым данным с приповерхностной температурой // Метеорология и гидрология. 2022. № 2. С. 32–44.

Мохов И.И., Порошенко А.Г. Действие как интегральная характеристика атмосферных (климатических) структур: оценки для тропических циклонов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 6. С. 619–625.

Мохов И.И., Смирнов Д.А. Эмпирические оценки вклада парниковых газов и естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры для различных широт // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 1. С. 48–54.

Мохов И.И., Смирнов Д.А. Оценки вклада мод естественной изменчивости и парниковых газов в тренды приповерхностной температуры в Южном полушарии на основе данных наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 2. С. 149–159.

Мохов И.И., Чернокульский А.В., Осипов А.М. Центры действия атмосферы Северного и Южного полушарий: особенности и изменчивость // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 5–23.

Мохов И.И., Юшков В.П., Тимажев А.В., Бабанов Б.А. Шквалы с ураганным ветром в Москве // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика и астрономия. 2020. № 6. С. 168–172.

Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений Северного полушария на основе спутниковых измерений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 4. С. 401–413.

Переведенцев Ю.П., Васильев А.А., Шерстюков Б.Г., Шанталинский К.М. Климатические изменения на территории Россиив конце XX–начале XXI века // Метеорология и гидрология. 2021. № 10. С. 14–26.

Полонский А.Б., Серебренников А.Н. Интенсификация восточных пограничных апвеллинговых систем в Атлантическом и Тихом океанах // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 86–95.

Полонский А.Б., Сухонос П.А. О влиянии Североатлантического колебания на тепловой баланс верхнего слоя Северной Атлантики // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 86–95.

Семенов В.А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 21–33.

Семенов В.А., Матвеева Т.А. Изменения арктических морских льдов в первой половине XX века: пространственно-временная реконструкция на основе температурных данных // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 5. С. 611–616.

Семенов С.М., Попов И.О., Ясюкевич В.В. Статистическая модель для оценки формирования климатогенных угроз по данным мониторинга климата // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 59–65.

Сухонос П.А., Дианский Н.А. Связи долгопериодных мод изменчивости температуры и толщины верхнего квазиоднородного слоя Северной Атлантики с индексами климатической изменчивости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 3. С. 347–359.

Чернокульский А.В. и др. Смерчи в российских регионах // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 17–34.

Чилингаров А.Н., Михеев В.Л., Сычев Ю.Ф. К инициативе проведения Пятого международного полярного года // Гидрометеорология и экология. 2022. № 66. С. 104–109.

*AbidaA. etal.*Regional climates // BAMS. 2020. V. 101 (8). P. S321–S420.

Abram N. et al. Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2019. P. 3–35.

Aleshina M.A., Semenov V.A., ChernokulskyA.V. A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16. 105004. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1cba

Allan R.P. et al. Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change // Ann. N.Y. Acad. Sci. 2020. V. 1472 (1). P. 49–75.

Allan R.P. et al. Summary for Policymakers / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 3–32.

Anisimov O., Zimov S. Thawing permafrost and methane emission in Siberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling // Ambio, 2021. V. 50. P. 2050–2059.

Biskaborn B.K. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nat. Comm. 2019. V. 10. P. 264. https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4

Canadell J.G. et al. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 673–816.

Chen J. et al. Sustainability challenges for the social-environmental systems across the Asian drylands belt // Environ // Res. Lett. 2022. V. 17(2). P. 023001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac472f

Chernokulsky A. et al. Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era // Mon. Wea. Rev. 2020. https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0251.1

Douville H. et al. Water cycle changes / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 1055–1210.

Gavrilov A., Seleznev A., Mukhin D. et al. Linear dynamical modes as new variables for data-driven ENSO forecast // Cli. Dyn. 2019. V. 52 (3–4). P. 2199–2216.

Georgiadi A.G., Groisman P.Y. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of two largest arctic rivers of European Russia, Northern Dvina and Pechora. Environ // Res. Lett. 2022. V. (8). P. 085002, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac82c1

Grigorieva V., Gulev S.K. Wave climate in Subarctic seas from voluntary observing ships.Russ. J. Earth Sci.2020, **20** (6), ES6015.

Gruzdev A.N., Bezverkhny V.A. Analysis of solar cycle-like signal in the North Atlantic Oscillation index // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2019. V. 187. P. 53–62.

Gulev S.K. et al. Changing State of the Climate System / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 287–422.

Gushchina D., Kolennikova M., Dewitte B., Yeh S.W. On the relationship between ENSO diversity and the ENSO

atmospheric teleconnection to high-latitudes // Intern. J. Climatol., 2022. V. 42 (2). P. 1303–1325.

Hock R. et al. High Mountain Areas / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. H.-O. Pörtner et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2019. P. 131–202. https://doi.org/10.1017/9781009157964.004

*Izhitskiy A.S. et al.*The world's largest heliothermal lake newly formed in the Aral Sea basin // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16. P. 115009.

Jia G. et al. Land–climate interactions / In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. P.R. Shukla et al. (eds.). 2019. P. 131—247. https://doi.org/10.1017/9781009157988.004

Lappapainen H.K. et al. Overview: Recent advances in the understanding of the Northern Eurasian environments and of the urban air quality in China – A pan-Eurasian experiment (PEEX) programme perspective // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22 (7). P. 4413–4469.

Lupo A.R. et al. Changes in global blocking character during recent decades //Atmosphere. 2019. V. 10 (2). P. 92. https://doi.org/10.3390/atmos10020092

Meredith M. et al. Polar Regions / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. H.-O. Pörtner et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2019. P. 203–320. https://doi.org/10.1017/9781009157964.005

*Mokhov I.I., Smirnov D.A.*Contributions to surface air temperature trends estimated from climate time series: Medium-term causalities // Chaos. 2022. V. 32. P. 063128, https://doi.org/10.1063/5.0088042

*Mokhov I.I., Timazhev A.V.*Seasonal hydrometeorological extremes in the Northern Eurasian regions depending on ENSO phase transitions // Atmosphere. 2022. V. 13 (2). P. 249, https://doi.org/10.3390/atmos13020249

Overland J., Wang M., Dunlea E. et al. The urgency of Arctic change. Polar Sci., 2019, 21, 6–13. Polonsky A.B. The ocean's role in climate change. Cambridge Scholars Publ., Newcastle upon Tyne. 2019. 276 pp.

Polonsky A.B. The IOD-ENSO interaction: The role of the Indian Oceancurrent's system // Atmosphere. 2021. V. 12 (12). P. 1662. https://doi.org/10.3390/atmos12121662

Serykh I.V., Sonechkin D.M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin // Theor. Appl. Climatol. 2019. V. 137. P. 2639–2656.

Slyunyaev N.N., Ilin N.V., Mareev E.A., Price C.G. The global electric circuit land-ocean response to the El Nino – Southern Oscillation // Atmos. Res. 2021. V. 260. P. 105626.

Slyunyaev N.N., Ilin N.V., Mareev E.A., Price C.G. A new link between El Nino – Southern Oscillation and atmospheric electricity // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16 (4). P. 044025.

Smith P. et al. Interlinkages between desertification, land degradation, food security and greenhouse gas fluxes: Synergies, trade-offs and integrated response options. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems P.R. Shukla et al. (eds.). 2019. P. 551–672. https://doi.org/10.1017/9781009157988.008

Sonechkin D.M., Vakulenko N.V., Volodin E.M. Sun-induced synchronizations of the interannual to interdecadal hemispheric mean (land and sea) temperature variations // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2020. 105450.

Steidinger B.S. et al. Climatic controls of decomposition drive the global biogeography of forest-tree symbioses // Nature. 2019. V. 569 (7756). P. 404–408.

Surkova G., Krylov A. Extremely strong winds and weather patterns over arctic seas // Geogr, Environ., Sustain. 2019.V. 12 (3). P. 34–42.

Vanderkelen I. et al. Global heat uptake by inland waters // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47 (12), e2020GL087867. https://doi.org/10.1029/2020GL087867

Zherebtsov G.A., Kovalenko V.A., Molodykh S.I., Kirichenko K.E. Solar variability manifestations in weather and climate characteristics // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2019. V. 182. P. 217–222.

Zveryaev I.I., Arkhipkin A.V. Leading modes of interannual soil moisture variability in European Russia and their relation to regional climate during the summer season // Cli. Dyn. 2019. V. 53. P. 3007–3022.

Дополнительный список литературы к разделу 3.

Акперов М.Г. и др. Особенности температурной стратификации и ее изменений в тропосфере арктических широт по данным реанализа и модельным расчетам // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 19–27.

Багатинский В.А., Дианский Н.А. Вклады климатических изменений температуры и солености в формирование трендов термохалинной циркуляции Северной Атлантики // Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2022. № 3. С. 73–88.

Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Ракушина Е.В. и др. Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и параметров стратосферного полярного вихря в Арктике по данным моделирования и реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 5. С. 526–539.

Выручалкина Т.Ю., Дианский Н.А., Фомин В.В. Эволюция уровня Каспийского моря под влиянием климатических изменений поля ветра // Труды ГОИН. 2019. № 220. С. 135–147.

Галин В.Я., Дымников В.П. Динамико-стохастическая параметризация облачности в модели общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 3–8.

Гинзбург А.С., Демченко П.Ф. Антропогенные мезо-метеорологические обратные связи: обзор современных исследований // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 94–113.

Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В. Прогностические оценки климатических изменений в Арктике на основе комбинированного сценария // Российская Арктика. 2019. № 4. С. 24–33.

Елисеев А.В. и др. Связь частоты молний со статистическими характеристиками конвективной активности в атмосфере // Доклады АН. 2019. Т. 485. № 1. С. 76–82.

Кислов А.В., Морозова П.А. Вариации уровня Каспийского моря в различных климатических условиях по данным моделирования в рамках проекта CMIP6 // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 6. С. 622–632.

Клименко В.В., Клименко М.В., Бессараб Ф.С. и др. Глобальная модель EAGLE как инструмент исследования влияния атмосферы на электрическое поле в приэкваториальной ионосфере // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 7. С. 86–92.

Корнева И.А., Рыбак О.О., Володин Е.М. Использование энерговлагобалансовой модели для включения криосферного компонента в климатическую модель. Часть III. моделирование баланса массы на поверхности антарктического ледникового щита // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 5–18.

Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А. и др. Численные глобальные модели ионосферы, озоносферы, температурного режима и циркуляции для высот 0–130 км. Результаты и перспективы // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 59–69.

Ларин И.К. О влиянии глобального потепления на озоновый слой и УФ-В излучение // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 120–125.

Молодых С.И., Жеребцов Г.А., Караханян А.А. Оценка влияния солнечной активности на уходящий поток инфракрасного излучения // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 2. С. 208–215.

Морозова П.А., Ушаков К.В., Семенов В.А., Володин Е.М. Водный баланс Каспийского моря в эпоху последнего ледникового максимума по данным экспериментов с математическими моделями // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 6. С. 601–608.

Мохов И.И. Особенности современных изменений в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 446–462.

Мохов И.И. Геофизическая термодинамика: особенности температурной стратификации атмосферы в годовом ходе // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика и астрономия. 2022. № 3. С. 58–63.

Мохов И.И., Малахова В.В., Аржанов М.М. Модельные оценки внутри- и межвековой деградации “вечной мерзлоты” в регионе полуострова Ямал при потеплении // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 219–226.

Мохов И.И., Погарский Ф.А. Изменения режимов морского волнения в арктическом бассейне по ансамблевым модельным расчетам для 21 века // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 2. С. 189–193.

Мохов И.И., Тимажев А.В. Вертикальная температурная стратификация атмосферы в зависимости от продолжительности годового цикла инсоляции по расчетам с климатической моделью общей циркуляции // ДАН. 2020. Т. 494. № 2. С. 48–52.

Осипов А.М., Гущина Д.Ю. Механизм формирования двух типов Эль-Ниньо в современном климате // Вестник Московского университета. Сер. 5: Геогр. 2021. № 1. С. 128–135.

Пастухова А.С., Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю. и др. Численное моделирование изменения содержания озона, эритемной радиации и УФ ресурсов над территорией Северной Евразии в XXI веке // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 20–28.

Рубинштейн К.Г., Зароченцев Г.А., Игнатов Р.Ю. и др. Региональная модель динамики атмосферы для системы численного моделирования климата Арктики // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 3 (373). С. 60–72.

Солдатенко С.А., Юсупов Р.М. Оценка влияния тепловой инерции и обратных связей в системе “атмосфера–океан” на изменчивость глобальной приповерхностной температуры воздуха // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 114–126.

Степаненко В.М., Репина И.А., Федосов В.Э. и др. Обзор методов параметризации теплообмена в моховом покрове для моделей земной системы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 127–138.

Сухонос П.А., Дианский Н.А. Связи долгопериодных мод изменчивости температуры и толщины верхнего квазиоднородного слоя Северной Атлантики с индексами климатической изменчивости //Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 3. С. 347–359.

Фадеев Р.Ю., Толстых М.А., Володин Е.М. Климатическая версия модели атмосферы ПЛАВ: разработка и первые результаты // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 22–35.

Фролов А.В. Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний уровня Каспия в палеовремени (14–4 тыс. лет до н.э.) // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 6. С. 633–642.

Фролов И.Е., Кулаков М.Ю., Фильчук К.В. Баланс льда в Северном Ледовитом океане в 1979–2019 гг. (по данным моделирования) // Лед и снег. 2022. Т. 62. № 1. С. 113–124.

Чилингаров А.Н., Михеев В.Л., Сычев Ю.Ф. К инициативе проведения Пятого международного полярного года // Гидрометеорология и экология. 2022. № 66. С. 104–109.

Шестакова А.А., Володин Е.М. Воспроизведение вертикальной структуры тропосферы климатической моделью ИВМРАН // Метеорологияигидрология. 2019. № 2. С. 28–40.

Abram N. et al. Summary for Policymakers / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2019. P. 3–35.

Akperov M. et al. Impact of Atlantic water inflow on winter cyclone activity in the Barents Sea: insights from coupled regional climate model simulations // Environ. Res. Lett. 2020. V. 15. P. 024009.

Allan R.P. et al. Summary for Policymakers / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 3–32.

Anisimov O., Zimov S. Thawing permafrost and methane emission in Siberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling // Ambio. 2021. V. 50. P. 2050–2059.

Brierley C.M. et al. Large-scale features and evaluation of the PMIP4-CMIP6 midHolocene simulations // Clim. Past. 2020. V. 16 (5). P. 1847–1872.

Brodowsky C. et al. Modeling the sulfate aerosol evolution after recent moderate volcanic activity, 2008–2012 // J. Geophys. Res.: Atmos. 2021. V. 126. e2021JD035472. https://doi.org/10.1029/2021JD035472

Canadell J.G. et al. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working

Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 673–816.

Douville H. et al. Water cycle changes / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 1055–1210.

Golubenko K., Usoskin I., Mironova I., Karagodin A., Rozanov E. Natural sources of ionization and their impact on atmospheric electricity // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47 (12). e2020GL088619.

Grant L. et al. Attribution of global lake systems change to anthropogenic forcing // Nature Geosci. 2021. V. 14 (11). P. 849–854.

Gulev S.K. et al. Changing State of the Climate System / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 287–422.

Hock R. et al. High Mountain Areas / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2019. P. 131–202.

Ilin N.V., Slyunyaev N.N., Mareev E.A. Toward a realistic representation of global electric circuit generators in models of atmospheric dynamics // J. Geophys. Res.: Atmos. 2020. V. 125 (6), e2019JD032130.

Jia G. et al. Land–climate interactions / In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. *P.R. Shukla* (eds.). 2019. P. 131–247.

Kageyama M. et al. A multi-model CMIP6-PMIP4 study of Arctic sea ice at 127 ka: Sea ice data compilation and model differences // Clim. Past. 2021. V. 17 (1). P. 37–62.

Kageyama M. et al. The PMIP4 Last Glacial Maximum experiments: Preliminary results and comparison with the PMIP3 simulations // Clim. Past. 2021. V. 17 (3). P. 1065–1089.

Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T. Iodine chemistry in the chemistry-climate model SOCOL-AERV2-I // Geosci. Mod. Dev. 2021. V. 14 (10). P. 6623–6645.

Kulyamin D.V., Ostanin P.A. Modelling of equatorial ionosphericanomaly in INM RAS coupled thermosphere–ionosphere model // Russ. J. Numer. An. Math. Modell. 2020. V. 35 (1). P. 1–9.

Loskutov E., Vdovin V., Klinshov V. et al. Applying interval stability concept to empirical model of Middle Pleistocene transition // Chaos. 2022. V. 32 (2). P. 021103.

Lunt D.J., Bragg F., Steinig S. et al. DEEPMIP: Model intercomparison of Early Eocene Climatic Optimum (EECO) large-scale climate features and comparison with proxy data // Clim. Past. 2021. V. 17 (1). P. 203–227.

MacDougall A.H., Frölicher T.L., Jones C.D. et al. Is there warming in the pipeline? A multi-model analysis of the zeroemission commitment from CO_2 // Biogeosci. 2020. V. 17. P. 2987–3016.

Meredith M. et al. Polar Regions / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2019. P. 203–320.

Otto-Bliesner B.L. et al. Large-scale features of Last Interglacial climate: Results from evaluating the lig127k simulations for the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6)-Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP4) // Cli. Past. 2021. V. 17 (1). P. 63–94.

Smith P. et al. Interlinkages between desertification, land degradation, food security and greenhouse gas fluxes: Synergies, trade-offs and integrated response options / In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. *P.R. Shukla* (eds.). 2019. P. 551–672.

Smyshlyaev S., Galin V., Blakitnaya P., Jakovlev A. Numerical modelling of the natural and manmade factors influencing past and current changes in polar, mid-latitude and tropical ozone // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 76.

Sonechkin D.M., Vakulenko N.V., Volodin E.M. Sun-induced synchronizations of the interannual to interdecadal hemispheric mean (land and sea) temperature variations // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2020, 105450.

Sukhodolov T. et al. Atmosphere–ocean–aerosol–chemistry–climate model SOCOLv4.0: description and evaluation // Geosci. Model Dev. 2021. V. 14. P. 5525–5560.

Vanderkelen I. et al. Global heat uptake by inland waters // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47 (12), e2020GL087867. https://doi.org/10.1029/2020GL087867

Xu L.Y. et al. The effect of super volcanic eruptions on ozone depletion in a chemistry–climate model // Adv. Atmos. Sci. 2019. V. 36. P. 823–836.

Дополнительный список литературы к разделу 4.

Володин Е.М. Вероятные изменения климата в XXI веке на территории России по данным модели климата INM-CV5-0 // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 5–13.

Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В. Прогностические оценки климатических изменений в Арктике на основе комбинированного сценария // Российская Арктика. 2019. № 4. С. 24–33.

Елисеев А.В., Васильева А.В. Природные пожары: данные наблюдений и моделирование // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Т. 3. С. 73–119.

Мартынова Ю.В., Варгин П.Н., Володин Е.М. Изменение шторм–треков Северного полушария в зимний период в условиях будущего климата по расчетам климатической модели ИВМ РАН CM5 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 250–262.

Мирвис В.М., Мелешко В.П., Говоркова В.А., Байдин А.В. Аномальные режимы погоды зимой и летом на территории России в XXI веке по данным модельных расчетов CMIP6 // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 14–23.

Мохов И.И. Особенности современных изменений в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 446–462.

Мохов И.И., Малахова В.В., Аржанов М.М. Модельные оценки внутри- и межвековой деградации "вечной мерзлоты" в регионе полуострова Ямал при потеп-

лении // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 219–226.

Мохов И.И., Осипов А.М., Чернокульский А.В. Центры действия атмосферы в Северном полушарии: современные особенности и ожидаемые изменения в 21 веке по расчетам с ансамблями климатических моделей CMIP5 и CMIP6 // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 2. С. 174–182.

Мохов И.И., Погарский Ф.А. Изменения режимов морского волнения в арктическом бассейне по ансамблевым модельным расчетам для 21 века // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 2. С. 189–193.

Пикалева А.А., Школьник И.М., Стернзат А.В., Егоров Б.Н., Надежина Е.Д. Сценарный ансамблевый прогноз изменений дефицита влаги в аридных регионах в середине XXI века // Метеорология и гидрология. 2020. № 12. С. 52–60.

Хлебникова Е.И., Рудакова Ю.Л., Салль И.А. и др. Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI в.: ансамблевые оценки для территории России // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 11–23.

Хлебникова Е.И., Рудакова Ю.Л., Школьник И.М. Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 5–16.

Школьник И.М., Надежина Е.Д., Стернзат А.В., Пикалева А.А., Егоров Б.Н. Моделирование эволюции засушливых условий в XXI веке для обоснования мер адаптации агросектора России к климатическим воздействиям // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 107–122.

Abram N. et al. Summary for Policymakers / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2019. P. 3–35.

Akperov M. et al. Future projections of cyclone activity in the Arctic for the 21st century from regional climate models (Arctic-CORDEX) // . V. 182. P. 103005.

Akperov M., Zhang W., Miller P.A. et al. Responses of Arctic cyclones to biogeophysical feedbacks under future warming scenarios in a regional Earth system model // Enveron. Res. Lett. 2021. V. 16. P. 064076. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0566

Alexandrov G.A., Ginzburg V.A., Romanovskaya A.A., Insarov G.E. CMIP6 model projections leave no room for permafrost to persist in Western Siberia under the SSP5-8.5 scenario // Cli. Change. 2021. V. 169 (3–4), https://doi.org/10.1007/s10584-021-03292-w

Allan R.P. et al. Summary for Policymakers / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 3–32. https://doi.org/10.1017/9781009157896.001

Brown J.R. et al. Comparison of past and future simulations of ENSO in CMIP5/PMIP3 and CMIP6/PMIP4 models // Clim. Past. 2020. V. 16 (5). P. 1777–1805.

Canadell J.G. et al. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 673–816.

Caretta M.A. et al. Water / In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2022. P. 551–712.

Douville H. et al. Water cycle changes. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 1055–1210.

Golub M. et al. A framework for ensemble modelling of climate change impacts on lakes worldwide: the ISIMIP Lake Sector // Geosci. Model Dev. 2022. V. 15. P. 4597–4623.

Grant L. et al. Attribution of global lake systems change to anthropogenic forcing // Nature Geosci. 2021. V. 14 (11). P. 849–854.

Gulev S.K. et al. Changing State of the Climate System / In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 287–422.

Hock R. et al. High Mountain Areas / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2019. P. 131–202.

Jia G. et al. Land–climate interactions. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. *P.R. Shukla* (eds.). 2019. P. 131–247.

Meredith M. et al. Polar Regions / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2019. P. 203–320.

Pavlova V., Shkolnik I., Pikaleva A. et al. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. P. 034010. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf8be

Santolaria-Otin M., Zolina O. Evaluation of snow cover and snow water equivalent in the continental Arctic in CMIP5 models. Cli. Dyn., 2020, 55. 2993–3016.

Smith P. et al. Interlinkages between desertification, land degradation, food security and greenhouse gas fluxes: Synergies, trade-offs and integrated response options / In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems P.R. Shukla et al. J (eds.). 2019. P. 551–672.

Smyshlyaev S., Galin V., Blakitnaya P., Jakovlev A. Numerical modelling of the natural andmanmade factors influencing past and current changes in polar, mid-latitude and tropical ozone // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 76.

Tebaldi C. et al. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP)

of CMIP6 // Earth System Dyn. 2021. V. 12 (1). P. 253–293.

Дополнительный список литературы к разделу 5.

Гинзбург А.С., Александров Г.А., Чернокульский А.В. Климатические критерии необходимости превентивной адаптации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 6. С. 626–637.

Гинзбург В.А., Кострыкин С.В., Рябошапко А.Г. и др. Условия стабилизации средней глобальной приповерхностной температуры на уровнях +2 и +1.5°С при использовании геоинженерного метода на основе стратосферных аэрозолей // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 66–76.

Гурлев И.В., Макоско А.А., Малыгин И.Г. Анализ состояния и развития транспортной системы Северного морского пути // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 2. С. 258–270.

Данилов–Данильян В.И., Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Проблема климатических изменений – поле сближения и взаимодействия естественных и социогуманитарных наук // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 10. С. 914–925.

Иванов А.Л. и др. Землепользование России в условиях изменения глобального климата и беспрецедентных социально-экономических вызовов: состояние почвенного (зонального) покрова, тенденции изменения, деградация, методология учета, прогнозы. М.: "Издательство МБА". 2022. 100 с.

Инсаров Г.Э., Менндес К.Л., Семенов С.М., Янда П.З. Концепция риска и визуализация его изменений в докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Т. 2. С. 6–34.

Катцов В.М., Школьник И.М., Павлова В.Н. и др. Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Ч. 2: Оценки климатических воздействий // Труды ГГО. 2019. № 593. С. 6–52.

Кислов А.В., Суркова Г.В. Влияние глобального потепления на климатические ресурсы России // Экономика. Налоги. Право. 2021. Т. 14. № 4. С. 6–14.

Клименко В.В., Гинзбург А.С., Федотова Е.В., Терешин А.Г. Волны тепла – новая опасность для энергосистемы России // ДАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 494. № 1. С. 82–88.

Клименко В.В., Клименко А.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Энергетика, демография, климат – есть ли альтернатива отказу от ископаемого органического топлива? // ДАН. Физика, технические науки. 2022. Т. 506. № 2. С. 66–72.

Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. От Рио до Парижа через Киото: как усилия по охране глобального климата влияют на развитие мировой энергетики // Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 5–15.

Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Федотова Е.В. Климатические экстремумы – новый вызов для российских энергосистем // Теплоэнергетика. 2021. № 3. С. 3–17.

Клименко В.В., Федотова Е.В. Гидроэнергетика России в условиях глобальных изменений климата // ДАН. 2019. Т. 484. № 2. С. 156–160.

Клюева М.В., Школьник И.М., Рудакова Ю.Л., Павлова Т.В., Катцов В.М. Летний туризм в контексте будущих изменений климата России: оценки по большому ансамблю условных прогнозов высокого разрешения // Метеорология и гидрология. 2020. № 6. С. 47–59.

Ларин И.К. О влиянии глобального потепления на озоновый слой и УФ-В излучение // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 120–125.

Липка О.Н., Романовская А.А., Семенов С.М. Прикладные аспекты адаптации к изменениям климата в России //Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Т. 1. С. 65–90.

Макоско А.А. и др. Транспортный комплекс России / В: Стратегическое планирование устойчивого функционирования экономического комплекса Российской Федерации. Под. Ред. В.Г. Бондура, А.А. Макоско, Б.М. Наконечного. М.: РАН. 2021. С. 77–124.

Макоско А.А., Матешева А.В. Оценка тенденций дальнего загрязнения атмосферы арктической зоны России в 1980–2050 гг. с учетом сценариев изменения климата // Арктика: экология и экономика. 2020. № 1 (37). С. 45–52.

Макоско А.А., Матешева А.В. К оценке экологических рисков от загрязнения атмосферы арктической зоны в условиях изменяющегося климата в XXI в. // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 1. С. 34–45.

Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Окунев С.Н., Остарков Н.А., Осокин А.Б., Федоров Р.Ю. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов// Криосфера Земли. 2021. Т. 25. № 6. С. 3–15.

Мохов И.И. Особенности современных изменений в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 446–462.

Оганесян В.В., Стерин А.М. Расчет потенциального финансового ущерба от опасных и неблагоприятных метеорологических явлений на территории Российской Федерации в 1987–2017 гг. // Метеорология и гидрология. 2019. № 12. С. 97–108.

Пастухова А.С., Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю., Галин В.Я., Смышляев С.П. Численное моделирование изменения содержания озона, эритемной радиации и УФ ресурсов над территорией Северной Евразии в XXI веке // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 20–28.

Павлова В.Н., Богданович А.Ю., Семенов С.М. Об оценке благоприятности климата для культивирования зерновых исходя из частоты сильных засух // Метеорология и гидрология. 2020. № 12. С. 95–101.

Пекарникова М.Е., Полонский А.Б. Анализ реалистичности достижения основной цели Парижского соглашения при существующей системе правового регулирования и контроля за антропогенными выбросами парниковых газов// Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8. № 2. С. 190–208.

Порфирьев Б.Н. Экономическое измерение климатического вызова устойчивому развитию России // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 4. С. 400–407.

Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для

устойчивости дорожной инфраструктуры в российской Арктике // Вестник РАН. 2019. Т. 89. № 12. С. 1228–1239.

Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты для жилищного сектора российской Арктики // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 2. С. 105–114.

Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации многолетней мерзлоты для объектов системы здравоохранения российской Арктики // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 12. С. 1125–1136.

Порфирьев Б.Н. Парадигма низкоуглеродного развития и стратегия снижения рисков климатических изменений для экономики // Проблемы прогнозирования. 2019. № 2 (173). С. 3–13.

Порфирьев Б.Н. Эффективная стратегия действий в отношении изменений климата и их последствий для экономики России // Проблемы прогнозирования. 2019. № 3 (174). С. 3–16.

Порфирьев Б.Н. Декарбонизация versus адаптация экономики к климатическим изменениям в стратегии устойчивого развития // Проблемы прогнозирования. 2022. № 4 (193). С. 45–54.

Порфирьев Б.Н., Широв А.А., Колпаков А.Ю., Единак Е.А. Возможности и риски политики климатического регулирования в России //Вопросы экономики. 2022. № 1. С. 72–89.

Пустовалов К.Н., Харюткина Е.В., Корольков В.А., Нагорский П.М. Изменчивость ресурсов солнечной и ветровой энергии в российском секторе Арктики // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 11. С. 908–914.

Фалеев М.И., Цыбиков Н.А., Сидорович Т.И. Глобальные климатические изменения –фактор активизации природных и антропогенных вызовов населению и окружающей среде // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 2 (72). С. 4–10.

Школьник И.М., Пигольцина Г.Б., Ефимов С.В. Влияние глобального потепления на сельское хозяйство в засушливых регионах Евразии: ансамблевый прогноз на базе региональной климатической модели на середину XXI века // Метеорология и гидрология. 2019. № 8. С. 57–68.

Эдельгериев Р.С-Х. и др. Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство). Национальный доклад. Т. 3. М.: ИздательствоМБА. 2021. 700 с.

AbramN. et al. Summary for Policymakers / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2019. P. 3–35.

Adler C. et al. Mountains / In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *H.-O. Portner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2022. P. 2273–2318.

Aleksandrovkii A., Klimenko V., Fedotova E. et al. Estimation of hydropower plants energy characteristics change under the influence of climate factors // Adv. Engineer. Res. 2020. V. 191. P. 7–13.

Allan R.P. et al. Summary for Policymakers / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 3–32.

Babiker M. et al. Cross-sectoral perspectives / In: IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. P.R. Shukla et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2022. P. 1245–1354.

Bashmakov I.A. et al. Industry / In: IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. P.R. Shukla et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2022. P. 1161–1244.

Bednar-Friedl B. et al. Europe / In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *H.-O. Portner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2022. P. 1817–1927.

Cabeza L.F. et al. Buildings / In: IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. P.R. Shukla et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2022. P. 953–1048.

Callaghan T.V. et al. Improving dialogue among researchers? Local and indigenous peoples and decision-makers to address issues of climate change in the north // Ambio. 2020. V. 49 (6). P. 1161–1178.

Canadell J.G. et al. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 673–816.

Caretta M.A. et al. Water / In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2022. P. 551–712.

Dhakal S. et al. Emissions trends and drivers supplementary material / In: IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. P.R. Shukla et al. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge / New York, NY. 2020. P. 215–294.

Douville H. et al. Water cycle changes / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 1055–1210.

Gulev S.K. et al. Changing State of the Climate System / In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assess-

ment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte V. et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2021. P. 287–422.

Hock R. et al. High Mountain Area / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2019. P. 131–202.

Jia G. et al. Land–climate interactions / In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. *P.R. Shukla* (eds.). 2019. P. 131–247.

Kostianaia E.A., Kostianoy A.G. Regional climate change impact on coastal tourism: A case study for the Black Sea coast of Russia // Hydrol., 2021, 8 (3), 133. https://doi.org/10.3390/hydrology8030133

Meredith M. et al. Polar Regions / In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2019. P. 203–320.

Pathak M. et al. Technical Summary. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *P.R. Shukla* (eds.). Cambridge Univ.Press, Cambridge / New York, NY. 2022. https://doi.org/10.1017/9781009157926.002

Pavlova V., Karachenkova A., Shkolnik I. et al. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14 (3). P. 034010.

Romanovskaya A.A., Federici S. How much greenhouse gas can each global inhabitant emit while attaining the Paris Agreement temperature limit goal? The equity dilemma in sharing the global climate budget to 2100 // Carb. Manag. 2019. V. 10 (4). P. 361–377.

Shaw R. et al. Asia / In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *H.-O. Pörtner* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2022. P. 1457–1579.

Skea J. et al. Summary for Policymakers / In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *P.R. Shukla* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge / New York, NY. 2022. https://doi.org/10.1017/9781009157926.001

Smith P. et al. Interlinkages between desertification, land degradation, food security and greenhouse gas fluxes: Synergies, trade-offs and integrated response options / In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, *P.R. Shukla* (eds.). 2019. P. 551–672.

Smyshlyaev S., Galin V., Blakitnaya P., Jakovlev A. Numerical modelling of the natural and manmade factors influencing past and current changes in polar, mid-latitude and tropical ozone // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 76.

Soldatenko S.A., Bogomolov A., Ronzhin A. Mathematical modelling of climate change and variability in the context of outdoor ergonomics // Matematics // 2021. V. 9 (22). P. 2920.

Soldatenko S.A., Yusupov R.M. Optimal control for the process of using artificial sulfate aerosols for mitigating global warming // Atmos. Oceanic Optics. 2019. V. 32 (1). P. 55–63.

Soldatenko S.A., Yusupov R.M. Optimal control perspective on weather and climate modification // Matematics. 2021. V. 9 (4). P. 1–16.

Steidinger B.S. et al. Climatic controls of decomposition drive the global biogeography of forest-tree symbioses // Nature. 2019. V. 569 (7756). P. 404–408.

Streletsky D.A., Suter L.J., Shiklomanov N.I. et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14 (2). P. 025003.

Russian Climate Research in 2019–2022

I. I. Mokhov[1, 2, *]

[1]*Obukhov Institute of Atmospheric Physcs, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per., 3, Moscow, 119017 Russia*
[2]*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119992 Russia*
**e-mail: mokhov@ifaran.ru*

The results of Russian studies of climate and its changes (published in 2019–2022) are presented based on a review prepared for the National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences for the XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Berlin, Germany, July 11–20, 2023).

Keywords: global and regional climate changes, modeling, natural and anthropogenic factors, adaptation, regulation

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2023, том 59, № 7, с. 852–881

УДК 551.513:519.6

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. И. А. Репина[a, b, *]

[a]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., д. 3, Москва, 119017 Россия

[b]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 4, Москва, 119234 Россия

*e-mail: repina@ifaran.ru

Поступила в редакцию 03.09.2023 г.
После доработки 09.11.2023 г.
Принята к публикации 15.11.2023 г.

Обзор содержит наиболее значимые результаты работ российских ученых в области динамической метеорологии, выполненных в 2019–2022 гг. Он является частью Национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам, подготовленного для Международной ассоциации метеорологии и атмосферных наук (IAMAS). К обзору прилагается список основных публикаций российских ученых по динамической метеорологии за 2019–2022 гг.

Ключевые слова: динамическая метеорология, динамика атмосферы, мезомасштабные процессы, турбулентность, прогноз погоды, тропосфера, средняя и верхняя атмосфера, климат, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S0002351523070118, **EDN:** NYBZJC

ВВЕДЕНИЕ

Динамическая метеорология традиционно является одним из наиболее развивающихся направлений в области наук о земле. Развитие методов прогноза погоды и климата, математических моделей Земной системы, численного моделирования гидродинамических процессов требует развития как теоретических, так и экспериментальных методов исследования динамики атмосферы.

Работы российских ученых, выполненные в области динамической метеорологии в 2019–2022 гг. и обсуждаемые в данном обзоре, можно условно разбить по следующим часто пересекающимся между собой темам: “Общая динамика атмосферы”, “Крупномасштабные процессы и прогноз погоды”, “Мезомасштабные процессы”, “Мелкомасштабные движения и турбулентность в пограничном слое атмосферы”, “Динамическое взаимодействие нижних, средних и верхних слоев атмосферы”, “Численное моделирование климата”. Структура обзора следует, в основном, предшествующему обзору 2015–2018 гг. [Курганский, Крупчатников, 2019].

Внимание к проблемам динамической метеорологии подтверждается проведение специализированных конференций. Основной площадкой для обсуждения вопросов, связанных с ролью разномасштабных процессов в динамике атмосферы и океана является всероссийская конференция с международным участием “Турбулентность, атмосфера и динамика климата”, посвященная памяти академика А.М. Обухова. За представленный период она проходила дважды – в ноябре 2020 и 2022 гг. На конференции обсуждались ключевые вопросы, связанные с одним из наиболее актуальных направлений в науках о Земле, а именно исследованиями в области физики атмосферы, климата и окружающей среды. Отдельные доклады конференции были опубликованы в сборнике [Turbulence, Atmospheric and Climate Dynamics, 2022]. Среди российских конференций, посвященных динамике атмосферы, также стоит отметить ежегодные конференции ENVIROMIS (CITES) и Международный симпозиум “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы”. Симпозиум “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы” проводится ежегодно в Москве или Томске по следующим направлениям: молекулярная спектроскопия и атмосферно-радиационные процессы, распространение оптического излучения в атмосфере и океане, оптические исследования атмосферы и океана, физика тропосферы, физика средней и верхней атмосферы [Romanovski, Kharchenko, 2022]. Междисциплинарная конференция ENVIROMIS (четные годы в Томске, нечетные годы (CITES) в Москве), включающая и Школу молодых ученых, посвящена использованию современных методов наблюдения и вычислительных и информационных

технологий для оценки состояния и прогноза изменений окружающей среды Северной Евразии под воздействием природных и антропогенных факторов, в том числе вызванных глобальным изменением климата. Также решается крайне важная проблема – содействие росту профессионального мастерства молодых ученых [Gordov et al., 2020].

1. ОБЩАЯ ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ

За отчетный период было опубликовано несколько монографий, посвященных динамике атмосферы.

В книге Г.С. Голицына [Голицын, 2021] на основе теории Колмогорова рассмотрены землетрясения с их параметром подобия, спектры морского ветрового волнения, энергетический спектр космических лучей; объяснены природа рельефов поверхностей небесных тел (правило Каулы), природа ураганов и сходных вихрей с оценкой их мощностей, законы затопления осадками земной поверхности; дан вывод основных законов конвекции, в том числе во вращающейся жидкости. Эти закономерности десятки лет оставались эмпирическими, но использование законов теории вероятностей возводит их в ранг законов природы. Подобные методы могут быть использованы и в других областях знаний.

Основное внимание в книге [Polonsky, 2019] уделяется физическим процессам в Мировом океане, которые регулируют межгодовую и декадную естественную изменчивость климатической системы, а также ключевым проявлениям этой изменчивости в динамике атмосферы и океана. Оценена роль океана в недавнем перерыве глобального потепления и вероятность резкого изменения климата из-за термохалинной катастрофы. Особое внимание в книге уделено изменению параметров синоптических атмосферных возмущений над Северным полушарием и его субрегионами в разные фазы естественных квазипериодических климатических сигналов.

В книге [Климат Арктики..., 2022] представлены результаты исследований климата Арктики, выполненные в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН в сотрудничестве с другими научными институтами. В первой части приведены результаты анализа эмпирических данных для различных составляющих климатической системы Арктики: атмосферы, морских льдов, океана и суши с оценкой современных тенденций изменения. Во второй части рассмотрены характерные процессы и обратные связи в арктической климатической системе, важные для формирования долгопериодных аномалий климата в Арктике, а также механизмы влияния изменений климата в Арктике на циркуляцию атмосферы в средних широтах Северного полушария. В третьей части приведены оценки возможных будущих изменений климата в Арктике по результатам численных расчетов с моделями климата при сценариях антропогенного воздействия, а также влияния этих изменений на продолжительность морской навигации вдоль Северного морского пути, морское волнение, характеристики многолетнемерзлых грунтов и распад придонных метангидратов.

Книга [Исследование природной среды..., 2021] посвящена исследованиям природной среды острова Большевик архипелага Северная Земля и прилегающих акваторий пролива Шокальского, возобновленных в 2013 г. на научно-исследовательской станции “Ледовая база Мыс Баранов” Арктического и антарктического НИИ Росгидромета. Представлены результаты изучения химического состава осадков, данные океанографических наблюдений в проливе Шокальского, результаты исследований морфологических и физико-механических свойств припая, включая описание технологии наблюдения за характеристиками ледяного покрова. Представлены результаты гидрологических, гляциологических и палеогеографических исследований на прилегающей к станции территории острова Большевик. Книга призвана показать состояние природной среды этого высокоширотного региона в условиях быстро меняющегося климата Арктики.

В книге [The Republic of Adygea Environment, ed. Bedanokov, Lebedev, Kostianoy, 2022] изложено современное состояние окружающей среды и особенности атмосферной динамики Республики Адыгея в России. В книге дана оценка экологических условий, экологического состояния, изменения климата и растительности, антропогенной нагрузки на почву, воду и атмосферу, а также освещен потенциал водных ресурсов, возобновляемых источников энергии и развития туризма, сельского хозяйства и промышленности в этом регионе.

Динамика атмосферы полярных регионов традиционно привлекает внимание исследователей.

На основе среднемесячных данных реанализа ERA-Interim (1979–2014 гг.) получены оценки вертикального градиента температуры в тропосфере высоких широт Северного полушария и анализ его связи с приповерхностной температурой для разных сезонов [Акперов и др., 2019а]. Проведен анализ способности региональной климатической модели HIRHAM5 воспроизводить особенности распределения вертикального градиента температуры в тропосфере в арктических широтах и параметра чувствительности к изменению приповерхностной температуры. Отмечены региональные особенности связи вертикальной стратификации температуры в тропосфере с индексом арктического колебания. Полученные по данным реанализа и модельным расчетам оценки имеют особую значимость в связи с более высокой изменчивостью и чувствительностью клима-

та арктических широт при глобальных изменениях, что характеризуется так называемым арктическим усилением.

Статическая устойчивость атмосферы является важным индикатором пространственной и временной изменчивости полярных мезоциклонов в Арктическом регионе. Для анализа были использованы результаты ансамблевого моделирования региональных климатических моделей (RCM) HIRHAM/NAOSIM за период с 1979 по 2016 гг. [Akperov et al., 2019]. Был проведен анализ 10 ансамблевых моделей с идентичными граничными условиями и одинаковым радиационным воздействием для Арктики.

В работе по данным климатического моделирования [Акперов и др., 2019б] установлено, что существует сильная связь между изменениями состояния океанических вод и притоком океанского тепла, концентрацией морского льда и температурой приземного воздуха в Баренцевом море. При этом увеличение притока океанических вод в Баренцево море зимой приводит к снижению статической устойчивости, что способствует изменению региональной циклонической активности. Снижение статической устойчивости наиболее выражено в южной части Баренцева моря, а также к западу от Шпицбергена.

Проведен глобальный анализ географических особенностей вертикальных профилей удельной влажности воздуха и концентраций диоксида серы и сульфатных аэрозолей по данным реанализа CAMS, а также высоты планетарного пограничного слоя (ППС) по данным реанализа ERA5 для 2003–2020 гг [Елисеев и др., 2022]. Максимумы высоты верхней границы ППС отмечены в регионах преобладающей циклонической циркуляции – в шторм-треках и в регионах муссонной циркуляции летом. Для вертикального масштаба профиля удельной влажности выявлены минимумы в регионах субтропических круговоротов с преобладающим крупномасштабным опусканием воздушных масс. Вертикальный масштаб профиля концентрации SO_2 характеризуется пространственными минимумами, связанными с окислением диоксида серы. Выявлены статистически значимая отрицательная корреляция между толщиной ППС и вертикальным масштабом профиля удельной влажности во влажных регионах тропиков, а также положительная корреляция между вертикальными масштабами профилей концентраций диоксида серы и сульфатов, наиболее значимо проявляющаяся в регионах с сильным загрязнением нижней тропосферы этими веществами.

В работе [Махотина и др., 2021] приводятся результаты анализа измерений облакомера на станциях “Северный Полюс”-37, 39 и 40. Анализ показал, что радиационный эффект облачности существенно отличается от станции к станции, как и повторяемость облачности и ее влияние на температурный режим. Эти различия могут стать предметом дальнейших исследований взаимосвязи характеристик облачности с другими процессами в климатической системе Арктики.

Северная Атлантика – один из ключевых регионов формирования низкочастотной изменчивости климата. Но, несмотря на многочисленные исследования, связанные с этой темой, некоторые вопросы до сих пор остаются нерешенными. Одним из них является неоднозначная взаимная корреляция температуры поверхности моря в Северной Атлантике и интенсивности Атлантической меридиональной опрокидывающей циркуляции. В исследовании [Bekryaev et al., 2019] были проанализированы функции взаимной корреляции основных климатических индексов Северной Атлантики, полученные на основе простой стохастической модели. Установлено, что связь основных арктических индексов зависит от океанических обратных связей и интенсивности диссипации. Анализируя контрольные эксперименты CMIP5, [Bekryaev, 2019b] продемонстрировал, что наблюдаемые фазовые сдвиги между температурой поверхности моря в Арктике и поверхностными тепловыми потоками не противоречат стохастической теории. Долгосрочная изменчивость в Северной Атлантике может быть вызвана преобразованием атмосферного случайного воздействия, но роль процессов циркуляции океана остается решающей.

В работе [Бекряев, 2022] рассматриваются статистические проблемы количественной оценки полярного усиления изменений климата. Теоретически исследована плотность распределения выборочного коэффициента полярного усиления, определяемого как отношение коэффициентов линейных трендов пространственно-осредненной температуры воздуха. Статистически обоснованная количественная оценка полярного усиления по результатам ансамблевого воспроизведения изменений климата может быть получена на основе метода Филлера, применение которого рассмотрено в условиях нестационарного отклика климатической системы на внешнее воздействие.

В работе [Акперов и др., 2022] получены количественные оценки изменений ветроэнергетических ресурсов в Арктике с использованием региональной климатической модели (РКМ) RCA4 при сценариях изменения климата RCP4.5 и RCP8.5 для 2006–2099 гг. Проанализирована мощность ветроэнергетического потенциала, пропорциональная кубу скорости ветра. По расчетам с помощью РКМ RCA4 для XXI в. при обоих сценариях антропогенных воздействий отмечено, в частности, заметное увеличение мощности ветрового потока над Баренцевым, Карским и Чукотским морями зимой. Летом проявляется его общее увеличение над Северным Ледовитым океаном. При этом изменения больше при сценарии RCP8.5 с сильными антропогенными воздействиями для

XXI века. Согласно полученным модельным оценкам, увеличение межсуточных вариаций мощности ветрового потока в целом не приводит к отклонениям скорости ветра до значений, при которых работа ветрогенераторов невозможна.

В работе [Демчев и др., 2020] приведены результаты верификации данных о приповерхностной температуре воздуха реанализов ERA-Interim и ERA5 по результатам измерений, полученным с дрейфующих буев, наземных метеостанций, а также впервые – по данным измерений, выполненных на дрейфующих станциях "Северный полюс". Последние не ассимилировались ни в одном из рассматриваемых реанализов, что дает редкую возможность для независимой валидации.

На основе данных численного моделирования циркуляции вод Охотского моря с 1986 по 2015 гг. исследован ее отклик у северо-восточного побережья о. Сахалин на прохождение глубоких циклонов [Дианский и др., 2022]. Проведена классификация экстремальных атмосферных синоптических ситуаций, связанных с интенсивной циклонической активностью над Охотским морем в холодный период года. Установлено, что высокая скорость перемещения характерна для циклонов, приходящих на акваторию моря со стороны о. Сахалин, а скорость ветра на периферии больше для циклонов, приходящих на акваторию Охотского моря с юга и юго-запада. Анализ отклика циркуляции вод у северо-восточного побережья о. Сахалин позволил заключить, что для всех типов циклонов на шельфе меридиональная составляющая скорости течений увеличивалась в несколько раз от поверхности до дна.

В работах [Ingel, Makosko, 2021; Ингель и Макоско, 2021а, 2021б] рассматривается теоретическая задача о линейных стационарных возмущениях, вносимых пространственными неоднородностями гравитационного поля в фоновый геострофический поток стратифицированной вращающейся среды (атмосферы). Впервые рассматривается трехмерная аналитическая модель [Ингель, Макоско, 2021а]. Неоднородности поля силы тяжести, деформируя поля давления, плотности и температуры воздуха, влияют на температурный режим пограничного слоя атмосферы, на теплообмен воздуха с подстилающей поверхностью. Получены аналитические выражения для профилей температурных возмущений и амплитуд отклонений вертикальных потоков тепла на поверхности. Последние, помимо амплитуд неоднородностей поля силы тяжести, наиболее сильно зависят от фоновой стратификации среды. В работе [Ingel, Makosko, 2021] рассмотрена стационарная аналитическая модель, предназначенная для оценки амплитуд этих эффектов, в результате которой получены аналитические выражения для профилей температурных возмущений и амплитуд отклонений вертикальных тепловых потоков на поверхностях.

Особое внимание уделено спутниковым методам изучения атмосферных процессов. В работе [Стерлядкин и др., 2022] на базе нового метода спутникового радиотепловидения, который позволяет на основе анализа восстанавливаемой динамики полей интегрального влагосодержания рассчитывать потоки водяного пара над океанами, оценена точность восстановления полей содержания водяного пара над сушей в районе водосбора р. Амур. Проведенные оценки позволяют рассчитать баланс атмосферной воды над выделенной территорией: запасенного над поверхностью водяного пара, количество воды, вошедшей или вышедшей через границы водосбора, и определить количество выпавших осадков за любой выбранный интервал времени. Предложены способы проверки точности разработанного метода сравнением с данными наземных радиозондовых измерений, наземных метеостанций, измеряющих количество выпавших осадков, и данными наземных метеорологических радиолокаторов. Проведенный анализ показывает, что определение количества выпавших осадков над территорией бассейна крупных рек, основанное на многоканальных радиометрических микроволновых измерениях из космоса, вполне возможно.

В работе [Ermakov et al., 2021] впервые приведены результаты прямых сравнений длинных (5 лет) временных рядов зональных вертикально интегрированных суточных потоков водяного пара по данным радиозондов, реанализа и спутникового радиотепловидения. Показано, что все ряды данных статистически достоверно коррелируют (при доверительной вероятности 0.995).

В статьях [Ermakov et al., 2019a, 2019b] представлен алгоритм построения глобальных радиотепловых полей океана и атмосферы с высокой пространственно-временной дискретизацией по спутниковым микроволновым измерениям. Программное обеспечение, реализующее описанный алгоритм, позволяет получать глобальные анимированные радиотепловые поля с шагом по времени 1.5 часа и пространственным разрешением 0.2°. Эти параметры необходимы для анализа сложных, быстрых и энергоемких процессов, происходящих в системе океан–атмосфера, таких как, например, формирование и эволюция тропических циклонов.

В ряде статей обсуждались теоретические вопросы динамики атмосферы.

Разработан аналитический подход к определению оптимальных возмущений [Kalashnik, Chkhetiani, 2020a], основанный на уравнении баланса энергии возмущений и явных выражениях для скорости роста энергии или отношения конечной и начальной энергии. В рамках подхода рассматриваются классическая задача Рэлея о неустойчивости свободного сдвигового слоя и задача о неустойчивости системы, состоящей из двух встречных струйных потоков во вращающемся слое мелкой воды. Параметры оптимальных возмуще-

ний сравниваются с параметрами растущих нормальных режимов. Изучена бароклинная неустойчивость течения с постоянным вертикальным сдвигом в зональном русле [Kalashnik, Chkhetiani, 2020b]. Для описания динамики возмущений потока использовалась максимально усеченная SQG-модель. В рамках этой модели сформулирована динамическая система, описывающая нелинейные взаимодействия неустойчивых встречных волн Россби с одним зональным волновым числом и нейтральной модой, не зависящей от зональной координаты. Как аналитическое, так и численное решение системы показывает, что экспоненциально нарастающие возмущения на линейной стадии развития неустойчивости сменяются нелинейными колебаниями. По численным оценкам период колебаний составляет порядка месяца, что согласуется с данными измерений, полученными для зимней атмосферы.

В качестве показателя межгодовой климатической изменчивости атмосферы предлагается рассчитывать средневзвешенный по площади полушария поток вертикальной спиральности через верхнюю границу планетарного пограничного слоя, который определяется на произведение параметра Кориолиса на квадрат скорости ветра на этой границе [Kurgansky et al., 2020]. Показано, что введенный индекс хорошо характеризует межгодовую изменчивость климата атмосферы обоих полушарий.

В статье [Kalashnik et al., 2021] сформулированы новые вертикально дискретные версии поверхностной квазигеострофической модели с двумя границами. Исследовалась линейная устойчивость струйных течений, индуцированная кусочно-постоянными граничными распределениями плавучести. Для этих течений получены аналитические выражения для скорости роста возмущений и показано, что наиболее неустойчивое возмущение имеет длину волны порядка бароклинного радиуса деформации Россби. Также рассматриваются течения с вертикальным сдвигом, вызванным плавным и медленно меняющимся граничным распределением плавучести. Установлено, что неустойчивость этих течений абсолютна, т. е. не зависит от горизонтальной структуры профиля скорости.

Возможность существования различных режимов баротропной циркуляции в закрытых кольцевых каналах при одних и тех же внешних параметрах, определяющих динамику течения, исследуется как экспериментально, так и численно в работе [Gledzer et al., 2021]. В численных экспериментах возможны следующие результаты. 1. Начальный и конечный режимы количественно различаются по числу генерируемых циклонических и антициклонических вихрей. 2. Число вихревых образований не меняется, но меняется их локализация в пространстве, например угловые координаты их центров. 3. После изменения и восстановления исходного значения управляющего параметра течение возвращается к режиму, практически неотличимому от исходного. Представлены схемы течения и соответствующие диаграммы для лабораторных экспериментов и численного моделирования на основе уравнений мелкой воды.

В статье [Калашник, 2019] рассмотрена задача об устойчивости струйного течения с кусочно-линейным профилем скорости в стратифицированной вращающейся атмосфере. Показано, что течение, устойчивое в рамках квазигеострофического приближения, становится неустойчивым за счет излучения инерционно-гравитационных волн.

В работе [Калашник и др., 2022] представлены современные теоретические подходы к исследованию бароклинной неустойчивости, с которой связана генерация крупномасштабных вихревых потоков в атмосферах Земли и других планет. Рассмотрены также классические энергетические критерии устойчивости зональных течений, полученные с помощью прямого метода Ляпунова–Арнольда.

В статье [Kalashnik, 2020] рассматриваются поверхностные квазигеострофические течения с горизонтальным масштабом, значительно большим, чем радиус деформации Россби. Для описания динамики таких потоков предлагается новая версия модели SQG с двумя границами, сводящаяся к нелинейной системе уравнений в частных производных. В рамках этой системы получены решения ряда задач теории бароклинной неустойчивости, согласующиеся с уже известными решениями. В рамках двухуровневой модели SQG исследуется гидродинамическая устойчивость пространственно-периодического течения с синусоидальным профилем скорости (колмогоровского течения). Подобные пространственно-квазипериодические потоки часто наблюдаются в атмосферах планет-гигантов и в Южном океане [Kalashnik et al., 2021]. Для описания динамики возмущений использовался метод Галеркина с тремя базисными тригонометрическими функциями Показано, что использование этого варианта упрощает исследование устойчивости и приводит к асимптотически правильным результатам. В рамках этой модели рассматриваются задачи линейной и нелинейной устойчивости зональных пространственно-периодических течений [Kalashnik et al., 2020].

В работе [Калашник, Куличков, 2019] рассмотрена задача о возмущениях приземного давления, вызываемых движущимся, нестационарным источником тепла, локализованным по одной горизонтальной координате и периодическим по другой. Возмущения давления связаны с внутренними гравитационными волнами (ВГВ). Показано, что при движении источника в слое атмосферы конечной высоты (атмосферном волноводе), когда возбуждается дискретный набор вертикальных мод ВГВ, возможны три типа временного хода приземного давления в фиксированной точке наблюдения. Каждый из типов реализуется для

определенных значений частоты колебаний источника и числа Маха (отношения скорости движения источника к фазовой скорости ВГВ). Движение источника в полуограниченной атмосфере приводит к дополнительному возбуждению волн, переносящих энергию в верхние слои атмосферы.

Влияние трения Экмана на динамику зональных потоков (ЗП) исследовано в рамках квазигеострофической модели атмосферы с двумя горизонтальными границами (подстилающая поверхность и тропопауза) [Калашник, 2020]. Показано, что в случае периодических распределений противоположно направленный вертикальный профиль скорости ЗФ трансформируется в однонаправленный профиль с максимальной скоростью на верхней границе и нулевой скоростью на нижней границе. Возникающее течение представляет собой струю, прижатую к верхней границе, которую можно считать прототипом западного верхнего тропосферного струйного течения. Важные особенности строения такой струи, устанавливаемые в рамках полной негеострофической модели, связаны с горизонтальной асимметрией струи и образованием фронтов (поверхностей разрыва), примыкающих к верхней границе.

Исследована гидродинамическая неустойчивость системы вертикальных движений, инициируемых пространственно-периодическим распределением источников тепла [Kalashnik, Kurgansky, 2020]. Установлено, что вертикальные движения неустойчивы в отсутствие диссипации, если число Ричардсона меньше 1/8. Разработана слабонелинейная модель невязкой неустойчивости. Показано, что потеря устойчивости при наличии диссипации может привести к формированию как стационарного, так и осциллирующего во времени вторичного течения с нетривиальной топологией линий тока.

Уравнения траекторий выведены для описания нелинейной эволюции тонких струй, генерируемых температурными фронтами [Goncharov, 2021a]. Найдены частные решения в виде установившейся меандрирующей струи, остроконечной струи и двурукавной спирали.

Модель мелкой воды с горизонтально-неоднородной плотностью используется для изучения динамики струйных течений, возникающих под действием плавучести и силы Кориолиса [Goncharov, 2021b]. В рамках этого подхода струя описывается автомодельным компактно-локализованным решением и интерпретируется как полоса сдвигового течения, имеющая температурный контраст с окружающей жидкостью. Теория предсказывает, что период пульсаций теплых струй больше периода инерционных колебаний, вызванных вращением Земли, а пульсаций холодных струй короче. Таким образом, только теплые струи могут оказать заметное влияние на динамику атмосферы в синоптическом диапазоне.

В работе [Kurgansky et al., 2020a] приведены результаты лабораторных экспериментов с вращающимся цилиндрическим кольцом, в которых обнаружена прогрессивная струя, примыкающая к (продольно) либрирующей внутренней прямой цилиндрической стенке. Здесь либрация стенки реализуется как гармоническая по времени модуляция скорости вращения внутреннего цилиндра. Предложена простая аналитическая модель, которая способна предсказать величину и пространственную структуру возникающей пристеночной струи с точки зрения нелинейности, присущей динамике пограничного слоя внутреннего цилиндра.

В работе [Kurgansky, 2021a] исследуется линейная и нелинейная инерционная устойчивость колмогоровского течения во вращающейся вязкой жидкости однородной плотности. Необходимым условием неустойчивости является нарушение критерия невязкой инерционной устойчивости, а достаточное условие неустойчивости формулируется в терминах критерия Рейнольдса. Более подробно изучен случай чисел Прандтля, меньших или равных единице, когда существует вторичный стационарный режим, который может быть неустойчивым (в отличие от случая однородной по плотности жидкости) и устойчивой стратификацией плотности дестабилизирующий фактор.

В статье [Курганский, 2022a]. показана возможность неустойчивости при меньших сдвигах скорости, чем на это указывает критерий инерционной устойчивости стационарного течения такой же амплитуды скорости. С использованием теории Флоке, приближений Галеркина и метода (обобщенных) цепных дробей вновь рассматривается проблема линейной устойчивости стратифицированного колмогоровского течения, движимого синусоидальной в пространстве силой в вязкой диффузионной жидкости Буссинеска [Kurgansky, 2022b]. Высказано предположение, что коротковолновая неустойчивость стратифицированного колмогоровского течения обусловлена резонансным усилением доплеровско-смещенных внутренних гравитационных волновых мод при наличии критических уровней основного течения, которые не учитываются при доказательстве закона Майлза–Ховарда. Также исследована инерционная параметрическая неустойчивость нестационарного пространственно-периодического течения (колмогоровского течения) во вращающейся стратифицированной жидкости Буссинеска с полным учетом силы Кориолиса в задаче и с возможностью произвольной ориентации течения в горизонтальной плоскости. [Kurgansky, 2022c]. В частности, оценки неустойчивости получены для слабо стратифицированных геофизических сред, например для глубоких слоев океана, и предполагается, что возможные приложения теории также могут быть напрямую связаны с лабораторным экспериментом.

В работе [Zagumennyi, Chashechkin, 2019] численно исследована структура и динамика течения вокруг горизонтальной и наклонной пластины при нестационарном вихревом режиме течения как для стратифицированной, так и для однородной жидкости при различных геометрических модификациях передней и задней стенок и различных углах наклона. Проанализированы нестационарные закономерности полей завихренности, градиентов давления и плотности, а также значений сил и моментов, действующих на поверхность пластины при различных углах наклона и значениях радиуса скругления передней кромки пластины и коэффициента остроты ее задней кромки. Особое внимание уделено изучению тонкой структуры течения вокруг передней кромки пластины, которая является наиболее многомасштабной областью течения, где формируются и активно взаимодействуют друг с другом и со набегающим потоком как крупномасштабные, так и мелкомасштабные вихревые элементы. Волновая и вихревая тонкая структура нестационарных стратифицированных течений исследована численно на основе системы фундаментальных уравнений для неоднородной несжимаемой жидкости с граничными условиями прилипания и непротекания и экспериментально с использованием методов визуализации высокого разрешения [Chashechkin, Zagumennyi, 2019]. Предложена классификация компонентов течения, включающая волны, вихри и связки, проявляющиеся в виде протяженных границ раздела, поперечные масштабы которых определяются диссипативными свойствами жидкости и динамикой течения. Движущееся тело в стратифицированной жидкости создает восходящие возмущения, группы присоединенных внутренних волн, передние вихри и вихревую дорожку в следе, которые сосуществуют в стратифицированном потоке как единое целое и разделены связками. Численные и экспериментальные визуализации диффузионных течений, внутренних волн, вихревых дорожек и тонких структурных связок качественно согласуются друг с другом.

На основе фундаментальной системы, включающей уравнения неразрывности, импульса и переноса вещества с линеаризованным уравнением состояния, разработаны методы экспериментального и численного исследования визуализации полей возмущений потока, порождаемых равномерным горизонтальным движением вертикальной пластины в стратифицированной среде [Chashechkin, Zagumennyi, 2020]. Результаты наблюдений и расчетов находятся в хорошем качественном и количественном согласии друг с другом. Экспериментальное исследование было подтверждено видеозаписью течения в высоком разрешении [Chashechkin, 2020]. Образование мелких компонент течения связано с высвобождением доступной потенциальной энергии и сохранением возмущений в тонком “двойном слое”, расположенном вблизи исходных контактных поверхностей. Взаимодействие падающей капли (разбавленного водного раствора чернил различной концентрации) с целевой жидкостью (частично дегазированной водопроводной водой) отслеживалось с помощью видеосъемки и фотосъемки высокого разрешения [Chashechkin, Ilynykh, 2020].

На основе численных и экспериментальных методов визуализации исследованы картины обтекания равномерно движущейся пластины, расположенной под произвольным углом атаки [Chashechkin, Zagumennyi, 2021]. Исследование основано на фундаментальных уравнениях переноса неразрывности, импульса и расслаивающегося вещества для случаев сильно и слабо стратифицированных однородных жидкостей. Анализ проводился в единой математической постановке для широкого диапазона параметров движения пластин, включая медленные диффузионные течения и быстрые нестационарные вихревые течения. Описаны закономерности формирования и последующей эволюции основных структурных составляющих: восходящих возмущений, нисходящего следа, внутренних волн, вихрей и связок как в начале движения, так и в последующем равномерном движении пластины. Численные и экспериментальные результаты по картинам течения вокруг пластины хорошо согласуются друг с другом для различных режимов течения. Методами теории сингулярных возмущений в линейном и слабонелинейном приближениях рассмотрена задача генерации пучков периодических внутренних волн в вязкой экспоненциально стратифицированной жидкости полосой, колеблющейся вдоль наклонной плоскости [Chashechkin, 2021]. Сделанные оценки показывают, что амплитуды таких волн достаточно велики, чтобы их можно было наблюдать в лабораторных условиях.

Модель используется для анализа характеристик траектории штормов в Северном полушарии в зимний сезон. Результаты показывают схожие особенности траекторий штормов в Северной Атлантике и Северной части Тихого океана, которые доминируют в Северном полушарии в моделировании и данных реанализа [Vargin et al., 2019].

2. КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОГНОЗ ПОГОДЫ

Обзор работ, посвященных вопросам влияния обледенения на работу воздушного транспорта, представлен в [Иванова, 2021]. Обсуждаются проблемы наземного обледенения, приводящего к ухудшению состояния взлетно-посадочных полос и усложнению предполетных аэродромных работ. Рассматриваются причины обледенения воздушных судов в полете, средства и методы наблюдения за обледенением, подходы к прогнозированию обледенения в облаках и осадках. Анализи-

руются методы прогноза обледенения двигателей воздушных судов в зонах высокой концентрации ледяных кристаллов. В работе [Иванова и др., 2022] предложен метод прогноза обледенения воздушных судов в полете над территорией Российской Федерации с заблаговременностью до 12 ч на базе выходной продукции конфигурации COSMO-Ru модели COSMO с шагом 6.6 км. Для выделения обледенения сильной интенсивности предложено использовать значения модельной водности, превышающие 0.4 г/кг.

В работе [Мохов и др., 2020] проведен анализ особенностей центров действия атмосферы Северного и Южного полушарий, их изменчивости и связи с температурным режимом полушарий и ключевыми климатическими модами, включая Эль-Ниньо – южное колебание, атлантическую мультидесятилетнюю и тихоокеанскую десятилетнюю осцилляции, с использованием разных долгопериодных данных реанализа. По долгопериодным данным отмечено, что вековое полушарное потепление сопровождается статистически значимым ослаблением полярных максимумов, а также гренландского максимума, особенно летом. Отмечено углубление исландского (особенно летом) и алеутского (особенно зимой) минимумов. Проявляются также значимое ослабление зимних сибирского и североамериканского максимумов и углубление летнего североамериканского минимума. В Южном полушарии при потеплении значимо усиливаются все три субполярных океанических минимума и маскаренский максимум и ослабляются летние австралийский и южноафриканский минимумы.

Установлено [Мохов и др., 2022], что региональные особенности глобальных климатических изменений существенно связаны с режимами центров действия атмосферы (ЦДА) и их изменчивостью. Проведен анализ ожидаемых изменений ЦДА в Северном полушарии по расчетам с ансамблями современных климатических моделей международных проектов CMIP5 и CMIP6 при сценариях антропогенных воздействий RCP8.5 и SSP5-8.5 в XXI веке. Наиболее согласованные оценки по расчетам с ансамблями моделей CMIP5 и CMIP6 получены для тенденций ослабления зимнего Североамериканского максимума и летнего Азиатского минимума. Для интенсивности субполярных циклонических ЦДА над Атлантическим и Тихим океанами отмечено обратное – их интенсивность в целом больше для зимних сезонов, чем для летних. При этом межгодовая изменчивость интенсивности ЦДА, характеризуемая среднеквадратическим отклонением, в зимние сезоны в целом больше, чем в летние.

В работе [Мохов, 2021] представлены оценки региональных особенностей формирования экстремальных атмосферных и гидрологических, климатических и экологических режимов в связи с проявлениями Тихоокеанской десятилетней осцилляции (ТДО) на фоне общего потепления последних десятилетий. Формированию рекордного амурского наводнения в 2013 г. и камчатского “красного прилива” в 2020 г. способствовали положительные аномалии температуры в западной части Тихого океана в Северном полушарии, соответствующие отрицательной фазе ТДО. С режимами ТДО связаны крупномасштабные климатические вариации типа “климатического сдвига” во второй половине 1970-х гг., отмечена связь с особенностями атмосферных блокирований. В частности, повторяемость летних атмосферных блокирований, наибольшая над европейской территорией России, особенно велика в отрицательной фазе ТДО. Рекордный по продолжительности период атмосферного блокирования над европейской территорией России летом 2010 г. с рекордной жарой и пожарами был отмечен именно в отрицательной фазе ТДО.

Рассмотрена двухзонная модель циркуляции атмосферы над полушарием [Kurgansky, 2021c]. На основе предложенной модели решается вопрос блокирующего действия атмосферы над полушарием. Моделирование показало, что долгосрочное изменение климата, связанное либо с значительным глобальным потеплением, либо с значительным глобальным похолоданием, как соответствующих текущему состоянию климата, так и количественно выражаемых изменениями широты φ, приводит к увеличению вероятности блокингов.

В статье [Serykh, Sonechkin, 2021] исследуется предсказуемость Эль-Ниньо и Ла-Нинья. В данном случае рассматривается недавно открытое так называемое глобальное атмосферное колебание (ГАО). Предполагая, что ГАО является основным режимом краткосрочной климатической изменчивости, в данной работе определен индекс, характеризующий динамику и взаимоотношения внетропических компонентов ГАО и Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК). Используя эту зависимость, можно спрогнозировать Эль-Ниньо и Ла-Нинья с заблаговременностью примерно 12 месяцев.

Получены оценки изменения повторяемости атмосферных блокирований на основе ансамблевых расчетов CMIP5 с помощью современных климатических моделей общей циркуляции с использованием различных критериев детектирования атмосферных блокингов и разных RCP-сценариев антропогенных воздействий для XXI в [Мохов, Тимажев, 2019]. Для оценки качества воспроизведения характеристик атмосферных блокингов по модельным расчетам проведено сравнение меридиональных сезонных распределений повторяемости блокирований с данными реанализа. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности модельных оценок с выделением ансамблей лучших моделей (с точки зрения воспроизведения блокингов для совре-

менного климата). При выделении лучших моделей выявляется риск увеличения повторяемости блокингов при потеплении, что не отмечено при анализе ансамбля всех моделей. Обнаружено, что блокирующие события в Северном полушарии (1968–1998 гг.) были сильнее, чем блокинги в Южном полушарии, а зимние события сильнее, чем летние события в обоих полушариях [Lupo et al., 2019]. В этой работе также изучалась межгодовая изменчивость блокингов в связи с Эль-Ниньо и Южным колебанием (ЭНСО). Представлены оценки региональных аномалий повторяемости атмосферных блокирований в Северном полушарии, диагностированных по данным реанализа с 1979 г. при разных фазовых переходах явлений Эль-Ниньо в различных фазах Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультидесятилетней осцилляций.

Отмечены существенные различия для явлений Эль-Ниньо, диагностированных с использованием разных индексов, характеризующих процессы разного типа [Мохов, Тимажев, 2022а]. Предложен новый интегральный индекс для описания суммарной активности атмосферного блокирования на протяженных территориях в различные интервалы времени [Мохов, Тимажев, 2022б]. Для характеристики суммарной активности атмосферных блокирований (блокингов) для протяженных областей на разных временных интервалах предложен новый интегральный индекс.

В работе [Мохов, 2023] проведен анализ зимних атмосферных блокирований в Северном полушарии при климатических изменениях в 1980–2018 гг. Результаты анализа свидетельствуют о значимом увеличении общей продолжительности зимних атмосферных блокирований. Отмеченные особенности связаны с различиями в разных фазах ключевых мод климатической изменчивости.

Оценки вероятности теплых и холодных зим в регионах Северной Евразии получены на основе данных за восемь десятилетий в зависимости от явления Эль-Ниньо [Мохов, 2020]. Отмечены особенности аномально теплых и аномально холодных зим в разных российских регионах в фазах Эль-Ниньо, Ла-Нинья и в нейтральной фазе. Проведено сравнение особенностей аномальных зим при явлениях Эль-Ниньо разного типа.

Проанализированы сезонные аномалии приземной температуры воздуха для регионов Северной Евразии в средних широтах с использованием многолетних данных конца XIX века с оценкой эффектов Южного колебания Эль-Ниньо (ЭНСО) [Mokhov, Timahzev, 2022]. В частности, с помощью индексов Niño3, Niño3.4 и Niño4 оценены аномалии температуры в весенне-летние месяцы для Европейского (ЕТР) и Азиатского (АР) регионов России для различных фазовых переходов явлений ЭНЮК. Наибольшая повторяемость экстремально высоких температур и засушливых условий в весенне-летние месяцы в ЕТР отмечена в годы, начинающиеся в фазе Эль-Ниньо с переходом в фазу Ла-Нинья в конце года. Соответствующая наибольшая повторяемость высокой температуры в АО получена для условий с продолжением фазы Эль-Ниньо в течение всего года. Такие условия в АР были отмечены, в частности, летом 2015 г. при экстремально высокой температуре и экстремально малом количестве осадков в бассейне озера Байкал.

Изменения характеристик активности циклонов (частоты, глубины и размера) в Арктике анализируются на основе моделирования с использованием современных региональных климатических моделей (РКМ) и глобальных климатических моделей (ГКМ) [Akperov et al., 2019]. В большинстве РКМ к концу XXI века наблюдается увеличение повторяемости циклонов зимой и уменьшение летом. Но в половине РКМ циклоны становятся слабее и существенно меньше зимой и глубже и крупнее летом. РКМ, как и ГКМ, показывают увеличение повторяемости циклонов над заливом Баффина, Баренцевым морем, к северу от Гренландии, Канадским архипелагом и снижение над Северными морями, Карским морем и морями Бофорта, а также над субарктическими континентальными районами в зимний период.

В статье [Akperov et al., 2021] выдвигается гипотеза о том, что биогеофизические обратные связи над сушей, связанные с изменением альбедо весной и увеличением испарения летом, могут привезти к значительному изменению циклонической активности в Арктике.

В статье [Дурнева, Чхетиани, 2021] представлен анализ среднемесячных положений планетарной высотной фронтальной зоны в Атлантико-Европейском секторе Северного полушария в летние сезоны за период 1990–2019 гг. Отмечены характерные положения для летних месяцев – июня, июля и августа – и максимальные смещения от среднего многолетнего положения за 1961–1990 гг. в северном направлении в годы с образованием блокирующего режима в атмосфере. Рассчитаны значения среднеквадратических отклонений смещений относительно климатического положения за весь летний период для каждого года как для акватории Северной Атлантики и континентальной части Европы и европейской части России, так и для единого Атлантико-Европейского сектора. Выявлена тенденция увеличения меридиональных смещений планетарной высотной фронтальной зоны на основе линейной регрессии за последние 30 лет и появления максимальных отклонений за последний 10-летний период.

В работе [Курганский, 2020] рассматривается отклик крупномасштабной атмосферной циркуляции на аномальный нагрев с незамерзающей поверхности Баренцева и Карского морей, который наблюдается последние два десятилетия. Обнаружено появление очага повышенной призем-

ной температуры воздуха над областью нагрева, некоторого понижения приземного давления там и, наконец, возникновение антициклонической циркуляции в основной толще атмосферы. Показано, что модельные результаты крайне чувствительны к параметризации экмановского пограничного слоя.

В статье [Ривин и др., 2020] рассмотрена реализованная в Гидрометцентре России новая система краткосрочного оперативного численного прогноза с детализацией вычислений 1 км для Московского региона с учетом особенностей городской подстилающей поверхности на основе модели COSMO-Ru1M. Приведены результаты подбора оптимальной конфигурации модели и ее тестирования в Московском регионе по данным измерений плотной сети метеостанций и температурных профилемеров МТП-5. Показаны высокие прогностические возможности новой системы.

Исследование (Ivanov et al., 2019) посвящено особенностям взаимодействия океана и воздуха в море Лаптевых в конце лета на основе периодических измерений в ходе четырех экспедиций 2000-х и 2010-х гг., атмосферного реанализа, и спутниковых данных о концентрации льда. Установлено, что в годы с большим количеством льда накопление тепла в верхнем слое океана незначительно для последующего ледообразования. В безледные годы накопление тепла в верхнем перемешанном слое зависит от продолжительности сезона открытой воды и расстояния точки измерений до ближайшей кромки льда. В период с 2007 по 2017 гг. на евразийском сегменте Арктики выявлена значительная “сезонная память”, характеризующаяся последовательным изменением параметров ледяного покрова в последовательные сезоны. На американском сегменте связи в сезонном временном масштабе не обнаружено. Предлагается возможное объяснение резкого контраста между двумя географическими регионами.

3. МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ

В статье [Иванова, 2019] представлен обзор работ, посвященный истории развития и современному состоянию технологий наукастинга грозовой конвекции. Показана роль информации о грозах, получаемой от различных источников – спутников, радаров, грозопеленгаторов, наземных микроволновых радиометров, и значение выходной продукции численных моделей прогноза погоды для наукастинга гроз. Обсуждаются особенности систем наукастинга грозовых штормов, используемых мировыми метеослужбами.

Значительное внимание в публикациях было уделено климатологии смерчей и конвективных бурь. На территорию России регулярно обрушиваются сильные конвективные ураганы и смерчи, вызывающие значительный ущерб и человеческие жертвы. Анализ климатологии и условий формирования этих явлений необходим для оценки риска, улучшения прогнозов и выявления связей с наблюдаемым изменением климата.

В статье [Chernokulsky et al., 2020] представлена новая база данных о смерчах на северо–востоке России, охватывающая период с десятого века по 2016 г. База данных, составленная с использованием различных источников, содержит 2879 случаев смерчей над сушей и водой и включает их характеристики.

В статье [Shikhov et al., 2020] представлена новая база данных геоинформационной системы (ГИС) о ветровых явлениях в лесной зоне Европейской России за период 1986–2017 гг. На конвективные ураганы приходится 82.5% общей площади, пострадавшей от ветра, а на торнадо и неконвективные ураганы приходится 12.9 и 4.6% этой площади соответственно. Большинство ветровалов в ЕТР произошло летом, в отличие от Западной и Центральной Европы, где они происходят в основном осенью и зимой. Из-за некоторых ограничений данных и методов составленная база данных является пространственно и временно неоднородной и, следовательно, неполной. Несмотря на эту неполноту, представленная база данных представляет собой ценный источник пространственной и временной информации о ветровых явлениях в России.

Представлены новые данные о смерчах над сушей в России за период с 1900 по 2018 г. на основе различных источников [Чернокульский и др., 2021]. Отмечены как единичные смерчи, так и “вспышки” смерчей – случаи формирования нескольких смерчей в пределах одной системы мезо- или синоптического масштаба. Рассчитаны повторяемость смерчей разной категории и вероятность их прохождения через точечный объект, эти данные могут быть использованы для оценки риска смерчеопасных ситуаций. Проанализирована общая недооценка числа смерчей по станционным наблюдениям и согласно данным статистики.

В работе [Shikhov et al., 2022] рассмотрено пространственное и временное распределение ветровалов в лесной зоне Западной Сибири за период 2001–2020 гг. Максимальная плотность ветровалов наблюдается в Кемеровской области, а также на западе Томской области и юго-востоке Ханты-Мансийского автономного округа. Наибольшее количество ветровалов зарегистрировано в 2007 и 2010 гг. Смерчи и шквалы, вызывающие ветровалы, чаще всего наблюдаются в июне, а ветровалы, вызванные неконвективными явлениями, наблюдались в октябре–ноябре в горах Урала и Кузнецкого Алатау. Зарегистрировано несколько крупных вспышек шквалов и смерчей.

Были проведены исследования смерчей и шквалов, а также анализ условий их формирования в уральском регионе [Chernokulsky et al., 2020b] для июня 2017 года. Был проведен детальный анализ вспышек формирования смерчей с

использованием различных данных. Синоптический анализ выявил сходство двух вспышек, которые образовались вблизи полярного фронта в теплой части углубляющихся южных циклонов. Анализ показывает, что для Уральского региона, как и для других регионов мира, совместное использование результатов глобальной и региональной моделей можно использовать для прогнозирования высоких значений индексов штормовой погоды и вероятности образования сильного смерча.

В работе [Калинин и др., 2021] рассмотрены условия возникновения 53 сильных шквалов и смерчей, вызвавших крупные ветровалы в лесной зоне Европейской части России и Урала в период с 1989 по 2019 г. Для анализа условий, в том числе расчета разных индексов конвективной неустойчивости, использованы данные систем реанализа CFSR и ERA-5 и данные аэрологического зондирования. Установлено, что важными факторами возникновения сильных шквалов и смерчей являются значительный контраст температуры на фронте, а также наличие струйного течения в нижней или средней тропосфере, ориентированного вдоль фронтальной зоны. В большинстве случаев для возникновения шквалов и смерчей необходимо сочетание высокого влагосодержания воздушной массы, умеренной или сильной конвективной неустойчивости и сильного сдвига ветра по скорости. При этом для формирования шквалов большее значение имеют влагосодержание и конвективная неустойчивость атмосферы, а для формирования смерчей ключевым является сдвиг ветра в нижнем слое.

В статье [Шихов и др., 2021] представлен анализ сильных конвективных ураганов – шквалов и смерчей, зарегистрированных в период с 1984 по 2020 гг. в Пермском крае (северо–восток Европейской части России), где ранее был обнаружен локальный максимум частоты таких явлений. Спутниковые снимки поврежденных лесов являются основным источником данных о торнадо, но их роль для ураганных явлений существенно ниже из-за большего пространственного и временного масштаба таких явлений. Для каждого события с известной датой и временем определялись условия синоптического масштаба и связанные с ними значения индексов конвекции. Выявлены сходства и различия условий формирования смерчей и ураганов. И шквалы, и смерчи возникают преимущественно на быстро движущихся холодных фронтах или на волнистых квазистационарных фронтах, связанных с системами низкого давления. В целом штормовые явления, вызывающие ветровыбросы, происходят преимущественно в условиях, более благоприятных для глубокой хорошо организованной конвекции.

Летом 2010 г. Европейская часть России испытала беспрецедентно высокую температуру воздуха, катастрофические лесные пожары, сильное загрязнение воздуха, а также несколько сильных конвективных штормов. В исследовании [Chernokulsky et al., 2022] с использованием изображений Landsat оценен ущерб лесам, вызванный ураганами, и проведен анализ синоптических и мезомасштабных особенностей формирования и развития этих ураганов с использованием данных спутниковых и реанализов, наземных наблюдений и мезомасштабного численного моделирования. Результаты работы показывают значительную роль блокингов в формирование и развитии сильных конвективных штормов.

В работе [Шихов и др., 2022] рассмотрена применимость спутниковых данных для оценки неустойчивости и влагосодержания атмосферы в случаях возникновения конвективных опасных явлений погоды на Европейской территории России и Урале. Отмечена существенная ограниченность данных MODIS в связи с низкой частотой съемки и невозможностью получения информации о параметрах неустойчивости для ячеек с облачностью, что, в частности, сократило итоговую выборку с 305 до 95 случаев.

Исследованы особенности условий возникновения конвективных опасных явлений, включая долгоживущий шквал и несколько смерчей, наблюдавшихся на Европейской части России 15 мая 2021 г [Чернокульский и др., 2022]. Проведены численные эксперименты по воспроизведению события с помощью региональной модели атмосферы WRF с разными начальными условиями.

Ряд статей был посвящен строению смерча, а именно динамике частиц в атмосферных вихрях (Ingel, 2020, Ингель, 2021a, 2022a). Аналитически исследовано движение инерционных частиц в интенсивных вихрях с вертикальной осью в поле силы тяжести (Ingel, 2020). Установлен ряд общих законов динамики частиц. Аналитически проанализировано движение инерционных частиц в интенсивных вихрях с вертикальной осью в поле силы тяжести и динамика концентрации инерционных частиц в интенсивных вихревых потоках (Ингель, 2021a, 2022a). Оценено расстояние переноса тяжелых частиц за пределы области сильных ветров. Адекватное описание движения частиц может иметь важное значение для корректной интерпретации результатов радиолокационного зондирования смерчей, оценки связанных с ним опасностей и, возможно, для моделирования динамики самих смерчей. Найденные аналитические решения демонстрируют существенную роль нелинейных эффектов, поскольку эффективные коэффициенты сопротивления отличаются от ранее изученного случая стоксовых частиц как минимум в десятки раз.

В работе [Калмыкова и др., 2019] рассмотрен автоматизированный прогноз черноморских смерчей. Приведены основы методики краткосрочного прогноза смерчеопасных ситуаций, а также распознавания смерчеопасных областей в реальном времени по радиолокационным наблюдениям и ре-

зультаты авторского тестирования методики за период с августа 2017 г. по октябрь 2018 г. Проанализированы перспективы использования полученного опыта для разработки автоматизированной системы прогноза смерчей на Европейской части России.

Методика оценки смерчеопасности, разработанная в ФГБУ "НПО "Тайфун", позволяет строить прогнозы смерчеопасных областей в пределах восточной части акватории Черного моря, выявлять облака с потенциальным риском образования из них смерчей, давать прогноз возможного формирования смерчей вблизи различных участков Черноморского побережья России [Калмыкова, 2021б]. В работе [Калмыкова и др., 2021а] представлен анализ синоптической ситуации, способствовавшей возникновению вспышки смерчей над Черным морем 16 июля 2019 г. Установлено, что в рассматриваемый день Черноморский регион находился под влиянием мезоциклона и фронта с волновыми возмущениями. Отмечено, что на рассматриваемый день давался прогноз крайне высокой опасности появления смерчей вблизи всего побережья Краснодарского края, что указывало на возможность вспышки смерчей.

В статье [Chechin at al, 2019] представлена простая аналитическая модель пограничного слоя атмосферы, связанного с морским льдом. Она описывает охлаждение ясного неба над морским льдом во время полярной ночи. Модельные решения показывают, что концентрация морского льда и скорость ветра оказывают сильное влияние на тепловой режим морского льда. Теоретические решения хорошо согласуются с результатами более реалистичной одномерной модели и с наблюдениями, выполненными на трех российских дрейфующих станциях "Северный полюс" (НП-35, -37 и -39). Как результаты моделирования, так и наблюдения показывают сильную зависимость потока длинноволновой радиации на поверхности от скорости ветра.

Движущие механизмы мезомасштабных процессов и связанный с ними перенос тепла в Японском/Восточном море (JES) с 1990 по 2010 год были изучены с использованием вихреразрешающей модели океана [Stepanov et al., 2022]. Анализ вихревой кинетической энергии) показал, что мезомасштабная динамика достигает максимальной интенсивности в верхнем 300-метровом слое. Летом ведущую роль в формировании мезомасштабной динамики играет баротропная неустойчивость течений, ответственных за возникновение мезомасштабных вихрей, а осенью ведущую роль играют неустойчивость и ветер. Показано, что меридиональный перенос тепла преимущественно направлен к полюсам. В районе пролива Цугару обнаружен интенсивный вихревой перенос тепла на запад, достигающий максимума в первой половине года и снижающийся до минимума к лету.

Аналитическое описание турбулентных течений дано в работах [Ingel, 2019a, 2019b, 2021c, Ингель, 2022б[. Известная нелинейная интегральная модель турбулентного термика обобщена на случай наличия горизонтальной составляющей его движения относительно окружающей среды (например, всплытие термика в сдвиговом потоке) [Ingel, 2019b]. Решение описывает, в частности, нелинейный эффект взаимодействия горизонтальной и вертикальной составляющих теплового движения. В статье [Ingel, 2019a] рассматривается простейшая линейная модель конвекции, обусловленной двойной диффузией во вращающейся среде. Обсуждается возможность вклада этих эффектов в концентрацию завихренности при формировании торнадо. В [Ingel, 2021c] в развитие предыдущей работы рассматривается более сложная задача с учетом температурной стратификации среды. С помощью методов масштабного анализа, анализа размерности и симметрии дифференциальных уравнений исследована динамика плавучих конвективных струй, связанных со стационарными локальными источниками тепловыделяющей примеси в нейтрально стратифицированной среде [Ingel, 2019b]. Приведены законы движения турбулентных термиков, связанных с мгновенными источниками примеси, вытекающие из соображений размерности и подобия. Разработана и обобщена в ряде направлений известная упрощенная модель турбулентной конвекции от локальных источников плавучести и/или импульса, действующих кратковременно. Рассмотрены особенности динамики конвекции от источников конечных размеров [Ingel, 2021c]. Аналитически проанализирована двумерная стационарная линейная модель течений, возникающих в устойчиво (нейтральной) стратифицированной среде над термически неоднородной плоской наклонной поверхностью [Ингель, 2022б]. Модель склоновых течений Прандтля (конвекция в стратифицированной среде вблизи наклонной поверхности) обобщена на случай наличия объемных источников/стоков тепла, ориентированных параллельно склону [Ингель, 2021б]. Численные оценки показывают возможность генерации заметных наклонных атмосферных потоков при наличии аэрозоля, влияющего на радиационный баланс. Горизонтальные неоднородности коэффициентов обмена в стратифицированной среде приводят к неоднородностям вертикального диффузионного потока плавучести и его горизонтального распределения и, как следствие, к возникновению горизонтальных неоднородностей гидростатического давления и генерации течений [Ingel, 2022]. В качестве примера рассмотрено возникновение упорядоченных течений в стратифицированной по температуре (плотности) турбулентной среде в поле силы тяжести вблизи наклонной поверхности. Разработана стационарная нелинейная аналитическая модель пограничного слоя типа

Экмана с анизотропным сопротивлением [Ingel, 2021c]. Результаты показывают, что эффекты анизотропии могут быть заметны.

Простое решение уравнения сохранения абсолютной завихренности использовано для обхода известной нелинейной задачи о взаимодействии точечных вихрей с регулярным полем завихренности и получено точное решение задачи динамики диполя вихрей на вращающейся сфере [Mokhov et al., 2020]. Благодаря этому получено новое устойчивое стационарное решение динамики вихрей, которое может моделировать динамику глобальных вихревых структур, таких как атмосферные центры действия.

В работе [Калашник, Чхетиани, 2019] построен ряд точных и асимптотических решений уравнений двумерной гидродинамики, описывающих нестационарные вихревые дорожки. Определена ширина полосы, заключающей вихревую дорожку, получено уравнение сепаратрисы, отделяющей вихревые ячейки с замкнутыми линиями тока от внешнего меандрирующего течения. В рамках уравнения переноса потенциальной завихренности изучено влияние квазидвумерной сжимаемости и бета-эффекта на динамику вихревых дорожек. С использованием длинноволнового приближения построены решения, описывающие формирование вихревых дорожек в ходе развития неустойчивости зонального периодического течения и свободного слоя сдвига.

Проводится исследование мезомасштабной валиковой циркуляции и ее транспортных свойств в атмосферном пограничном слое [Вазаева и др., 2019]. С использованием модели WRF-ARW рассматривается характерный эпизод 28 июля 2007 г. в Калмыкии, охваченный наблюдениями экспедиции ИФА им. А.М. Обухова РАН. Отмечается развитие циркуляции, с существенной асимметрией по положительным и отрицательным компонентам поля скорости и спиральности. Квазидвумерные валиковые структуры отмечаются интенсификацией захвата и аккумуляции пыли, поднимающейся с подстилающей поверхности, и, наряду с интенсивными вихрями с вертикальной осью, являются существенным источником примесей в атмосфере. Захваченный мелкодисперсный аэрозоль способен переноситься на большие расстояния и образовывать аэрозольные слои.

Спиральность присуща множеству циркуляционных движений и структур в атмосферном пограничном слое (АПС), в котором она непрерывно воспроизводится вследствие совместного действия вращения Земли и трения, что связано с явлениями обратного каскада и крупномасштабной перестройки течений. Фактор спиральности требует его корректного учета при построении атмосферных моделей и, соответственно, необходимо знание о распределении спиральности в АПС и ее связи с динамическими атмосферными процессами. В работе [Вазаева и др., 2021] спиральность циркуляционных структур различного пространственного и временного масштаба в атмосферном пограничном слое определяется по результатам анализа данных полевых измерений. Качественное и количественное сравнения с измеренными значениями проводятся на основе результатов численного моделирования с помощью квазидвумерной модели и мезомасштабной атмосферной негидростатической модели WRF-ARW, в частности WRF-LES. Показана связь турбулентных характеристик и спиральности исследуемых структур.

В работе [Davydova et al., 2022] рассматриваются два обоснованных подхода к задаче численного моделирования распределения концентрации мелкодисперсного аэрозоля в спиральных вихревых структурах (валах) в пограничном слое атмосферы с целью оценки вклада вихревых структур в перенос аэрозолей через пограничный слой. На основе модельных данных получена оценка количества аэрозоля, переносимого вихревыми структурами.

Предложен теоретический подход на основе преобразования Абеля для вывода статистического распределения перепада давления в центре конвективных, в том числе пылевых вихрей, на основе измерений пиковых перепадов давления на наземной метеостанции при прохождении вихрей над или рядом с барометрическим датчиком. В работе [Kurgansky, 2019] показано, что если давление внутри вихря моделировать реалистично, то статистика наблюдаемых перепадов давления связана со статистикой перепадов давления в вихревых центрах субпопуляции вихрей, регистрируемых датчиком давления. Это соотношение справедливо для произвольного распределения пылевых вихрей по размерам и частотам. Эти теоретические результаты применены к трем сериям наблюдений марсианских конвективных вихрей, включая пылевые вихри, что позволяет определить не только средний диаметр вихря, но и все размерно-частотное распределение вихрей [Kurgansky, 2020a]. Численная плотность конвективных вихрей (количество вихрей на км^2) в месте посадки InSight на Марсе оценивается как метрика вихревой активности с использованием теоретического выражения, связывающего эту числовую плотность с зарегистрированным количеством близлежащих прохождений вихрей [Kurgansky, 2021b]. Получена очень высокая оценка средней за весь период наблюдаемой вихревой активности плотности числа вихрей – 56 вихрей на км^2. Принимая во внимание все неопределенности, связанные с этой количественной оценкой, последняя может быть уменьшена максимум примерно в два раза, но все равно остается на беспрецедентно высоком уровне. Пересмотрены теоретические основы экспоненциальных и степенных аналитических формулировок размерно-частотных и интенсивно-частотных распределений конвективных вихрей, в том числе пылевых вих-

рей [Kurgansky, 2022a]. Обсуждаются приложения к статистике конвективных вихрей, в том числе пылевых вихрей, на Земле и Марсе.

В работе (Kurgansky, 2020b) исследована гидродинамическая неустойчивость монохроматических инерционно-гравитационных волн (ИГВ) конечной амплитуды, распространяющихся под малыми углами как к вертикали, так и к горизонтали. В обоих случаях соответствующий угол служит малым параметром задачи, а неустойчивость исследуется методом Галеркина. Для внутренних гравитационных волн (ВГВ), распространяющихся под малым углом к вертикали, показано, что устойчивая стратификация плотности является стабилизирующим фактором, а вращение жидкости – дестабилизирующим. В исследовании [Harlander, Kurgansky, 2021] модель ВГВ низкого порядка используется для описания как линейной, так и так называемой немодальной переходной неустойчивости. Сделан вывод, что при полной рандомизации пучки мелких волн могут демонстрировать докритический рост при входе в турбулентное фоновое поле. Такие растущие и, в конечном итоге, разрушающиеся пучки волн могут добавить турбулентность к существующей фоновой турбулентности, возникающей из других источников нестабильности. Однако устойчивость переходного роста возмущений волнового пучка сильно зависит от степени рандомизации начальных условий, угла падения луча и длины волны возмущения.

Метод фазовых экранов широко применяется для моделирования распространения волн в неоднородных средах [Gorbunov et al., 2021]. В работе [Горбунов и др., 2020] проводится дальнейшее обобщение этого метода для 3-мерной задачи и предлагается метод сферических фазовых экранов.

В статье [Кан и др., 2020] проведена апробация методики восстановления глобального распределения статистических параметров внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере по данным измерений флуктуаций амплитуды радиосигнала в спутниковых радиозатменных наблюдениях. Восстанавливаемыми параметрами вертикального спектра ВГВ являются внешний масштаб, задающий в крупномасштабной области переход от ненасыщенного режима волн к насыщенному, и структурная характеристика, определяющая спектральную амплитуду волн в режиме насыщения. По этим параметрам вычисляются дисперсия флуктуаций температуры и потенциальная энергия волн. В данной статье приведено высотно-широтное распределение параметров ВГВ в стратосфере по данным измерений эксперимента COSMIC за 2011 г. Отмечены характерные особенности этих распределений, проведено сравнение результатов с данными других измерений.

В статье [Кан и др., 2020б] рассматривается методика восстановления параметров внутренних гравитационных волн (ВГВ) в стратосфере по флуктуациям амплитуды в спутниковых радиозатменных наблюдениях. В формировании флуктуаций радиосигнала в этих наблюдениях основную роль играют ВГВ, а вклад изотропной турбулентности пренебрежимо мал.

В работе [Nerushev et al., 2019] представлены результаты исследования пространственно-временной изменчивости основных характеристик струйных течений верхней тропосферы Северного и Южного полушарий в зоне обзора европейских геостационарных метеорологических спутников за период 2007–2017 гг. Основное внимание уделено их связи с температурой тропосферы, площадью морского льда и крупномасштабными атмосферными явлениями. Выявлены общие закономерности и существенные различия межгодовой изменчивости основных характеристик струйных течений в Северном и Южном полушариях.

В работе [Нерушев и др., 2021а] представлена статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений Северного полушария за период 2007–2019 гг. В основу модели положены результаты обработки данных измерений радиометра SEVIRI. В качестве предикторов для построения модели множественной линейной регрессии использовались площадь арктического морского льда, значения температуры тропосферы на разных уровнях и их разности между низкими и высокими широтами, различные индексы крупномасштабных процессов, характеризующие климатическую изменчивость. Детальный спектральный анализ стандартизованных рядов характеристик струйных течений и предикторов выявил присутствие периодических колебаний в широком спектральном диапазоне – от короткопериодных до длиннопериодных (30–50 мес.). Построена модель, описывающая весь спектр временных вариаций характеристик струйных течений, а также модель вариаций только длиннопериодной части.

Рассмотрена связь аномалий среднемесячной приземной температуры воздуха в 2017–2019 гг. на 147 метеорологических станциях Европы и 53 станциях Европейской территории России с характеристиками высотных струйных течений, определяемыми по данным измерений радиометра SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения в канале водяного пара с центром на 6.2 мкм [Нерушев и др., 2021в]. На основе статистического анализа показано, что наибольшая связь аномалий среднемесячной приземной температуры отмечается с аномалиями широты центра струйного течения. Отмечается также связь с аномалиями средней площади и эффективного времени жизни струйного течения.

Традиционно большое количество работ посвящено тропическому циклогенезу. Анимационный анализ данных глобального радиотеплового спутникового мониторинга, проведенный в

августе 2000 г., был использован для изучения процессов эволюции тропических циклонов в Северном полушарии [Ermakov et al., 2019]. Выявлена значительная роль тропосферных адвективных потоков скрытого тепла в быстрой интенсификации тропического циклона. Сформулированы предложения по дальнейшему совершенствованию методики анализа, направленного на детальное исследование отдельных фаз эволюции тропического циклона с использованием больших массивов радиотепловых дистанционных данных.

Представлены результаты анализа повторяемости тропических циклонов, вероятности трансформации во внетропические и их трендов в разных океанических бассейнах Северного и Южного полушарий по данным наблюдений для 50-летнего периода (1970–2019 гг.) [Мохов и др., 2020б]. Отмечены значимые тенденции увеличения повторяемости трансформации тропических циклонов во внетропические для Земли в целом. Проявляются особенности разных океанических бассейнов Северного и Южного полушарий. В том числе отмечен значимый тренд роста повторяемости событий трансформации для северо-западной акватории Тихого океана с выходом циклонов в прибрежные внетропические регионы Евразии, включая Дальний Восток. На фоне этого общего тренда проявляются существенные вариации для разных фаз явлений Эль-Ниньо.

Для оценки изменений энергетики тропических циклонов использовалась специальная характеристика – действие с размерностью [энергия] × [время] [Мохов, Порошенко, 2020]. Получены оценки изменений общего действия тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана по данным для периода 1951–2019 гг. Отмечено значительное увеличение межгодовой изменчивости действия тропических циклонов в последние десятилетия на фоне увеличения средних значений. Отмечены также тенденции увеличения действия тропических циклонов и тайфунов, достигающих внетропических широт, при значительных межгодовых вариациях.

В работе [Мохов, Порошенко, 2021а] получены статистические оценки связи времени существования и интенсивности тропических циклонов с использованием данных RSMC для периода 1951–2019 гг. Отмечено хорошее соответствие времени существования тропических циклонов, в том числе самых мощных из них – тайфунов, и их максимальной интенсивности для северо-западной части Тихого океана, выраженное в виде степенной зависимости. Аналогичные зависимости получены для тропических циклонов, трансформировавшихся во внетропические.

В статье [Sukhanovskii, Popova, 2020] лабораторные исследования посвящены роли конвективных валков в усилении потока тепла с моря. Появление когерентных конвективных структур типа термиков и валков регистрируется различными оптическими методами и измерениями температуры. Двумерные поля скорости используются для исследования структуры и характеристик течения. Тепловой поток от нагревательной пластины к жидкости измеряется напрямую. Полученные результаты наглядно показывают, что быстрая интенсификация лабораторного аналога тропического циклона тесно связана с процессом теплопереноса в пограничном слое. Образование вторичных конвективных структур резко увеличивает теплообмен и интенсивность конвективной циркуляции.

Особое внимание уделено нестационарной стадии формирования интенсивных циклонических вихрей [Evgrafova, Sukhanovskii, 2022b]. Передача углового момента играет ключевую роль в формировании циклонических и антициклонических течений; поэтому дан подробный анализ перераспределения и изменения углового момента. Временная эволюция потоков углового момента и полного углового момента сильно зависит от скорости вращения. Другим важным результатом является то, что вращающийся слой жидкости очень быстро адаптируется к новым граничным условиям (нагреву и охлаждению). Для достижения квазистационарного состояния требуется примерно два периода вращения. Обсуждается применение полученных результатов к эволюции реальных тропических циклонов.

Предлагается оригинальный подход для определения точного времени начала тропического циклогенеза [Левина, 2022]. Этот подход включает совместный анализ космических изображений облачности и соответствующих данных облачно-разрешающего численного моделирования для области развивающегося вихревого возмущения. Теоретической основой является фундаментальная гипотеза турбулентного вихревого динамо.

Полярные мезоциклоны, также известные как полярные циклоны (ПЦ), представляют собой важные морские мезомасштабные (диаметр по горизонтали до 1000 км) погодные системы в высоких широтах. Получены статистические оценки связи между характерными размерами и временем жизни полярных мезоциклонов (ПМЦ) с использованием данных STARS для периода 2002–2010 гг [Мохов, Порошенко, 2021б]. Предложено модельное объяснение степенной и экспоненциальной ,в простейшем случае линейной, зависимости для наиболее крупномасштабных и долгоживущих ПМЦ.

В работе [Vazaeva et al., 2020] рассмотрены возможные прогностические критерии ПЦ, в частности, кинематическая спиральность как квадрат характеристики, связанная с интегральными вихревыми образованиями и числом кинематической завихренности. Для расчета таких характеристик использовались данные реанализа и результаты численного моделирования с использованием модели WRF-ARW над Северными (Норвежским и

Баренцевым) морями. Для сравнения использованы экспериментальные данные. Критерии, связанные с завихренностью и спиральностью, проявляются в генезисе и развитии ПЦ достаточно четко. Эти критерии можно использовать для повышения эффективности и точности методов прогнозирования полярных циклонов.

На основании данных реанализа и результатов расчета по модели WRF-ARW проанализированы случаи полярных мезоциклонов над Норвежским и Баренцевым морями в 2013 г., в окрестностях Северной Земли в 2015 г., в прикромочной зоне моря Лаптевых в 2021 г. [Вазаева и др., 2022]. Подобрана комбинация критериев, достаточных для идентификации полярных мезоциклонов и анализа их размера и интенсивности в удобной и понятной форме: оценки спиральности как интегральной характеристики, относящейся к целостным вихревым образованиям, и кинематического числа завихренности. Данные критерии могут быть использованы для упрощения трудоемкой процедуры сбора первичных данных о полярных мезоциклонах для машинного обучения.

Орографические циркуляции ветра рассматривались в ряде работ. В статье [Shestakova, Debolskiy, 2022] рассмотрено влияние новоземельской боры на турбулентный теплообмен между атмосферой и океаном и на процессы в океане. Другая цель этого исследования – продемонстрировать чувствительность моделируемых турбулентных потоков во время боры для моделирования взаимодействия между атмосферой, океаном и морскими волнами. Бора оказывает существенное влияние на процессы в океане непосредственно у побережья, образуя сильное прибрежное течение и внося решающий вклад в образование плотных вод. В открытом море бора, а точнее, перераспределение полей ветра и температуры, вызванное орографией Новой Земли, приводит к уменьшению потерь теплосодержания океана за счет уменьшения турбулентного теплообмена по сравнению с экспериментом с равнинный рельеф.

В статье [Shestakova et al., 2022] представлен комплексный анализ эпизода фена, произошедшего над Шпицбергеном 30–31 мая 2017 г. Рассматриваются как формирование орографического ветра, так и потепление, вызванное феном. В частности, установлено, что потепление пропорционально высоте горных хребтов и распространялось далеко вниз по течению. Также наблюдалась сильная пространственная неоднородность фенового потепления с явным холодным следом, связанным с разрывными потоками вдоль горных долин и фьордов. Положительный дневной радиационный баланс на поверхности, увеличенный за счет фена, наряду с нисходящим потоком явного тепла, вызвал ускоренное таяние снегов в горных долинах, что предполагает потенциально большое влияние часто наблюдаемых фенов Шпицбергена на снежный покров и баланс тепла и массы ледника.

В статье [Shestakova, 2021] рассмотрены причины занижения скорости ветра моделью WRF-ARW при моделировании ураганов в Российской Арктике. Занижение скорости ветра в основном связано с неправильным заданием рельефа. Уменьшение длины шероховатостей в соответствии с наблюдениями приводит не только к количественному изменению скорости ветра в пограничном слое, но и к качественным изменениям динамики течения. Задание корректных значений рельефа и шероховатости в Тикси и других регионах, где наблюдаются склоновые бури (Новая Земля, Певек, остров Врангеля), привело к снижению погрешности моделирования скорости ветра более чем в 2.5 раза.

В статье [Shestakova, Repina, 2021] представлены результаты исследования озерной циркуляции над озером Байкал в декабре 2012 г., когда поверхность озера еще была свободна ото льда. Наиболее эффектным проявлением озерного эффекта стал мезомасштабный вихрь над северной частью озера. Анализ этого явления основан на спутниковых наблюдениях, натурных измерениях, а также на мезомасштабном численном моделировании с помощью модели WRF-ARW. Орография создала благоприятные условия для местных ветров и бризовой циркуляции и во многом сформировала неустойчивую температурную стратификацию за счет частичного блокирования набегающего потока.

В статье [Shestakova et al., 2020] исследуется морское волнение во время новоземельской боры с использованием статистического подхода. Статистический анализ данных высотомера у западного побережья Новой Земли во время боры показывает, что, несмотря на сильное ветровое воздействие, частота высот опасных волн была низкой из-за ограниченности выборки. Этот результат был подтвержден численным моделированием с высоким разрешением для двух т эпизодов боры.

В статье [Shestakova, Toropov, 2021] представлены результаты численного моделирования экстремальных осадков на южном побережье Каспийского моря с использованием модели WRF-ARW с реалистичными и идеализированными условиями, направленными на оценку орографических и озерных эффектов. Тесты на чувствительность показали, что эффект озера проявляется только при наличии орографии. Суммарный вклад теплого Каспийского моря и орографии в количество осадков составляет в среднем 50%.

На основе спутниковых данных и по результатам численного исследования на модели WRF-ARW проанализированы случаи мезомасштабной циркуляции над оз. Убсу-Нур (Увс-Нуур), Монголия, в ноябре 2016 г [Вазаева и др., 2022]. В этот промежуток времени, когда поверхность озера еще не полностью покрывалась льдом, несколько

дней наблюдался устойчивый мезомасштабный вихрь – яркое проявление озерного эффекта. Эксперименты по чувствительности выявили роль теплой поверхности озера и орографии в образовании и усилении вихрей. Орография близ Убсу-Нур достаточна для создания благоприятных условий для местной ветровой и бризовой циркуляции, и она в значительной степени формировала неустойчивую температурную стратификацию за счет частичного блокирования набегающего потока, играя преимущественную роль в формировании вихря за счет орографически индуцированной конвергенции.

4. МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ ДВИЖЕНИЯ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

В 1982 г. Ш. Лавджой опубликовал иллюстрацию к предложению Б. Мандельброта о том, как охарактеризовать отношение площади к периметру для сложных плоских форм. Было обнаружено, что показатель степени такого фрактала для определяемых спутниками и радарами дождевых облаков составляет 1.35, что близко к 4/3. Позднее оказалось, что такой же показатель степени характерен и для серебристых облаков. Такое значение может быть связано с классической теорией турбулентности 1941 года. Статья [Голицын и др., 2022] демонстрирует эту связь с использованием двух основных работ Колмогорова и Обухова. Выявлена роль префрактальных множителей, которые образуют пару своеобразных инвариантов для облачных полей и безразмерные числа самоподобия для этих полей размерами 1–106 км^2. Особенность заключается в их размерной зависимости и наличии небольшого количества инвариантов, а не обычных инвариантов в облачных формах.

В работе [Kuznetsov, Mikhailov, 2022] изучается процесс разрушения невязких течений несжимаемой жидкости вдоль твердого тела со скользящими граничными условиями. Такие скользящие течения можно считать сжимаемыми на твердой поверхности, где нормальная скорость обращается в нуль. Это является основной причиной образования особенности градиента компоненты скорости, параллельной жесткой границе. Показано, что максимальный градиент скорости экспоненциально растет со временем на жесткой границе с одновременным увеличением градиента завихренности по двойному экспоненциальному закону.

В работе [Vulfson and Nikolaev, 2022] построены аппроксимации турбулентных моментов атмосферного конвективного пограничного слоя на основе варианта локальной теории подобия. В качестве основных параметров этой теории используются второй момент вертикальной скорости и “спектральная” длина смешения Прандтля. Полученные аппроксимации турбулентных моментов следует рассматривать как естественное дополнение полуэмпирической теории турбулентности. Предложенные приближения следует рассматривать как прямое обобщение теории подобия Монина–Обухова в условиях свободной конвекции. Новые приближения сравниваются с соотношениями известных локальных теорий подобия, обсуждаются преимущества и ограничения новой теории. Сравнение аппроксимаций новой локальной теории подобия с данными натурных и лабораторных экспериментов свидетельствует о высокой эффективности предложенного подхода.

Прямое численное моделирование направленных гравитационных волн морской поверхности проводится в рамках потенциальных уравнений гидродинамики [Слюняев, Кокорина, 2020; Slunyaev, 2020]. Данные, полученные для условий глубокой воды, спектра JONSWAP, волн различной интенсивности и ширины направленного спектра, обрабатываются с акцентом на статистические и спектральные характеристики волн, а также на экстремальные явления. Показано, что динамический эксцесс (т.е. создаваемый свободной волновой составляющей) может вносить существенный вклад в аномально большие значения эксцесса поверхностного смещения, когда волны интенсивны, а спектр направленности относительно узок [Slunyaev, 2020]. В этой ситуации стохастическая динамика свободных волн является сильно негауссовой, а экстремальные события длятся аномально длительное время – до нескольких десятков характерных волновых периодов [Слюняев, Кокорина, 2020]. Долгоживущие когерентные структуры, в которых возникает большинство экстремальных волн, могут быть выявлены с использованием предложенного оконного подхода обратного рассеяния [Slunyaev, 2021]. Физические механизмы генерации волн–убийц и соответствующие математические модели; имеющиеся полевые данные; результаты прямого численного моделирования и лабораторных экспериментов; новые подходы к моделированию и прогнозированию экстремальных морских волнений рассмотрены и обсуждены в работе [Slunyaev, 2020]. Развита теория нелинейной самомодуляции гравитационных волн на водной поверхности, покрытой сжатым ледниковым покровом заданной толщины и плотности в бассейне постоянной глубины. Показано, что при определенных условиях модуляционная неустойчивость может развиваться из более коротких групп и за меньшие периоды волн, чем в ситуации глубоководных гравитационных волн на свободной поверхности воды [Slunyaev, Stepanyants, 2022].

Предложена простая модель развития субмезомасштабных возмущений в атмосферном пограничном слое (АПС) [Чхетиани, Вазаева, 2019]. Рост возмущений связан со сдвиговой алгебраической неустойчивостью профиля скорости ветра

в АПС. Поиск оптимальных значений таких возмущений (стриков) позволяет решить задачу об оценке их масштабов, которые оказываются порядка 100–200 м по вертикали и 300–600 м по горизонтали. Подобные масштабы отмечаются и для экспериментальных данных о структуре поля ветра в нижней части АПС, полученных в летнее время в 2017, 2018 гг. на Цимлянской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН при акустическом зондировании атмосферы доплеровским трехкомпонентным минисодаром высокого разрешения.

В статье [Шишов и др., 2021] приведены результаты многоточечных измерений пульсаций направления ветра и температуры воздуха в приземном слое на базе Цимлянской научной станции Института физики атмосферы им. Обухова РАН. Определены характерные размеры вихревых и тепловых структур, а также соотношение этих размеров в различных условиях. Подтверждена обнаруженная ранее зависимость характерных размеров структур от условий термической стратификации. Представлены визуализации двумерных полей температуры и направления ветра.

Экспериментально исследована связь между концентрацией аридного аэрозоля размером 0.2–0.4 мкм и напряженностью электрического на пустынной территории Калмыкии в 2020 г. [Malinovskaya, Chkhetiani, 2021]. Показано, что увеличение и уменьшение напряженности электрического поля связно с изменением скорости ветра и его направления относительно гребней дюн. Согласно аналитической оценке, относительное изменение напряженности электрического поля пропорционально квадрату числа образующихся микрочастиц.

Прямое моделирование турбулентности (DNS) и вихреразрешающее моделирование (LES) широко используются для описания турбулентных процессов в атмосфере. В работе [Глазунов и др., 2019] проанализированы данные численного моделирования устойчиво-стратифицированных турбулентных течений Куэтта при различных значениях числа Ричардсона. Для расчетов применены две различные технологии: прямое численное моделирование (DNS) и моделирование методом крупных вихрей (LES). Показано, что, независимо от метода расчета, наряду с хаотической турбулентностью, течения содержат крупные организованные структуры. В моделях зафиксирован рост турбулентного числа Прандтля при увеличении градиентного числа Ричардсона. Предлагается гипотеза, что именно эти структуры и служат физическим механизмом поддержания турбулентности при сверхкритически устойчивой стратификации.

В работе рассматривается релаксационное уравнение относительно волнового числа для полуэмпирических замыканий геофизической турбулентности [Мортиков и др., 2019]. Показано, что традиционное феноменологическое уравнение скорости диссипации кинетической энергии турбулентности можно рассматривать как аппроксимацию предложенного релаксационного уравнения для устойчиво-стратифицированных течений, находящихся в состоянии квазиравновесия. Предложенный подход допускает возможность уточнения турбулентных замыканий для пограничных слоев атмосферы и океана за счет задания равновесных состояний и релаксационных соотношений, согласованных с данными прямого и вихреразрешающего моделирования.

Рассмотрена задача моделирования двумерной изотропной турбулентности в периодической прямоугольной области, возбуждаемой силовой структурой заданного пространственного масштаба [Perezhogin et al., 2019]. Эту ситуацию можно рассматривать как простейший аналог крупномасштабной квазидвумерной циркуляции океана и атмосферы. Построение замыканий основано на априорном анализе DNS-решения и учитывает вид схемы пространственной аппроксимации, используемой в конкретной модели.

В статье [Дебольский и др., 2019] рассматриваются подходы к построению интегральных моделей конвективного пограничного слоя (КПС), основанных на концепции полной перемешанности. Для проверки основных гипотез подобия используются результаты вихреразрешающего моделирования. Показано, что поток кинетической энергии с верхней границы КПС, осуществляемый гравитационными волнами, мал по сравнению с другими составляющими баланса турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) в конвективном слое. Впервые применена параметризация генерации ТКЭ за счет сдвига скорости в конвективном пограничном слое в терминах скорости трения и средней скорости ветра в КПС; получены все безразмерные константы теоретической модели. Результаты работы позволяют сформулировать интегральную модель сдвигового КПС, пригодную для практического использования.

Проведены численные эксперименты с использованием метода LES нейтрально-стратифицированного турбулентного течения над поверхностью городского типа и пассивного скалярного переноса этим потоком [Glazunov et al., 2022a]. Построена многослойная модель турбулентного течения и турбулентной скалярной диффузии, усредненная по Рейнольдсу-Навье-Стоксу (RANS). Результаты модели RANS сравниваются с экспериментами LES. Показано, что предложенный подход позволяет прогнозировать среднюю скорость потока и концентрацию частиц внутри и над городским пологом.

В работе [Ткаченко и др., 2022] представлены результаты вихреразрешающего моделирования вечернего перехода в атмосферном пограничном слое в случае свободной конвекции и при наличии геострофического ветра. Проведен анализ баланса кинетической энергии турбулентности

(КЭТ) и динамики дисперсий компонент скорости, из которого следует существование интервалов быстрого и медленного затухания КЭТ. Показано, что одномерная (по вертикали) модель пограничного слоя, в которой турбулентные потоки параметризуются с помощью двухпараметрического замыкания на основе уравнений для КЭТ и скорости ее диссипации, не воспроизводит подобную динамику вечернего перехода.

Турбулентность всегда возникает в потоках маловязкой/крупномасштабной жидкости за счет сдвига скорости, а при неустойчивой стратификации – за счет сил плавучести. Принято считать, что оба механизма создают один и тот же тип хаотических движений, а именно, вихри распадаются на более мелкие и создают прямой каскад турбулентной кинетической энергии и других свойств от больших к малым масштабам в сторону вязкой диссипации. Традиционная теория, основанная на этом видении, дает правдоподобную картину вертикального перемешивания и продолжает использоваться с середины двадцатого века, несмотря на возрастающее количество доказательств ошибочности почти всех других предсказаний. В статье [Zilitinkevich et al., 2021] показано, что на самом деле плавучесть порождает хаотичные вертикальные плюмы, сливающиеся в более крупные и образующие обратный каскад по их преобразованию в самоорганизующиеся регулярные движения.

В работе [Zasko et al., 2022] исследованы оптимальные возмущения турбулентного устойчиво стратифицированного плоского течения Куэтта в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Ричардсона. Эти возмущения рассчитываются на основе упрощенной системы уравнений, в которой турбулентные напряжения Рейнольдса и тепловые потоки аппроксимируются изотропной вязкостью и диффузией с коэффициентами, полученными по результатам прямого численного моделирования. Показано, что развитие наклонных оптимальных возмущений обусловлено совместным действием эффекта подъема и невязкого механизма Орра. Обсуждается энергетика оптимальных возмущений. Показано, что наклонные оптимальные возмущения быстро рассеиваются после достижения максимального усиления энергии.

В статье [Glazunov et al., 2022b] представлены результаты вихреразрешающего моделирования (LES) нейтрально и устойчиво стратифицированных турбулентных потоков над поверхностями городского типа. Численные эксперименты проводились для различных форм обтекаемых объектов и при различной статической устойчивости. Предложен новый метод постановки численного эксперимента, направленный на изучение переноса тепла и импульса внутри слоя шероховатостей, а также на исследование теплового и динамического взаимодействия турбулентного потока с поверхностью в целом. Обсуждаются также физические механизмы, приводящие к поддержанию турбулентности над пологом при сильном охлаждении поверхности.

Ряд работ посвящен новым методам экспериментального исследования атмосферной турбулентности. В статье [Shelekhov at al., 2022] рассматриваются возможности использования квадрокоптера в режиме зависания для маловысотного зондирования атмосферной турбулентности с высоким пространственным разрешением в городских районах, характеризующихся сложной орографией. Исследования проводились в разные времена года (зима, весна, лето и осень). Расхождения в данных, полученных с квадрокоптера и ультразвуковых метеостанций на территории со сложной орографией, объясняются частичной корреляцией рядов скоростей ветра в разных точках измерений и влиянием неоднородной поверхности. В статье [Шелехов и др., 2021] показана возможность использования телеметрии малоразмерных БПЛА для контроля над состоянием атмосферной турбулентности. Установлено, что спектры турбулентности, полученные с помощью ультразвукового анемометра и квадрокоптера, в целом совпадают, а незначительные различия наблюдаются в высокочастотной области спектра. В работе [Shelekhov at al., 2021] показана возможность использования малых БПЛА с поворотным крылом для мониторинга состояния атмосферной турбулентности на разных высотах. При определении продольных и поперечных масштабов турбулентности на высотах 4, 10 и 27 м использовался метод наименьших квадратов с использованием модели фон Кармана в качестве кривой регрессии. Условие, описывающее соотношение продольного и поперечного масштабов в изотропной атмосфере, выполняется с достаточной точностью.

В статье [Evgrafova, Sukhanovskii, 2022b] представлены результаты лабораторного моделирования процессов теплопереноса в условиях идеализированного городского ландшафта. Оценка определяющих параметров проводилась с использованием коэффициентов вихревого переноса, общих для пограничного слоя атмосферы. Изучен процесс охлаждения поверхности модели города после длительного нагревания инфракрасным излучением. Ключевым вопросом является временная зависимость температуры поверхности от типа городской застройки.

В статье [Репина, Артамонов, 2020] рассматриваются результаты прямых измерений турбулентных потоков на антарктической станции Беллинсгаузен в летние сезоны 2002, 2003, 2007 и 2009 гг. Исследуются особенности энергообмена для этих сезонов, а также межгодовая и внутрисезонная изменчивость характеристик энергообмена. Установлено, что основными факторами, влияющими на энергообмен атмосферы и подстилающей поверхности в прибрежной зоне Ан-

тарктики, являются синоптическая ситуация и состояние подстилающей поверхности (продолжительность бесснежного сезона и наличие мохового покрова).

В статье [Drozd et al., 2022] рассмотрены условия применимости теории подобия Монина–Обухова для расчета турбулентных потоков над неоднородным городским ландшафтом. Установлено, что турбулентные колебания составляющих скорости ветра усиливаются с высотой в пределах 20 метров над поверхностью. Турбулентная кинетическая энергия пропорциональна квадрату средней скорости горизонтального ветра. Коэффициент сопротивления определяется типом поверхности в области футпринта и имеет значение 0.08 и 0.05 для урбанизированных и покрытых растительностью поверхностей соответственно. Турбулентный поток теплового потока достаточно хорошо прогнозируется с помощью диагностической связи с тепловым потоком, асимметрией и стандартным отклонением вертикальной скорости, что предполагает значительный вклад когерентных структур в турбулентные потоки.

В статье [Barskov et al., 2022] представлены результаты многоуровневых измерений, проведенных над степью и над сложной городской местностью. Проанализирована связь между параметром устойчивости и статистическими свойствами атмосферной турбулентности. Над степью безразмерные турбулентные моменты вплоть до третьего порядка подчиняются теории подобия Монина–Обухова. Над городским ландшафтом для всех направлений ветра третий момент хорошо соответствует теоретической кривой в случаях устойчивой и неустойчивой стратификации, но имеется широкий разброс данных в условиях, близких к нейтральным. Асимметрия вертикальной составляющей скорости в условиях городского ландшафта отрицательна, и ее значение зависит от направления ветра. Связь между вторым и третьим моментами существует даже в устойчивых пограничных слоях над неоднородным ландшафтом. В работе [Barskov et al., 2019] представлены экспериментальные результаты турбулентного теплообмена между небольшим замерзшим озером, окруженным лесом, и пограничным слоем атмосферы. Отчетливо выделяются два режима формирования теплового потока в приземном слое. В условиях одновременной горизонтальной адвекции теплого воздуха в пограничном слое над пологом турбулентная диффузия отрицательного теплового потока вниз приводит к увеличению отрицательного потока явного тепла в приземном слое, сопровождаемому увеличением третьего момента. При этом возрастает вклад когерентных структур. Разработана модификация теории подобия Монина–Обухова с учетом непостоянства потоков в приземном слое.

5. ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НИЖНИХ, СРЕДНИХ И ВЕРХНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ

В статье [Kosyakov et al., 2019] анализируются экспериментальные данные об акустических сигналах, зарегистрированных при взрывах и выбросах вещества на высотах 120–150 км. Отмечается, что значительная часть акустической энергии высотных взрывов достигает поверхности Земли без существенного поглощения. На основе анализа нелокальной трехпоточной газодинамической модели трансформации сильной взрывной волны в воздухе в непрерывное возмущение предложена гипотеза о последовательном распаде волны от высотного взрыва на волновые пакеты. Значительная часть энергии взрыва должна передаваться такими волновыми пакетами при их движении сверху вниз по атмосфере, которая должна быть практически “прозрачна” для подобных акустических возмущений.

Проанализированы динамические процессы в стратосфере над Арктикой в зимний сезон 2017/2018 г. с использованием данных реанализа NCEP и результатов измерений с помощью спутниковых приборов SABER и MLS. Выявлены следующие особенности: отражение потоков волновой активности из стратосферы в тропосферу над Канадой в конце декабря 2017 г. и в начале января 2018 г., главное внезапное стратосферное потепление в феврале 2018 г. с изменением направления зонального ветра, с разделением стратосферного полярного вихря, с распространением аномалий циркуляции стратосферы до нижней тропосферы, с похолоданием в мезосфере, с изменением высоты стратопаузы и со снижением температуры нижней стратосферы в тропиках [Варгин, Кирюшов, 2019].

В [Варгин и др., 2021a, Vargin at al., 2022a] показано, что арктическая стратосферная зима 2021–2022 гг. характеризовалась устойчивым холодным стратосферным полярным вихрем с объемом полярных стратосферных облаков (ПСО), близким к максимальным значениям с 1980 г., до начало небольших явлений внезапного стратосферного потепления (ВСП) в конце февраля и начале марта и крупного ВСП 20 марта. Зимний сезон 2020–2021 г. в стратосфере Арктики характеризовался стратосферным полярным вихрем, ослабленным в начале января в результате главного внезапного стратосферного потепления, сопровождавшегося усилением Алеутского антициклона. Как малые, так и крупные события ВСП привели к ослаблению остаточной меридиональной циркуляции в верхней арктической стратосфере и ее усилению в средней и нижней стратосфере, что способствовало дополнительному потеплению приполярной области и ослаблению полярного вихря. После ВСП, продолжавшегося около 3 недель, и до конца зимнего сезона ниж-

няя стратосферная температура внутри стратосферного полярного вихря оставалась выше необходимой для образования полярных стратосферных облаков.

В работе [Лукьянов и др., 2021а] представлены результаты применения лагранжевых методов исследования тонкой динамической структуры стратосферного полярного вихря в зимне-весенний период 2019–2020 гг. Вследствие низкой активности планетарных волн, полярный вихрь в 2019–2020 гг. оставался устойчивым вплоть до конца апреля, что создало условия для рекордного разрушения озона в Арктике. Представлены вариации горизонтальной динамической структуры, полученной с помощью метода заполнения пространства обратными траекториями, и силы вихря, представленной в виде М-функции, в зависимости от времени и высотного уровня. Также представлены вариации озона и термодинамических параметров, осредненные по ансамблю траекторий внутри вихря, с использованием данных реанализа ERA5.

С использованием данных пяти пятидесятилетних расчетов 5-й версии климатической модели ИВМ РАН для современного климата анализируется межгодовая изменчивость характеристик стратосферного полярного вихря в Арктике и дат весенней перестройки циркуляции стратосферы по сравнению с данными реанализа [Варгин и др., 2020а]. Ранние перестройки сопровождаются более сильной волновой активностью по сравнению с поздними. Зимние сезоны с максимальным объемом воздуха в полярной стратосфере и условиями, достаточными для формирования полярных стратосферных облаков, в среднем характеризуются ранними весенними перестройками.

Комплексный анализ ослабления/усиления арктических стратосферных полярных вихрей с их влиянием на тропосферу показывает сдвиг к экватору/полюсу траектории штормов в Северной Атлантике [Vargin et al., 2022b]. В ответ на недавнее усиление арктических явлений при сравнении двух периодов: 1998–2014 и 1980–1997 гг. было выявлено смещение к полюсам траектории тихоокеанских штормов и ослабление североатлантической траектории штормов.

Исследован отклик стратосферы Арктики на климатическое явление Эль-Ниньо с учетом его восточно- и центрально-тихоокеанского типов за период 1950–2005 гг. на основе регрессионного и композитного анализа с использованием расчетов шести совместных климатических моделей проекта CMIP5 и данных реанализа [Коленникова и др., 2021]. По результатам пяти 50-летних расчетов с 5-й версией совместной климатической модели ИВМ РАН показано, что зимние сезоны с явлением Эль-Ниньо характеризуются более высокой температурой арктической стратосферы по сравнению с сезонами с Ла-Нинья. Зимним сезонам с положительными аномалиями температуры поверхности в северной части Тихого океана соответствует более низкая температура стратосферы в арктических районах по сравнению с сезонами с отрицательными аномалиями температуры воды [Варгин и др., 2021б].

Анализ динамических процессов и изменений озонового слоя в арктической стратосфере зимой 2019–2020 гг. проводился с использованием численных экспериментов с химико-транспортной моделью (ХТМ) и данных реанализа [Smyshlyaev et al., 2021]. Результаты численных расчетов, выполненных по нескольким сценариям учета химического разрушения озона, показали, что как динамические и химические процессы вносят значительный вклад в изменения озона как в восточном, так и в западном полушариях.

С использованием данных спутникового мониторинга озонового слоя TOMS/OMI, реанализа MERRA-2 и аэрологического зондирования вертикального распределения озона и температуры на Южном полюсе проведено исследование изменчивости параметров антарктической озоновой аномалии. Анализируются динамические процессы в стратосфере Антарктики, определяющие условия для сильного разрушения озонового слоя, которое за последние 8 лет, несмотря на уменьшение концентраций озоноразрушающих веществ, наблюдалось в Антарктике в 2011 и 2015 гг. [Варгин и др., 2020б].

Трехмерный (3D) анализ планетарных волн может предоставить более региональную информацию о динамических взаимодействиях стратосферы и тропосферы [Wei et al., 2021]. Восходящий поток волн из тропосферы в стратосферу максимален над северо-восточной Евразией, тогда как нисходящий поток происходит в основном над регионом Северной Америки и Северной Атлантики, который намного сильнее в середине–конце зимы. Это распределение определяется волновыми взаимодействиями между различными волновыми числами планетарных волн, особенно между волновым числом 1 и волновым числом 2.

В статье [Vyazankin et al., 2020] представлены прогностические возможности модели глобального климата SOCOL. В работе [Цветкова и др., 2021] приведены оценки химического разрушения озона в зимне-весенние сезоны для стратосферы Арктики на базе многолетних данных наблюдений вертикального распределения озона. Проанализированы особенности и возможные причины необычайно сильного и устойчивого стратосферного полярного вихря в Арктике в зимний сезон 2019/2020 г., приведшего к рекордному за последние годы разрушению озонового слоя, и связанные с этим полярным вихрем динамические процессы. Для достижения лучшего согласования смоделированной динамики стратосферы арктической зимы с наблюдениями в CCM SOCOL была включена процедура ассимиляции [Tsvetkova et al., 2020]. Траектории, основанные

на результатах расчетов SOCOL, демонстрируют разумное согласие с траекториями, основанными на данных реанализа внутри полярного вихря. То есть модель может быть использована для анализа и прогноза процессов, связанных с озоном в зимне-весенние сезоны. Полученные результаты анализа нескольких последних крупных событий ВСП в Арктике показывают, что CCM SOCOL может использоваться для прогноза ВСП на период до 8 дней.

В статье [Лукьянов и др., 2021б] представлено краткое описание и некоторые результаты применения траекторной и дисперсионной транспортных моделей, разработанных в ЦАО для исследования процессов переноса примесей в стратосфере и тропосфере. Модели используют в Региональном информационно-аналитическом центре "Средняя атмосфера", созданном в Центральной аэрологической обсерватории. На основе результатов моделирования с использованием траекторной модели TRACAO выполнен сравнительный анализ эволюции стратосферных полярных вихрей зимой 2015/2016 и 2018/2019 гг. [Варгин и др., 2020с].

Изменчивость общего содержания озона в Арктике зимой 2015/2016 г. изучена с использованием данных национальной сети, оснащенной фильтро-озонометрами М-124 и спутникового мониторинга [Никифорова и др., 2019]. По данным отечественной сети фильтровых озонометров М-124 и результатам спутникового мониторинга исследована изменчивость общего содержания озона в Арктике в зимний сезон 2015/2016 г. Проанализировано развитие в конце января 2016 г. первой за всю историю наблюдений озоновой мини-дыры, возникшей в первом полугодии. Представлен анализ причин наблюдавшейся изменчивости общего содержания озона над территорией России в первом квартале 2016 г., проведено сопоставление со значительными озоновыми аномалиями в Арктике в 1996/1997 и 2010/2011 гг.

В работах [Нерушев, Ивангородский, 2019; Nerushev et al., 2020] изложен метод определения зон турбулентности в верхней тропосфере по данным измерений собственного излучения атмосферы с геостационарных метеорологических спутников и при использовании корреляционно-экстремальных алгоритмов. Приводятся результаты расчетов среднемесячных площадей зон турбулентности с различными значениями коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии за 2007–2017 гг. в зоне обзора спутников. Показано, что на протяжении последних 11 лет происходило существенное увеличение площади областей, занятых сравнительно слабой и умеренной турбулентностью, и некоторое уменьшение площадей с сильной и очень сильной турбулентностью. Выявлена тесная связь межгодовой изменчивости среднемесячных значений площадей зон турбулентности с соответствующей изменчивостью характеристик струйных течений. Выявлена связь изменчивости турбулентности с изменчивостью температуры верхней тропосферы. В этом случае влияние температуры на турбулентность проявляется косвенно через характеристики реактивного течения.

В статье [Chkhetiani, Shalimov, 2022] предложена простая двумерная модель, позволяющая указать причину аномальных амплитуд движения ветра в нижней ионосфере. Модель основана на существовании установившегося экмановского профиля ветра на высотах мезосферы–термосферы.

6. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА

В работе [Володин, Грицун 2020] рассматриваются результаты моделирования изменений климата в 2015–2100 гг. с помощью климатической модели ИВМ РАН INM-CM5. Анализируется изменение среднеглобальной температуры и географического распределения температуры и осадков. Показано, что величина глобального потепления для рассматриваемых сценариев, предсказываемая моделью INM-CM5, меньше, чем величина потепления согласно другим моделям CMIP6. Показано, что летом именно на территории России температура самого жаркого месяца может расти быстрее, чем среднесезонная температура. Рассматривается изменение площади морского льда в Арктике и показано, что, согласно данным моделирования, ни при каком сценарии не происходит полного освобождения Северного Ледовитого океана ото льда в XXI в. Исследуются изменения меридиональной функции тока в атмосфере и в океане.

В статье [Vorobyeva, Volodin, 2021] представлено исследование прогнозируемости продолжительности и температуры зимних сезонов с помощью климатической модели ИВМ РАН INM-CM5. Проведено сравнение корреляции среднемноголетних зимних аномалий основных переменных в нескольких регионах с аналогичными результатами модели ПЛАВ. Показано увеличение корреляции аномалий за годы с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Показано, что стратосферная изменчивость вносит значительный вклад.

Современные климатические модели демонстрируют большие расхождения в равновесной чувствительности климата (ECS) [Volodin, 2021]. Было исследовано влияние изменений параметризации облачности на ECS в климатической модели ИВМ РАН INM-CM4-8. Эта модель демонстрирует самую низкую ECS среди моделей CMIP6. Тремя основными механизмами, ответственными за увеличение ECS, были увеличение рассеивания облачности в более теплом климате из-за увеличения дефицита водяного пара в безоблачной части ячейки, уменьшение образования облачности в пограничном слое атмосферы в теп-

лом климате и мгновенная реакция облаков. CO_2 увеличивается из-за изменений стратификации.

Проведен анализ изменений стока двух рек – Амура и Селенги – в XXI в. по расчетам с ансамблем климатических моделей CMIP6 с использованием байесова подхода в сравнении с данными гидропостов о годовом стоке и данными архива GPCP-2.3 о годовом количестве осадков над водосборами на разных временных масштабах [Липавский и др., 2022]. Для обоих водосборов большие межмодельные различия связаны с оценками и многолетнего среднего стока, и межгодовой изменчивости. Межмодельное распределение байесовых весов указывает на большую роль неопределенности, связанной с начальными условиями для модельных расчетов. Для полного стока в бассейне Амура проявляется положительный тренд в XXI в. при всех проанализированных сценариях антропогенного воздействия. Для полного стока Селенги тренды в XXI в. при всех использованных сценариях антропогенного воздействия на систему не выявлены. Значимые тренды для поверхностного стока Амура и Селенги не выявлены при всех алгоритмах учета байесовых весов и сценариях антропогенных воздействий. При этом отмечены существенные междесятилетние вариации межгодовой изменчивости стока.

Проведен анализ продолжительности навигационного периода (ПНП) на Северном морском пути (СМП) в 21 веке на основе моделей ансамбля CMIP5 при сценарии RCP 8.5 с использованием методов байесового осреднения с выделением различных участков СМП [Парфенова и др., 2022]. Получено, что различия качества воспроизведения моделями ПНП и ее изменений в западной части СМП больше, чем в восточной. Ансамблевое среднее для ПНП получено в диапазоне 3–4 мес в середине XXI века с увеличением до примерно 6 мес к концу века. Совместный учет качества воспроизведения моделями характеристик климата на всех временных масштабах (многолетнее среднее, межгодовые вариации, линейный тренд) в сравнении со спутниковыми данными позволяет уменьшить межмодельное стандартное отклонение вдвое для западной части СМП и в полтора раза – для восточной.

В работе [Денисов и др., 2022] получены модельные оценки вклада антропогенных и природных потоков парниковых газов с территории разных стран в глобальные изменения климата в XXI в. при различных сценариях антропогенных воздействий. Сделаны количественные оценки влияния учета изменений региональных климатических условий на интенсивность обмена парниковыми газами между атмосферой и естественными экосистемами на разных временных горизонтах в сопоставлении с антропогенными эмиссиями. Для России, Китая, Канады и США во второй половине XXI в. поглощение CO_2 природными экосистемами уменьшается при всех сценариях антропогенного воздействия с ослаблением соответствующего стабилизирующего климат эффекта. При этом, согласно модельным оценкам, эмиссия метана в атмосферу болотными экосистемами в анализировавшихся регионах в XXI в. значительно увеличивается. Как следствие, суммарный эффект естественных потоков парниковых газов в атмосферу для отдельных регионов может ускорять потепление.

Разработана стационарная вычислительно эффективная схема ChAP 1.0 для круговорота серы в тропосфере [Eliseev et al., 2021]. Эта схема предназначена для моделей Земной системы средней сложности. Схема учитывает выбросы диоксида серы в атмосферу, ее выпадение на поверхность, окисление до сульфатов, а также сухое и влажное выпадение сульфатов на поверхность. Расчеты по схеме обусловлены антропогенными выбросами диоксида серы в атмосферу за 1850–2000 гг., взятыми из набора данных CMIP5, и метеорологией ERA-Interim, предполагающей, что естественные источники серы в атмосферу остаются неизменными в течение этого периода. Модель разумно воспроизводит характеристики тропосферного цикла серы, известные из этих источников информации. Признаны ограничения схемы и определены перспективы дальнейшего развития. Несмотря на свою простоту, ChAP может успешно использоваться для моделирования антропогенного загрязнения атмосферы серой в грубых пространственных и временных масштабах. В статье (Елисеев и др., 2019) уточнены ранее полученные с климатической моделью ИФА им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) результаты, связанные с влиянием сернистого газа атмосферы на наземный углеродный цикл. Ввиду недоступности глобальных данных о приземной концентрации SO_2 она была восстановлена по соответствующим данным о приземной концентрации сульфатов с использованием статистической модели, коэффициенты которой были подобраны по расчетам с моделью химии атмосферы RAMS-CMAQ. Наиболее значимое влияние SO_2 на характеристики наземного углеродного цикла выявлено на юго-востоке Северной Америки и в Европе. При этом такое влияние на юго-востоке Азии существенно слабее, чем было получено ранее, что связано с завышением влагосодержания атмосферы КМ ИФА РАН в этом регионе.

Используя результаты расчетов 5-й версии совместной климатической модели ИВМ РАН CM5 с 2015 г. по 2100 г., выполненных в рамках проекта CMIP6 по умеренному (SSP2-4.5) и экстремальному (SSP5-8.5) сценарию роста концентраций парниковых газов, исследуется отклик шторм-треков Северного полушария на изменения климата, а также на усиление и ослабление арктического стратосферного полярного вихря [Мартынова и др., 2022]. При умеренном сценарии к концу XXI века ожидается существенный

сдвиг обоих шторм–треков к северу, а также небольшое усиление Северо-Тихоокеанского и ослабление Северо-Атлантического шторм–трека. При экстремальном сценарии отклик обоих шторм–треков проявляется через их усиление и в меньшей степени через сдвиг к северу. Выявлено различие в отклике Северо-Тихоокеанского и Северо-Атлантического шторм–треков на усиление и ослабление стратосферного полярного вихря в разных климатических условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом обзоре рассмотрены статьи, относящиеся к области динамической метеорологии или тесно связанной с ней, авторами/соавторами которых являются российские ученые, и которые были опубликованы в 2015–2018 гг. в рецензируемых журналах (изданиях), проиндексированных в базах данных WoS и/или Scopus. Обзор был бы невозможен без участия и поддержки со стороны большого числа российских ученых, которым выражаю искреннюю благодарность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акперов М.Г., Елисеев А.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Парфенова М.Р., Кенинг Т. Потенциал ветровой энергетики в арктических и субарктических широтах и его изменение в XXI веке по расчетам с использованием региональной климатической модели // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 18–29.

Акперов М.Г., Мохов И.И., Дембицкая М.А., Парфенова М.Р., Ринке А. Особенности температурной стратификации в тропосфере арктических широт по данным реанализа и модельных расчетов // Метеорология и гидрология. 2019а. №. 2. С. 19–27.

Акперов М.Г., Семенов В.А., Мохов И.И., Парфенова М.Р., Дембицкая М.А., Бокучава Д.Д., Ринке А., Дорн В. Влияние океанического притока тепла в Баренцево море на региональные изменения ледовитости и статической устойчивости атмосферы // Лед и Снег. 2019б. Т. 59. № 4. С. 529–538.

Бекряев Р.В. Статистические аспекты количественной оценки полярного усиления. I. Отношение трендов // Метеорология и гидрология. 2022. Т. 47. № 6. С. 419–427.

Вазаева Н.В., Репина И.А., Шестакова А.А., Ганбат Г. Мезомасштабный вихрь над озером Убсу-Нур (Увс-Нуур): анализ и численное моделирование // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022а. Т. 19. № 4. С. 306–317.

Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Дурнева Е.А. О критериях идентификации полярных мезоциклонов // Метеорология и гидрология. 2022б. № 4. С. 20–33.

Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Курганский М.В., Каллистратова М.А. Спиральность и турбулентность в атмосферном пограничном слое // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 34–52.

Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О. Организованная валиковая циркуляция и перенос минеральных аэрозолей в атмосферном пограничном слое // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 2. С. 17–31.

Варгин П.Н., Кирюшов Б.М. Внезапное стратосферное потепление в Арктике в феврале 2018 г. и его влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 41–56.

Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Ракушина Е.В., Володин Е.М., Погорельцев А.И. Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и параметров стратосферного полярного вихря в Арктике по данным моделирования и реанализа // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020а. Т. 56. № 5. С. 526–539.

Варгин П.Н., Никифорова М.П., Звягинцев А.М. Изменчивость антарктической озоновой аномалии в 2011–2018 гг // Метеорология и гидрология. 2020б. № 2. С. 20–34.

Варгин П. Н., Лукьянов А. Н., Кирюшов Б. М. Динамические процессы в стратосфере Арктики в зимний сезон 2018/19 г // Метеорология и гидрология. 2020с. № 6. С. 5–18.

Варгин П.Н., Гурьянов В.В., Лукьянов А.Н., Вязанкин А.С. Динамические процессы стратосферы Арктики зимой 2020–2021 г // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021а. Т. 57. № 6. С. 651–664.

Варгин П.Н., Коленникова М.А., Кострыкин С.В., Володин Е.М. Влияние аномалий температуры поверхности экваториальной и северной частей Тихого океана на стратосферу над Арктикой по расчетам климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и гидрология. 2021б. № 1. С. 5–16.

Володин Е.М., Грицун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 3. С. 255–266.

Глазунов А.В., Мортиков Е.В., Барсков К.В., Каданцев Е.В., Зилитинкевич С.С. Слоистая структура устойчиво стратифицированных турбулентных течений со сдвигом скорости // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 4. С. 13–26.

Голицын Г.С. Вероятностные структуры макромира: землетрясения, ураганы, наводнения // М.: Физматлит. 2021. 174 с.

Голицын Г.С., Чхетиани О.Г., Вазаева Н.В. Облака и теория турбулентности: самоподобие, показатель фрактала 4/3 и инварианты // Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 2. С. 242–244.

Горбунов М.Е., Коваль О.А., Мамонтов А.Е. Метод сферических фазовых экранов для моделирования расходящихся волновых пучков в неоднородных средах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 1. С. 66–75.

Дебольский А.В., Степаненко В.М., Глазунов А.В., Зилитинкевич С.С. Интегральные модели проникающей конвекции со сдвигом скорости // Известия

Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 2. С. 3–16.

Демчев Д.М., Кулаков М.Ю., Макштас А.П., Махотина И.А., Фильчук К.В., Фролов И.Е. Верификация данных реанализов ERA-Interim и ERA5 о приповерхностной температуре воздуха в Арктике // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 36–45.

Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Модельные оценки вклада в глобальные изменения климата в XXI в. естественных и антропогенных эмиссий CO2 и CH4 в атмосферу с территории России, Китая, Канады и США // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 18–32.

Дианский Н.А., Степанов Д.В., Фомин В.В., Чумаков М.М. Циркуляция вод у северо-восточного побережья острова Сахалин при прохождении трех типов глубоких циклонов над Охотским морем // Метеорология и гидрология. 2020. № 1. С. 45–58.

Дурнева Е.А., Чхетиани О.Г. Планетарная высотная фронтальная зона в Атлантико-Европейском секторе в летние сезоны в 1990–2019 гг // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 24–33.

Елисеев А.В., Тимажев А.В., Хименес Л.П. Вертикальный масштаб для профилей водяного пара и соединений серы в нижней тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 7(402). С. 572–580.

Елисеев А.В., Чжан М., Гизатуллин Р.Д., Алтухова А.В., Переведенцев Ю.П., Скороход А.И. Влияние сернистого газа в атмосфере на наземный углеродный цикл // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 41–53.

Иванова А.Р. Влияние обледенения на функционирование авиационного транспорта: состояние вопроса и проблемы прогнозирования // Метеорология и гидрология. 2021. № 7. С. 59–78.

Иванова А.Р. Мировой опыт наукастинга грозовой деятельности // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 71–83.

Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н., Комаско Н.И., Завьялова А.А. Использование системы COSMO-RU для прогноза обледенения воздушных судов над территорией Российской федерации // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 30–45.

Ингель Л.Х. О динамике инерционных частиц в интенсивных атмосферных вихрях // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021а. Т. 57. № 6. С. 632–640.

Ингель Л.Х. Пограничный слой экмановского типа над анизотропной подстилающей поверхностью // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021б. Т. 14. № 1. С. 63–66.

Ингель Л.Х. Возникновение вихревого движения, обусловленное дифференциальной диффузией // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 36–40.

Ингель Л.Х. О динамике концентрации тяжелых частиц в интенсивных вихревых течениях // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022а. Т. 58. № 4. С. 396–402.

Ингель Л.Х. Стратифицированные течения, обусловленные пространственными неоднородностями коэффициентов обмена // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022б. Т. 58. № 1. С. 22–26.

Ингель Л.Х., Макоско А.А. Оценки влияния неоднородностей силы тяжести на тепловой режим пограничного слоя атмосферы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 1. С. 83–87.

Исследование природной среды высокоширотной Арктики на НИС “Ледовая база мыса Баранова” / Ред. Макштас А.П., Соколов В.Т. СПб: 2021. ААНИИ, 260 с.

Калашник М.В. Излучательная неустойчивость баротропного струйного течения в стратифицированной вращающейся атмосфере // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 3–10.

Калашник М.В. Экмановское трение и формирование верхнетропосферных зональных течений // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 5. С. 514–525

Калашник М.В., Куличков С.Н. О возмущениях давления, вызываемых движущимся тепловым источником фронтального типа (гидростатический режим) // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 51–61.

Калашник М.В., Курганский М.В., Чхетиани О.Г. Бароклинная неустойчивость в геофизической гидродинамике // Успехи физических наук. 2022. Т. 192. № 10. С. 1110–1144.

Калашник М.В., Чхетиани О.Г. Нестационарные вихревые дорожки в сдвиговых течениях // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 127–138.

Калинин Н.А., Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Костарев С.В., Быков А.В. Условия возникновения сильных шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы в лесной зоне Европейской части России и Урала // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 35–49.

Калмыкова О.В., Федорова В.В., Фадеев Р.О. Анализ условий возникновения вспышки смерчей над Черным морем 16 июля 2019 года и оценка успешности прогноза // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021а. № 1 (379). С. 112–129.

Калмыкова О.В. Методика оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья России и результаты ее испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2021б. № 48. С. 42–61.

Калмыкова О.В., Шершаков В.М., Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я. Автоматизированный прогноз смерчей у Черноморского побережья России: первый опыт и оценка его результативности // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 84–94.

Кан В., Горбунов М.Е., Федорова О.В., Софиева В.Ф. Широтное распределение параметров внутренних волн в атмосфере по флуктуациям амплитуды радиозатменных сигналов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020а. Т. 56. № 6. С. 647–659.

Кан В., Горбунов М.Е., Шмаков А.В., Софиева В.Ф. Восстановление параметров внутренних волн в атмосфере по флуктуациям амплитуды сигнала в радиозатменном эксперименте // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020б. Т. 56. № 5. С. 499–513.

Коленникова М.А., Варгин П.Н., Гущина Д.Ю. Влияние Эль-Ниньо на стратосферу Арктики по данным моделей CMIP5 и реанализа // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 5–23.

Курганский М.В. Отклик атмосферной циркуляции на аномалии притоков тепла в двумерной бароклинной модели атмосферы // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 1. С. 43–54.

Курганский М.В., Крупчатников В.Н. Российские исследования в области динамической метеорологии в 2015–2018 гг // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 6. С. 6–47.

Курганский М.В. К теории симметричной неустойчивости периодических по времени течений с точным учетом силы Кориолиса // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, № 4. С. 384–395.

Левина Г.В. Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения тропических циклонов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15. № 2. С. 47–59.

Липавский А.С., Елисеев А.В., Мохов И.И. Байесовы оценки изменения стока Амура и Селенги в XXI веке по результатам ансамблевых модельных расчетов CMIP6 // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 64–82.

Лукьянов А.Н., Варгин П.Н., Юшков В.А. Исследование с помощью лагранжевых методов аномально устойчивого арктического стратосферного вихря, наблюдавшегося зимой 2019–2020 гг // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021а. Т. 57. № 3. С. 278–285.

Лукьянов А.Н., Ганьшин А.В., Юшков В.А., Вязанкин А.С. Траекторное моделирование средней атмосферы // Метеорология и гидрология. 2021б. № 9. С. 95–104.

Мартынова Ю.В., Варгин П.Н., Володин Е.М. Изменение шторм–треков Северного полушария в зимний период в условиях будущего климата по расчетам климатической модели ИВМ РАН CM5 // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 250–262.

Махотина И.А., Чечин Д.Г., Макштас А.П. Радиационный эффект облачности над морским льдом в Арктике во время полярной ночи по данным дрейфующих станций “Северный Полюс”-37, 39, 40 // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 514–525.

Мортиков Е.В., Глазунов А.В., Дебольский А.В., Лыкосов В.Н., Зилитинкевич С.С. О моделировании скорости диссипации кинетической энергии турбулентности // Доклады Академии Наук. 2019. Т. 489. № 4. С. 414–418.

Мохов И.И. Экстремальные атмосферные и гидрологические явления в российских регионах: связь с тихоокеанской десятилетней осцилляцией //Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 183–188.

Мохов И.И. Аномальные зимы в регионах Северной Евразии в разных фазах явлений Эль-Ниньо // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 2. С. 93–98.

Мохов И.И. Зимние атмосферные блокирования в Северном полушарии при климатических изменениях последних десятилетий (1980–2018 гг.) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 508. № 1. С. 132–138.

Мохов И.И., Чернокульский А.В., Осипов А.М. Центры действия атмосферы Северного и Южного полушарий: особенности и изменчивость // Метеорология и гидрология. 2020а. № 11. С. 5–23.

Мохов И.И., Макарова М.Е., Порошенко А.Г. Тропические циклоны и их трансформирование во внетропические: оценки полувековых тенденций изменения // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020б. Т. 493. № 1. С. 83–88.

Мохов И.И., Юшков В.П., Тимажев А.В., Бабанов Б.А. Шквалы с ураганным ветром в Москве // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2020с. № 6. С. 168–172.

Мохов И.И., Осипов А.М., Чернокульский А.В. Центры действия атмосферы в Северном полушарии: современные особенности и ожидаемые изменения в 21 веке по расчетам с ансамблями климатических моделей CMIP5 и CMIP6 // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 2. С. 332–340.

Мохов И.И., Порошенко А.Г. Действие как интегральная характеристика атмосферных (климатических) структур: оценки для тропических циклонов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 6. С. 619–625.

Мохов И.И., Порошенко А.Г. Статистические и модельные оценки связи интенсивности и времени существования тропических циклонов // Метеорология и гидрология. 2021а. № 5. С. 25–30.

Мохов И.И., Порошенко А.Г. Статистические и модельные оценки связи размеров и времени жизни полярных мезоциклонов // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2021б. № 6. С. 53–57.

Мохов И.И., Семенов В.А. (Ред.). Климат Арктики: процессы и изменения. М.: Физматкнига, 2022. 360 с.

Мохов И.И., Тимажев А.В. Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 5–16.

Мохов И.И., Тимажев А.В. Повторяемость летних атмосферных блокирований в Северном полушарии в разных фазах явлений Эль-Ниньо, тихоокеанской десятилетней и атлантической мультидесятилетней осцилляций // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022а. Т. 58. № 3. С. 239–249.

Мохов И.И., Тимажев А.В. Интегральный индекс активности атмосферных блокирований в Северном полушарии в последние десятилетия // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022б. Т. 58. № 6. С. 638–647.

Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений северного полушария на основе спутниковых измерений // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021а. Т. 57. № 4. С. 401–413.

Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Кулижникова Л.К., Ивангородский Р.В. О связи температурных аномалий с характеристиками высотных струйных течений // Современные проблемы дистанционного

зондирования Земли из космоса. 2021б. Т. 18. № 1. С. 199–209.

Нерушев А.Ф., Ивангородский Р.В. Определение зон турбулентности в верхней тропосфере на основе спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 205–215.

Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М. Аномалии содержания озона над территорией России в зимне-весенний период 2015/16 г // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 36–49.

Парфенова М.Р., Елисеев А.В., Мохов И.И. Изменения периода навигации в арктических морях на Северном морском пути в 21 веке: байесовы оценки по расчетам с ансамблем климатических моделей // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507, № 1. С. 118–125.

Репина И.А., Артамонов А.Ю. Турбулентный теплообмен атмосферы и подстилающей поверхности в прибрежной зоне Антарктики по данным инструментальных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 45–52.

Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Тудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Самсонов Т.Е., Репина И.А., Артамонов А.Ю. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и условий возникновения опасных явлений с высокой детализацией для Московского мегаполиса // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 5–19.

Слюняев А.В., Кокорина А.В. Численное моделирование “волн–убийц” на морской поверхности в рамках потенциальных уравнений Эйлера // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 210–223.

Стерлядкин В.В., Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Пашинов Е.В. Предсказание наводнений на крупных реках по радиометрическим микроволновым измерениям из космоса. Возможно ли это? // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 40–52.

Ткаченко Е.В., Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Глазунов А.В. Вихреразрешающее моделирование и исследование параметризаций затухающей турбулентности в вечернем переходе атмосферного пограничного слоя // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 263–281.

Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хаттатов В.У. Исследование химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019–20 г // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 70–83.

Чернокульский А.В., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Ерошкина Н.А., Коренев Д.П., Быков А.В., Калинин Н.А., Курганский М.В., Павлюков Ю.В., Спрыгин А.А., Яринич Ю.И. Шквалы и смерчи на европейской части России 15 мая 2021 г.: диагностика и моделирование // Метеорология и гидрология. 2022. № 11. С. 71–90.

Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Антонеску Б., Кюне, Т. Смерчи в российских регионах //Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 17–34.

Чхетиани О.Г., Вазаева Н.В. Об алгебраических возмущениях в атмосферном пограничном слое // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 62–75.

Шелехов А.П., Афанасьев А.Л., Шелехова Е.А., Кобзев А.А., Тельминов А.Е., Молчунов А.Н., Поплевина О.Н. Использование малоразмерных БПЛА для измерения турбулентности в атмосфере // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 611–624.

Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ярынич Ю.И. Оценка конвективной неустойчивости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5 // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6(401). С. 429–435.

Шишов Е.А., Соленая О.А., Чхетиани О.Г., Азизян Г.В., Копров В.М. Многоточечные измерения температуры и ветра в приземном слое // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 3. С. 286–297.

Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I. et al. Future projections of cyclone activity in the Arctic for the 21st century from regional climate models (Arctic-CORDEX) // Glob. Planet. Change. 2019. V. 182. P. 103005.

Akperov M., Zhang W., Miller P.A., Mokhov I.I., Semenov V.A., Matthes H., Rinke A. Responses of Arctic cyclones to biogeophysical feedbacks under future warming scenarios in a regional Earth system model // Environmental Research Letters. 2021. V. 16. № 6. P. 064076.

Barskov K., Chechin D., Drozd I., Repina I. et al. Relationships between second and third moments in the surface layer under different stratification over grassland and urban landscapes // Boundary-Layer Meteorology. 2022.

Barskov K., Stepanenko V., Repina I., Artamonov A., Gavrikov A. Two regimes of turbulent fluxes above a frozen small lake surrounded by forest // Boundary-Layer Meteorology. 2019. V. 173. P. 311–320.

Bekryaev R.V. Interrelationships of the North Atlantic multidecadal climate variability characteristics // Russian Journal of Earth Sciences. 2019a. V. 19(3). P. ES3004.

Bekryaev R.V. One mystery of the North Atlantic multidecadal variability. An attempt of simple explanation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019b. V. 231. № 1. P. 012008.

Chashechkin Y.D. Conventional partial and new complete solutions of the fundamental equations of fluid mechanics in the problem of periodic internal waves with accompanying ligaments generation // Mathematics. 2021. V. 9 (6). № 586.

Chashechkin Yu.D. Fast superfine components and sound packets in flows induced by a drop impact on a target fluid at rest // Fluid Dynamics & Material Processing (FDMP). 2020. V. 16. № 4. P. 773–800.

Chashechkin Y.D., Zagumennyi I.V. Formation of waves, vortices and ligaments in 2D stratified flows around obstacles // Physica Scripta. 2019. V. 94. № 5 P. 1–17.

Chashechkin Yu.D., Ilynykh A.Yu. Complete Coalescence, Partial Bounce and Rebound: Different Regimes Resulting from the Interaction of a Free Falling Drop with a Target Fluid // Fluid Dynamics & Material Processing (FDMP). 2020. V. 16. № 4. P. 801–811.

Chashechkin Yu.D., Zagumennyi I.V. 2D hydrodynamics of a plate: from creeping flow to transient vortex regimes // Fluids. 2021. V. 6(9). P. 310.

Chechin D.G., Makhotina I.A., Lüpkes C., Makshtas A.P. Effect of Wind Speed and Leads on Clear-Sky Cooling over Arctic Sea Ice during Polar Night // Journal of the atmospheric science. 2019. V. 76. P. 2481–2503.

Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T. Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era // Monthly Weather Review. 2020a. V. 148. № 8. P. 3081–3110.

Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Azhigov I. Satellite-based study and numerical forecasting of two tornado outbreaks in the Ural region in June 2017 // Atmosphere. 2020b. V. 11. № 11. P. 1146.

Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., Yarinich Yu. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // Atmospheric Research. 2022. V. 267. P. 105928.

Chkhetiani O.G., Shalimov S.L. On anomalous wind amplitudes in the lower ionosphere // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2022. V. 240. P. 105960.

Davydova M.A., Chkhetiani O.G., Levashova N.T., Nechaeva A.L. On estimation of the contribution of secondary vortex structures to the transport of aerosols in the atmospheric boundary layer // Fluid Dynamics. 2022. V. 57. № 8. P. 998–1007.

Drozd I., Repina I., Gavrikov A. et al. Atmospheric turbulence structure above urban nonhomogeneous surface // Russian Journal of Earth Sciences. 2022. V. 22. № 5. P. ES01SI11.

Eliseev A.V., Gizatullin R.D., Timazhev A.V. ChAP 1.0: a stationary tropospheric sulfur cycle for Earth system models of intermediate complexity // Geoscientific Model Development. 2021. V. 14. № 12. P. 7725–7747.

Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E., Sterlyadkin V., Chernushich A., Sharkov E. Comparison of Vertically Integrated Fluxes of Atmospheric Water Vapor According to Satellite Radiothermovision, Radiosondes, and Reanalysis // Remote Sens. 2021. V. 13. P. 1639.

Ermakov D.M., Raev M.D., Chernushich A.P., Sharkov E.A. Algorithm for construction of global ocean-atmosphere radiothermal fields with high spatiotemporal sampling based on satellite microwave measurements // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019a. V. 55. № 9. P. 1041–1052.

Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P. Role of tropospheric latent heat advective fluxes in the intensification of tropical cyclones // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019b. V. 55. № 9. P. 1254–1265.

Evgrafova A., Sukhanovskii A. Angular momentum transfer in direct numerical simulations of a laboratory model of a tropical cyclone // Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics. 2022a. V. 116. № 3. P. 185–205.

Evgrafova A., Sukhanovskii A. Impact of complex relief on heat transfer in urban area // Urban Climate. 2022б. V. 43. P. 101177.

Glazunov A.V., Debolskiy A.V., Mortikov E.V. Turbulent Length Scale for Multilayer RANS Model of Urban Canopy and Its Evaluation Based on Large-Eddy Simulations // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2022a. V. 8(4). P. 100–116.

Glazunov A., Mortikov E., Debolskiy A. Studies of Stable Stratification Effect on Dynamic and Thermal Roughness Lengths of Urban-Type Canopy Using Large-Eddy Simulation // J. Atmos. Sci. 2022b. V. 80. P. 31–48.

Gledzer A.E., Gledzer E.B., Khapaev A.A., Chkhetiani O.G. Multiplicity of flow regimes in thin fluid layers in rotating annular channels // Fluid Dynamics. 2021. V. 56. № 4. P. 587–599.

Goncharov V.P. Dynamics of thin jets generated by temperature fronts // Physical Review Fluids. 2021a. V. 6. № 10. P. 103801.

Goncharov V.P. Nonlinear pulsations of horizontal jets // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2021b. V. 95. P.101237.

Gorbunov M.E., Kirchengast G., Lauritsen K.B. Generalized Canonical Transform Method. Atmospheric Measurement Techniques. 2021. V. 14. № 2. P. 853–867.

Gordov E.P. et al. Multidisciplinary ENVIROMIS conference: new experience //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2020. V. 611. № 1. P. 012063.

Harlander U., Kurgansky M.V. Two-dimensional internal gravity wave beam instability. Linear theory and subcritical instability // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics. 2021. V. 115. № 5–6. P. 612–647.

Ingel L.Kh. On the nonlinear dynamics of turbulent thermals in the shear flow // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. 2019a. V. 15. № 1. P. 35–39.

Ingel L.Kh. On the limiting laws of buoyant convective jets and thermals from local sources of a heat releasing impurity // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019b. V. 92. № 6. P. 1481–1488.

Ingel L.Kh. On the nonlinear dynamics of massive particles in tornadoes // Technical Physics. 2020. V. 65. № 6. P. 860–864.

Ingel L.Kh. Initiation of vortex flows induced by double diffusion // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2021a. V. 94. № 3. P. 648–653.

*Ingel L.K*h. Slope flows produced by bulk heat release // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2021b. V. 94. № 1. P. 160–164.

Ingel L.Kh. Some problems of nonlinear dynamics of turbulent thermals // Radiophysics and Quantum Electronics. 2021c. V. 64. № 3. P. 205–213.

Ingel L.K. On the theory of slope flows over a thermally inhomogeneous surface // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2022. V. 63. № 5. P. 843–850.

Ingel L.Kh., Makosko A.A. Geostrophic flow disturbances influenced by inhomogeneities of gravity field. 3D analytical model // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics. 2021. V. 115. № 1. P. 35–43.

Ivanov V., Varentsov M., Matveeva T., Repina I., Artamonov A., Khavina E. Arctic Sea Ice Decline in the 2010s: The Increasing Role of the Ocean–Air Heat Exchange in the Late Summer // Atmosphere. 2019. V. 10. № 4. P. 184.

Kalashnik M.V. Long-wave instabilities in the SQG model with two boundaries // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics. 2020. V. 115(4). P. 1–19.

Kalashnik M.V., Chkhetiani O.G. Optimal disturbances in the development of the instability of a free shear layer and a system of two counter-streaming jet flows // Fluid Dynamics. 2020a. V. 55. № 2. P. 171–184.

Kalashnik M.V., Chkhetiani O.G. Baroclinic instability and nonlinear oscillations in the truncated SQG model //

Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020b. V. 146. № 732. P. 3534–3547.

Kalashnik M.V., Chkhetiani O.G., Kurgansky M.V. Discrete SQG models with two boundaries and baroclinic instability of jet flows // Physics of Fluids. 2021. V. 33. № 7. P. 076608.

Kalashnik M.V., Kurgansky M.V. Hydrodynamic instability of vertical motions excited by spatially periodic distributions of heat sources // Fluid Dynamics. 2020. V. 55. № 4. P. 554–565.

*Kalashnik M.V., Kurgansky M.V., Kostrykin S.V. I*nstability of surface quasigeostrophic spatially periodic flows // Journal of the Atmospheric Sciences. 2020. V. 77. № 1. P. 239–255.

Kosyakov S.I., Kulichkov S.N., Chkhetiani O.G., Tsybul'skaya N.D. On the effect of weak attenuation of acoustic waves from high-altitude explosions // Acoustical Physics. 2019. V. 65. № 6. P. 731–741.

Kurgansky M.V. On the statistical distribution of pressure drops in convective vortices: Applications to martian dust devils // Icarus. 2019. V. 317. P. 209–214.

Kurgansky M.V. On determination of the size-frequency distribution of convective vortices in pressure time-series surveys on Mars // Icarus. 2020a. V. 335. P. 113389.

Kurgansky M.V. On the instability of finite-amplitude inertia-gravity waves // Fluid Dynamics Research. 2020b. V. 52. P. 035503.

Kurgansky M.V. Inertial instability of the Kolmogorov flow in a rotating stratified fluid // Fluid Dynamics Research. 2021a. V. 53. P. 035502.

Kurgansky M.V. An estimate of convective vortex activity at the InSight landing site on Mars // Icarus. 2021b. V. 358. P. 114200.

Kurgansky M.V. A simple model of blocking action over a hemisphere // Theoretical and Applied Climatology. 2021c. V. 147. № 1–2. P. 65–71.

Kurgansky M.V. Statistical distribution of atmospheric dust devils on Earth and Mars // Boundary-Layer Meteorology. 2022a. V. 184. № 3. P. 381–400.

Kurgansky M.V. Inertial instability of the time-periodic Kolmogorov flow in a rotating fluid with the full account of the Coriolis force // Fluid Dynamics Research. 2022b. V. 54. № 5.

Kurgansky M.V. On short-wave instability of the stratified Kolmogorov flow // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. 2022c. V. 36. № 4. P. 575–595.

Kurgansky M.V., Seelig T., Klein M., Will A., Harlander U. Mean flow generation due to longitudinal librations of sidewalls of a rotating annulus // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics. 2020a. V. 114. № 6. P. 742–762.

Kurgansky M.V., Maksimenkov L.O., Chkhetiani O.G. Vertical helicity flux as an index of interannual atmospheric variability // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020b. V. 606 P. 012028.

Kuznetsov E.A., Mikhailov E.A. Slipping flows and their breaking // Annals of Physics. 2022. V. 447. P. 169088.

Lupo A.R., Jensen A.D., Mokhov I.I., Timazhev A., Eichler T., Efe B. Changes in global blocking character during recent decades // Atmosphere. 2019. V. 10. № 2. P. 92.

Malinovskaya E.A., Chkhetiani O.G. On conditions for the wind removal of soil particles // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2021. V. 62. № 7. P. 1117–1131.

Mokhov I.I., Chefranov S.G., Chefranov A.G. Point vortices dynamics on a rotating sphere and modeling of global atmospheric vortices interactions // Phys. Fluids. 2020. V. 32. 106605.

*Mokhov I.I., Timazhev A.V. S*easonal Temperature Extremes in the North Eurasian Regions Depending on ENSO Phase Transitions // Atmosphere. 2022. V. 13. № 2. P. 249.

Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodsky R.V. Dynamics of High-Altitude Jet Streams from Satellite Measurements and Their Relationship with Climatic Parameters and Large-Scale Atmospheric Phenomena // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. V. 55. № 9. P. 1198–1209.

Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodsry R.V. Turbulence in the upper troposphere according to long-term satellite measurements and its relationship with climatic parameters // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. V. 17. № 6. P. 82–86.

Perezhogin P.A., Glazunov A.V., Gritsun A.S. Stochastic and deterministic kinetic energy backscatter parameterizations for simulation of the two-dimensional turbulence // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2019. V. 34. № 4. P. 197–213.

Polonsky A.B. The Ocean's Role in Climate Change. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle, UK, 2019, 294 p.

Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics III // Atmosphere. 2022. V. 13. № 11. P. 1912.

Serykh I.V., Sonechkin D.M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation // International Journal of Climatology. 2021. V. 41. P. 3781–3792.

Shelekhov A.P. et al. Low-Altitude Sensing of Urban Atmospheric Turbulence with UAV // Drones. 2022. V. 6. № 3. P. 61.

Shelekhov A.P. et al. Profiling the turbulence from spectral measurements in the urban atmosphere using UAVs // Proc. SPIE 11864, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments VI, 118640B (12 September 2021).

Shestakova A.A., Debolskiy A.V. Impact of the Novaya Zemlya Bora on the Ocean-Atmosphere Heat Exchange and Ocean Circulation: A Case-Study with the Coupled Model // Atmosphere. 2022. V. 13. № 7. P. 1108.

Shestakova A.A., Myslenkov S.A., Kuznetsova A. Influence of Novaya Zemlya Bora on sea waves: Satellite measurements and numerical modeling // Atmosphere. 2020. V. 11. № 7. P. 726.

Shestakova A.A. Chechin D.G., Lüpkes C., Hartmann J., Maturilli M. The foehn effect during easterly flow over Svalbard // Atmospheric Chemistry and Physics. 2022. V. 22. № 2. P. 1529–1548.

Shestakova A.A. Impact of land surface roughness on downslope windstorm modelling in the Arctic // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2021. V. 95. P. 101244.

Shestakova A.A., Repina I.A. Mesoscale vortex over Lake Baikal: A case-study // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. V. 21. № 5. P. 1.

Shestakova A.A., Toropov P.A. Orographic and lake effect on extreme precipitation on the Iranian coast of the Caspian sea: a case study // Meteorology and Atmospheric Physics. 2021. V. 133. P. 69–84.

Shikhov A., Chernokulsky A., Azhigov I., Semakina A.A satellite-derived database for stand-replacing windthrows in boreal forests of the European Russia in 1986–2017 // Earth System Science Data. 2020. V. 12. P. 3489–3512.

Shikhov A., Chernokulsky A., Kalinin N., Bykov A., Pischalnikova E. Climatology and Formation Environments of Severe Convective Windstorms and Tornadoes in the Perm Region (Russia) in 1984–2020. // Atmosphere. 2021. V. 12. № 11. P. 1407.

*Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O. S*patial and Temporal Distribution of Windthrows in the Forest Zone of Western Siberia in 2001–2020 // Cosmic Research. 2022. V. 60 (Suppl 1). P. S91–S103.

Slunyaev A.V. Effects of coherent dynamics of stochastic deep-water waves // Phys. Rev. E. 2020. V. 101. P. 062214.

Slunyaev A.V. Persistence of hydrodynamic envelope solitons: detection and rogue wave occurrence // Physics of Fluids. 2021. V. 33. P. 036606.

Slunyaev A.V., Stepanyants Y.A. Modulation property of flexural-gravity waves on a water surface covered by a compressed ice sheet // Phys. Fluids. 2022. V. 34. P. 077121.

Smyshlyaev S.P., Vargin P.N., Motsakov M.A. Numerical modeling of ozone loss in the exceptional Arctic stratosphere winter-spring of 2020 // Atmosphere. 2021. V. 12. P. 1470.

Stepanov D., Fomin V., Gusev A., Diansky N. Mesoscale Dynamics and Eddy Heat Transport in the Japan/East Sea from 1990 to 2010: A Model-Based Analysis // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. V. 10(1). P. 33.

*Sukhanovskii A., Popova E. T*he Importance of Horizontal Rolls in the Rapid Intensification of Tropical Cyclones // Boundary-Layer Meteorology. 2020. V. 175. P. 259–276.

The Republic of Adygea Environment // Ed. Kostianoy A.G., Bedanokov M.K., Lebedev S.A. Springer International Publishing AG, 2020. 714 p.

Tsvetkova N.D., Vyzankin A.S., Vargin P.N., Lukyanov A.N., Yushkov V.A. Investigation and forecast of Sudden Stratospheric Warming events with chemistry climate model SOCOL // IOP Conf. Series, Earth Environmental Science. 2020. V. 606. P. 012062.

Turbulence, Atmosphere and Climate Dynamics // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2022. V. 1040.

Vargin P., Martynova Y., Volodin E., Kostrykin S. Investigation of boreal storm tracks in historical simulations of INM CM5 and reanalysis data // IOP Conf. Series, Earth Environmental Science. 2019. V. 386. P. 012007.

Vargin P.N., Koval A.V., Guryanov V.V. Arctic Stratosphere Dynamical Processes in the Winter 2021–2022 // Atmosphere. 2022a. V. 13. 1550.

Vargin P.N., Kostrykin S.V., Volodin E.M., Pogoreltsev A.I., Wei K. Arctic Stratosphere Circulation Changes in the 21st Century in Simulations of INM CM5 // Atmosphere. 2022b. V. 13. P. 25.

Vazaeva N.V., Chkhetiani O.G., Kurgansky M.V. On integral characteristics of Polar Lows // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 606 P. 012065.

Volodin E. The Mechanisms of Cloudiness Evolution Responsible for Equilibrium Climate Sensitivity in Climate Model INM-CM4-8 // Geophysical Research Letters. 2021. V. 48. P. e2021GL096204.

Vorobyeva V., Volodin E. Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale // Tellus A. 2021. V. 73. P. 1892435.

Vulfson A., Nikolaev P. Local Similarity Theory of Convective Turbulent Layer Using "Spectral" Prandtl Mixing Length and Second Moment of Vertical Velocity // Journal of the atmospheric science. V. 79. P. 101–118.

Vyazankin A.S., Tsvetkova N.D., Vargin P.N., Yushkov V.A. Atmospheric Modeling for Controlling the Motion of a Return Vehicle // Solar System Research. 2020. V. 54. № 7. P. 679–684.

Wei K., Chen W., Vargin P. Longitudinal peculiarities of planetary waves-zonal flow interaction and its role in stratosphere-troposphere dynamical coupling // Climate Dynamics. 2021.

Zagumennyi Y.V., Chashechkin Y.D. Numerical Analysis of Flows of Stratified and Homogeneous Fluids near Horizontal and Inclined Plates // Fluid Dyn. 2019. V. 54. P. 958–969.

Zasko G.V., Glazunov A.V., Mortikov E.V., Nechepurenko Y.M., Perezhogin P.A. Optimal Energy Growth in Stably Stratified Turbulent Couette Flow // Boundary-Layer Meteorol. 2023. T. 187. № 1–2. C. 395–421.

Zilitinkevich S., Kadantsev E., Repina I., Mortikov E., Glazunov A. Order out of Chaos: Shifting Paradigm of Convective Turbulence // J. Atmos. Sci. 2021. V. 78. P. 3925–3932.

Research in Dynamic Meteorology in Russia in 2019–2022

I. A. Repina[1, 2, *]

[1]*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Science, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia*

[2]*Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, 1-4, Moscow, 119234 Russia*

**e-mail: repina@ifaran.ru*

This review outlines the most significant results of research in dynamic meteorology performed by Russian scientists in 2019–2022. It is part of the Russian National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences submitted to the International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences (IAMAS). The review is supplemented by a list of main publications of Russian scientists on dynamic meteorology in 2019–2022.

Keywords: dynamic meteorology, atmospheric dynamics, mesoscale processes, turbulence, weather forecasting, troposphere, middle and upper atmosphere, climate, mathematical modeling

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2023, том 59, № 7, с. 882–914

УДК 551.576,551.577

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. Н. А. Безрукова[a], *, А. В. Чернокульский[b], **

[a]Центральная аэрологическая обсерватория,
ул. Первомайская, 3, г. Долгопрудный, Московская область, 141701 Россия
[b]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3., Москва, 119017 Россия
*e-mail: bezrukova@cao-rhms.ru
**e-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru

Поступила в редакцию 31.08.2023 г.
После доработки 08.11.2023 г.
Принята к публикации 15.11.2023 г.

Представлены результаты российских исследований облаков и осадков в 2019–2022 гг. на основе обзора, подготовленного для Национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам к 28-й Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики. Обсуждаются результаты, касающиеся общих вопросов наблюдений и моделирования облаков и осадков, в том числе конвективных, вопросов изучения микрофизических и оптических характеристик облаков, активного воздействия на облака и осадки.

Ключевые слова: облака, осадки, конвекция, микрофизика облаков, ядра конденсации, спутниковые и наземные наблюдения облаков и осадков, моделирование облаков и осадков, активное воздействие на облака и осадки

DOI: 10.31857/S0002351523070039, **EDN:** LGBOZB

ВВЕДЕНИЕ

Облака и осадки играют фундаментальную роль в глобальном гидрологическом цикле, влияют на радиационный баланс планеты [IPCC, 2021]. Прогноз осадков и искусственное воздействие имеют важное практическое значение, в том числе для сельского хозяйства [Третий оценочный доклад, 2022]. С экстремальными осадками, гололедными явлениями и опасными конвективными явлениями связан существенный экономический и социальный ущерб, в частности в России в 2019–2022 гг. отмечено 800 подобных событий с ущербом [Шамин и Санина, 2022].

Несмотря на высокую фундаментальную и прикладную значимость, в области исследований облаков и осадков остается достаточно много нерешенных задач. В частности, с корректным воспроизведением облаков и их реакции на внешнее воздействие по-прежнему связаны существенные различия между глобальными климатическими моделями в оценке чувствительности климата, в том числе повышенная оценка чувствительности в моделях CMIP6 [IPCC, 2021]. Корректность моделирования процессов в облаках зависит от масштаба явлений, который существенно меньше разрешения современных моделей.

В 2019–2022 гг. теме облаков и осадков было посвящен ряд российских исследований, представленных в данном обзоре, включая исследования общих вопросов климатологии облаков и осадков, исследования конвективных процессов и явлений, микрофизики облаков, вопросов наблюдений и моделирования, а также активных воздействия на облака и осадки.

Данный обзор подготовлен в Комиссии по облакам и осадкам Национального геофизического комитета для Национального отчета по метеорологии и атмосферным наукам к 28-й Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (г. Берлин, Германия, 11–20 июля 2023) [Bezrukova and Chernokulsky, 2023]. Обзоры за предыдущие периоды представлены в [Безрукова и Чернокульский, 2016, 2020].

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КЛИМАТОЛОГИИ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ

Исследуются различные аспекты общих вопросов климатологии облаков, в том числе в арктических и субарктических регионах [Черных и Алдухов, 2019; Alexandrova, 2021; Chernokulsky and Ezau, 2019; Sviashchennikov and Drugorub, 2022] и над регионами России [Астафуров и др., 2021; Дементьева и Коршунова, 2020; Иванова и Скриптунова, 2022; Скороходов, 2019; Чернокульский и др., 2022а; Shikhovtsev et al., 2022].

Впервые представлен анализ изменений характера облаков с 1936 года на основе проверенных на ошибки и исправленных рядов данных с

86 российских метеорологических станций в Арктике [Chernokulsky and Ezau, 2019]. Показано, что общая облачность в Российской Арктике увеличивается в более теплые периоды, при этом сильнее всего увеличивается конвективная облачность. Наблюдается статистическое подтверждение перехода от слоистых форм облаков к конвективным. Проанализирована связь характеристик облачности с различными модами климатической изменчивости.

Представлены новые данные о вертикальной макроструктуре облачных слоев в слое 0–10 км для различных широт земного шара [Черных и Алдухов, 2020], в том числе для российских регионов, рассчитанные на основе вертикальных профилей температуры и влажности по данным радиозондирования атмосферы для 1964–2018 гг. Отмечено, что в высоких широтах обоих полушарий и умеренных широтах северного полушария повторяемость облачных слоев возрастает от нижнего яруса к верхнему, в низких широтах она максимальная в среднем ярусе и минимальна в верхнем. Уточнены пространственно-временные особенности расслоения атмосферы на облачные и безоблачные слои. Максимально зафиксировано 20 облачных слоев. Получены долгопериодные оценки повторяемости облачных слоев с учетом количества облачности для месяцев и сезонов.

На основе станционных наблюдений для периода 1967–2019 гг. выявлен рост количества облачности во все сезоны на большей части России [Дементьева и Коршунова, 2020]. Повторяемость эпизодов с нижней облачностью выявлена и по данным аэродромных наблюдений [Иванова и Скриптунова, 2022]. В [Чернокульский и др., 2022а] по станционным наблюдениям для периода 1967–2020 гг. показан рост доли небосвода, закрытыми конвективными облаками, а по данным MODIS для 2000–2020 гг. над территорией Северной Евразии выявлен рост высоты облаков глубокой конвекции (тренд составляет 280 м/десятилетие). В [Астафуров и др., 2021] на основе спутниковых данных MODIS определены статистические характеристики текстурных признаков и физических параметров различных типов облачности для северной и южной частей Западной Сибири. Представлены классификации облачности, состоящие из 16 разновидностей для летнего периода и 12 разновидностей для зимнего периода. Установлены наиболее повторяющиеся виды облачных трансформаций и определены основные причины этих преобразований.

Исследуется характерная взаимосвязь макрофизических параметров облаков [Golitsyn et al., 2022]: в частности, близость фрактальной размерности облаков (отношение площадь–периметр) к 4/3 объясняется с точки зрения случайных блужданий частиц в 6-мерном пространстве скоростей и координат.

Исследуются проявления волновых возмущений в облаках [Кожевников, 2022; Скороходов, 2020]. Получены результаты исследования изменчивости характеристик внутренних гравитационных волн и их облачных проявлений по спутниковым данным HIMAWARI-8 [Скороходов, 2020]. Установлены схожие эпизоды наблюдения сигнатур внутренних гравитационных волн. Обсуждаются процессы, происходящие в системе “атмосфера–подстилающая поверхность” и их влияние на создание благоприятных условий для генерации и распространения рассматриваемых волновых процессов.

Ряд работ в 2019–2022 гг. был посвящен исследованию различных климатологических аспектов разных видов осадков, включая экстремальные, полученных по разным данным, с анализом причин их формирования и долгопериодных изменений, исследованием их статистических характеристик. В частности, долгопериодные изменения характеристик осадков исследованы в [Алешина и Семенов, 2022; Аржанова и Коршунова, 2021; Брусова и др., 2019; Васильев и др., 2020; Хлебникова и др., 2019, 2022; Chernokulsky et al., 2019; Vyshkvarkova and Sukhonos, 2022; Wang et al., 2021].

Проанализированы тенденции изменений характеристик (число случаев, продолжительность и вес) всех видов гололедно-изморозевых отложений на территории России по данным 1338 метеорологических станций с 1984 по 2019 год [Аржанова и Коршунова, 2021]. Выявлено увеличение числа случаев, продолжительности и веса гололеда на востоке Европейской части России и севере Западной Сибири. На арктическом побережье и на юге Европейской части России выявлена тенденция уменьшения числа случаев, продолжительности и веса кристаллической изморози. В то же время рост этих характеристик отмечен на востоке европейской территории, в Западной Сибири, Амурской области и отдельных районах Чукотки. Статистически значимая тенденция увеличения числа случаев, продолжительности и веса отложения мокрого снега обнаружена на большей части России.

Оценено изменение характеристик разных видов осадков, включая ливневые, обложные и моросящие за период с 1966 по 2016 гг. [Chernokulsky et al., 2019]. Выявлено сокращение обложных осадков и рост ливневых осадков, при этом также выявлен статистически значимый рост вклада особенно сильных ливней (95 процентиля) в общую сумму осадков (1–2%/десятилетие, на отдельных станциях до 5%/десятилетие). Наибольший рост доли сильных ливней в общей сумме осадков отмечен для Дальнего Востока, в основном из-за положительных изменений в интенсивности конвективных осадков с линейным трендом более 1 мм/день/десятилетие, что означает увеличение на 13.8% на 1°C потепления. Рост экстремальных осадков также отмечен в отдельных регионах – в Восточной Европе [Vyshkvarkova and Sukhonos, 2022] и над региона-

ми вечной мерзлоты в Сибири [Wang et al., 2021]. Увеличение повторяемости дней экстремальными осадками над российскими регионами отмечено также по данным реанализа ERA5, при этом повторяемость всех дождливых дней сокращается [Алешина и Семенов, 2022].

Оценены ожидаемые в XXI веке изменения характеристик осадков на основе результатов моделирования с использованием глобальных климатических моделей из проекта CMIP6 [Алешина и Семенов, 2022] и региональной модели Главной геофизической обсерватории [Хлебникова и др., 2019, 2022]. Согласно модельным расчетам, в ближайшие десятилетия в зимний период сохранится рост относительных сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков на большей части территории России. Летом, напротив, для юга Европейской территории России в целом отмечается слабое уменьшение сезонных сумм осадков и количества дней с осадками [Алешина и Семенов, 2022]. Использование массовых ансамблевых расчетов с применением региональной климатической модели высокого разрешения позволяет выявить пространственные особенности изменения экстремальности режима осадков, которые целесообразно учитывать при адаптации к изменениям климата на региональном уровне [Хлебникова и др., 2022].

Характеристики снежного покрова во внетропических широтах Северного полушария исследуются в [Мохов и Парфенова, 2022; Essery et al., 2020; Santolaria-Otín and Zolina, 2020]. Получены количественные оценки связи внутригодовых и межгодовых вариаций снежного покрова в Евразии с изменениями приповерхностной температуры в Северном полушарии на основе спутниковых данных и данных реанализа для периода 1979–2020 гг. [Мохов и Парфенова, 2022]. Для периода с 2005 г. отмечено увеличение по абсолютной величине параметра чувствительности площади снежного покрова к изменению приповерхностной температуры для Евразии. В [Santolaria-Otín and Zolina, 2020] анализируется изменение площади снежного покрова и водного эквивалента снега над континентальными районами приполярной области на основе различных наблюдений и ансамбля моделей CMIP5 за период 1979–2005 гг. Выявлено, что модели CMIP5 значительно недооценивают площадь снежного покрова весной, но лучше согласуются с наблюдениями осенью. В целом, наблюдаемый годовой цикл площади снежного покрова хорошо воспроизводится ансамблем моделей CMIP5, однако для водного эквивалента снега годовой цикл в моделях значительно смещен. Большинство моделей CMIP5 показывают сокращение во времени площади снежного покрова и водного эквивалента снега, однако, значительно более слабое (и менее значимое), чем показывают наблюдения.

Исследуются условия формирования осадков и причины их долгопериодной изменчивости, в том числе оценивается количественный вклад в усиление осадков роста глобальной или локальной температуры воздуха [Aleshina et al., 2021; Hosseini-Moghari et al., 2022], температуры поверхности океана [Алешина и др., 2019; Гавриков и др., 2022; Shestakova and Toropov, 2021], состояния морского льда [Liu et al., 2022], мод климатической изменчивости [Basharin and Stankūnavičius, 2022], циркуляционных особенностей атмосферы [Антохина, 2019; Леонов и Соколихина, 2021; Evstigneev et al., 2022; Kislov et al., 2022], локальных эффектов связанных с городом [Брусова и др., 2019; Ладохина и Рубинштейн, 2021] и орографией [Shestakova and Toropov, 2021].

В [Aleshina et al., 2021] проверяется гипотеза об экспоненциальном росте интенсивности экстремальных осадков разных типов в связи с ростом температуры в соответствии с соотношением Клаузиуса–Клапейрона (7%/1K) для российских регионов на основе данных станционных наблюдений (за 1966–2017 гг.) и данных реанализа ERA5 (за 1979–2020 гг.). В зимний период выявлено общее увеличение экстремальных осадков всех типов в соответствии с указанным соотношением. Однако летом наблюдается пикообразная структура зависимости экстремальных осадков от температуры, особенно для ливневых осадков в южных регионах. Экстремальные осадки достигают своих пиковых значений в диапазоне температур между 15 и 20°C. При более высоких температурах интенсивность осадков начинает убывать с дальнейшим ростом температуры, что обуславливается важной ролью доступности влаги в атмосфере.

В [Shestakova and Toropov, 2021] анализируется роль влияния орографии и крупного водоема в формировании экстремальных осадков на южном побережье Каспийского моря с помощью идеализированных экспериментов с моделью WRF-ARW. Получено, что общий вклад теплого Каспийского моря и орографии в усиление осадков на юге Каспийского моря составляет в среднем около 50%, при этом эффект влияния моря без орографии не проявляется. В [Ладохина и Рубинштейн, 2021] оценено влияние Санкт-Петербурга на поле ветра и поле осадков по данным 15 станций Ленинградской обл. за период 1994–2018 гг. Выявлено увеличение количества осадков и ослабление скорости приземного ветра за пределами мегаполиса на подветренных территориях и уменьшение скорости ветра в самом мегаполисе. Похожий результат получены и для Москвы [Брусова и др., 2019], в частности показано, что сильные осадки (>10 мм/12 ч) на городских станциях Москвы выпадают чаще, чем в пригороде и на фоновых станциях.

Исследованы события экстремальных осадков европейского сектора Арктики [Kislov et al., 2022], которые классифицированы с точки зрения принадлежности к некоторому базовому распределению вероятностей, в качестве которого

использовано распределение Парето. Выявлены отклоняющиеся от базового распределения события. Определены синоптические объекты, при которых появляются сверхбольшие аномалии осадков. Наряду с [Kislov et al., 2022], вопросы статистического описания осадков исследуются в [Болгов и др., 2020; Клименко и др., 2019а, б; Korolev and Gorshenin, 2020; Korolev et al., 2019].

Вопросы анализа рядов данных по ливневым осадкам, содержащих несколько событий в году рассмотрены в [Клименко и др., 2019а]. Разработаны рекомендации по пересчету статистик рядов, содержащих нескольких событий в году, к статистикам для одного события в году. В [Korolev and Gorshenin, 2020] предложены математические модели для статистического описания максимального суточного количества осадков в течение влажного периода и общего объема осадков за влажный период. Предлагаемые модели основаны на обобщенном отрицательном биномиальном распределении продолжительности влажного периода, представляющим собой смешанное распределение Пуассона. Предложено несколько тестов на оценку аномальной экстремальности суточных осадков, общего объема осадков и интенсивности осадков [Korolev et al., 2019]. В [Болгов и др., 2020] рассматривается подход к оценке статистических характеристик сумм дождевых осадков за короткие интервалы времени. На основе результатов обработки данных плювиографических наблюдений в Московском регионе сделан вывод о существенном изменении временной структуры ливней. Более подробно временная структура ливней изучена в [Клименко и др., 2019б] на основе анализа 80-летних рядов плювиографических наблюдений в долине реки Тобол. Отмечено, что для 75% зафиксированных ливней более 50% суммы осадков выпадает в первую треть их продолжительности. Равномерное выпадение осадков характерно лишь для 5% наблюденных ливней. Показано удовлетворительное моделирование характеристик ливней на основе логнормального распределения.

2. КОНВЕКТИВНАЯ ОБЛАЧНОСТЬ, КОНВЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Одни из наиболее опасных погодных явлений, которые приводят к существенным социально-экономическим последствиям, связаны с конвективными процессами в атмосфере – сильные ливни и грозы, град, шквалы, смерчи. В связи с этим, в 2019–22 гг. существенное число российских исследований было посвящено анализу конвективной облачности и опасных конвективных явлений, анализу электрических процессов в облаках, характерных условий и особенностей формирования и развития конвективных облаков и опасных конвективных явлений, а также диагностике отдельных особенно выдающихся событий.

Ряд работ описывает те или иные характеристики конвективных облаков и явлений, характерных непосредственно для регионов исследований. Так, различные оценки получены на основе разных данных (самолетных, спутниковых и радиолокационных наблюдений, данных грозопеленгации) для регионов Северного Кавказа [Аджиев и др., 2020; Аппаева, 2020; Жарашуев, 2021], для юга Дальнего Востока [Пермяков и др., 2022], средней полосы России [Спрыгин, 2020; Шаталина и др., 2021, Шихов и др., 2019, 2021, Shikhov et al., 2021], северо-запада Европейской части России [Михайлушкин и др., 2021; Синькевич и др., 2022], юга Западной Сибири [Нагорский и др., 2022; Нечепуренко и др., 2022; Шихов и др., 2022; Kharyutkina et al., 2022; Kuzhevskaya et al., 2021], Якутии [Tarabukina and Kozlov, 2020], а также для тропических регионов [Петров, 2021; Синькевич и др., 2021; Торопова и др., 2022; Khaykin et al., 2022].

Сравнение характеристик конвективных облаков и явлений между различными регионами (северо–запад Европейской части России, Северный Кавказ, центральная часть Индии и восток Китая) проведено в [Синькевич и др., 2020; Sin'kevich et al., 2021]. Проанализированы характеристики кучевых облаков на начальной стадии их перехода в грозовые облака. Выявлено, что единственной характеристикой облаков, которая увеличивалась при их переходе в грозовую стадию во всех регионах, была высота вершины облака. При этом максимальная отражаемость увеличивалась при переходе к грозовой стадии для облаков в российских регионах, но не менялась значимо в регионах Индии. Одним из важных отличий облаков в индийском регионе от континентальных облаков в России и Китае является более низкое содержание в индийских облаках (постмусонного периода) крупных частиц льда, которые в значительной степени определяют отражательную способность облака выше нулевой изотермы.

Выявлен ряд других региональных закономерностей. В частности, в [Аджиев и др., 2020] за 2008–2019 гг. оценена взаимосвязь числа дней с грозой и продолжительностью гроз в регионах Северного Кавказа. Установлено, что с увеличением числа дней с грозой в год отмечается рост продолжительности грозы (3.89 ч на 1 грозовой день). Характерные распределения основных радиолокационных параметров одноячейковых градовых облаков (включая время градообразования, высоту зарождения первого радиоэха, высоту зарождения града, время жизни одноячейковых градовых облаков, скорость и расстояние их перемещения и др.) для регионов Северного Кавказа получены в [Аппаева, 2020]. В [Алита и Аппаева, 2021] оценена связь между параметрами области градообразования (высота, скорость и направление движения) в фазе обнаружения первого радиоэха и в фазе зарождения и роста града по данным радио-

локационных наблюдений МРЛ-5 за период с 2011 по 2020 гг. на Северном Кавказе, дана оценка времени между этими фазами. Выявлены наиболее вероятные скорости и направления движения данной области относительно ведущего потока. В [Синькевич и др., 2022] для северо–запада европейской части России выполнено сравнение параметров грозовых облаков и облаков без молний. С использованием нейронных сетей проведен регрессионный анализ зависимости частоты молний от радиолокационных характеристик облаков. Получено математическое выражение для расчета частоты молний на основе данных о максимальной величине дифференциальной отражаемости облака и объеме его переохлажденной части с отражаемостью не менее 35 дБZ.

Опубликованные региональные исследования могут использоваться для оценки повторяемости опасных явлений (в частности, в целях адаптации к изменению климата). Так, в [Шихов и др., 2021] создана картографическая база данных по опасным конвективным явлениям для Центрального федерального округа РФ, которая включает сведения как о самих явлениях (более 2 тыс. событий за 2001–2020 гг. включая событий сильных ливней, крупного града, шквалов и смерчей), так и об их последствиях (ущерб, площадь вывала леса и т.д.), и условиях возникновения. В [Kuzhevskaya et al., 2021] проведена оценка временной изменчивости мезомасштабных конвективных систем (МКС), сформировавшихся над югом Западной Сибири за период 2010–2019 гг. За период исследования было зарегистрировано 279 МКС, выделены два центра с их наибольшей повторяемостью. Отмечено, что площади внутримассовых МКС меньше, чем у фронтальных, но высота верхней границы облаков выше. Площадь МКС и интенсивность связанной с ними грозовой активности оценена в [Нагорский и др., 2022]. При этом молнии в Сибири выступают важным источником лесных пожаров. Так, в [Kharyutkina et al., 2022] на основе совместного использования данных грозопеленгации о молниевой активности и спутниковых данных о пожарах показано, что на севере Западной Сибири молнии являются причиной появления боле 30% лесных пожаров. Роль молниевой активности в появлении пожаров подчеркивается и в Якутии, где по данным грозопеленгации отмечается рост молниевой активности в последние годы [Tarabukina and Kozlov, 2020].

Обобщающее исследование изменений повторяемости и интенсивности конвективных опасных явлений погоды (КОЯП) на основе разных независимых источников информации, включая данные наземных наблюдений, спутниковые данные и данные реанализа, представлено в [Чернокульский и др., 2022а]. Результаты указывают на общую интенсификацию КОЯП в большинстве регионов России за исключением ряда регионов на юге европейской части России. Повторяемость умеренных явлений имеет тенденцию к уменьшению, а наиболее сильных – к увеличению.

Впервые определено характерное число смерчей на территории Северной Евразии [Чернокульский и др., 2021; Шихов и др., 2022а; Chernokulsky et al., 2020; Shikhov et al., 2020]. На основе различных данных для территории Северной Евразии выявлено более 3000 событий смерчей. Показана общая недооценка числа смерчей по станционным наблюдениям и согласно данным существующей статистики: для периода 2009–2018 гг. в среднем за год в России регистрировалось более 100 смерчей, из них более 15 – значительных (со скоростью ветра более 50 м/с) и 1 – интенсивный (со скоростью ветра более 70 м/с). В некоторые годы эти значения превышают среднемноголетнее более, чем в 3 раза. Отмечено, что для территории России характерны как единичные смерчи, так и “вспышки” смерчей – случаи формирования нескольких смерчей в пределах одной системы мезо- или синоптического масштаба. Оценена повторяемость смерчей разной категории и вероятность их прохождения через точечный объект. Эти данные могут быть использованы для оценки риска смерчеопасных ситуаций.

Конвективные облака являются важным звеном глобальной электрической цепи. Исследованию электрических процессов в конвективных облаках и электрической структуры этих облаков посвящены работы [Абшаев и др., 2020; Довгалюк и др., 2019, 2020; Жарашуев, 2019; Кузьмин, 2021; Михайловский и др., 2021; Морозов, 2019; Соснин и др., 2021; Kalchikhin et al., 2020; Karashtin et al., 2021; Shepetov et al., 2021; Svechnikova et al., 2021]. Проанализированы изменения характеристик атмосферного электричества во время развития конвективных облаков [Синькевич и др., 2019; Абшаев и др., 2020; Kalchikhin et al., 2020]. Установлено, что частота разрядов в конвективном облаке хорошо коррелирует с объемами переохлажденной части облака с большими значениями отражаемости [Синькевич и др., 2019], при этом происходит увеличение частоты электрических разрядов примерно через 20 мин после достижения максимальных значений объемов переохлажденных частей облака с отражаемостью, превышающей 35–55 дБZ. Максимальное значение потока осадков предшествует максимальной частоте молний.

Исследованы вариации метеорологических и атмосферно-электрических параметров приземной атмосферы во время выпадения сильных ливней (с интенсивностью больше 5 мм/часов) [Kalchikhin et al., 2020]. Отмечено, что фронтальные ливневые осадки вызывают более сильное изменение полярной электропроводности по сравнению с ливнями, связанными с внутримассовыми конвективными облаками. Значимый рост полярной электропроводности (больше, чем в 2 раза по сравнению с обычными условиями)

отмечен для фронтальных ливневых осадков с размером капель более 4 мм. В [Довгалюк и др., 2020] на основе модельных данных показано, что при учете процесса гетерогенного замерзания облачных капель отмечается более интенсивная электризация облака и разделение зарядов, при этом частота молниевых разрядов увеличивается в 2–3 раза. Наиболее мощные механизмы электризации облачных элементов связаны с взаимодействием облачных частиц с осадками (градина – ледяной кристалл, тающая градина – облачная капля, дождевая капля – облачная капля).

При этом, и сами электрические процессы могут играть существенную роль в эволюции облака и связанных с ним опасных погодных явлений. Выявлено, что коронные разряды способствуют замерзанию капель воды при меньших температурах и, следовательно, приводят к более быстрой кристаллизации конвективного облака [Довгалюк и др., 2019]. Отмечено, что характер и степень влияния коронных разрядов на образование и развитие КОЯП существенно зависят от доли переохлажденной жидкой части облака от его общего объема. Если эта доля достаточно велика, интенсивность града и грозовая активность увеличиваются на десятки процентов.

Увеличение потока энергичных частиц под грозовыми облаками обусловлено размножением и ускорением частиц вторичных космических лучей в электрическом поле конвективного облака. В [Svechnikova et al., 2021] предложен новый способ оценки электрической структуры облака, создающего поток энергичных частиц, основанный на использовании наземных измерений напряженности электрического поля и потока энергичных частиц под облаком. По данным наблюдений на исследовательской станции Арагац определена двухслойная структура распределения заряда в облаке с положительным зарядом (плотностью 0.5–5 нКл/м^3) в нижнем слое в области преобладания граупеля и с отрицательным зарядом (плотностью –0.2...–3 нКл/м^3) в верхнем слое в области преобладания снежных частиц. Вертикальное расстояние между двумя областями составляет около 1–2 км, что оказывается достаточным для создания потока энергичных частиц.

Продолжаются исследования условий формирования мощных конвективных облаков, приводящих к появлению КОЯП, при этом используется как классический синоптический анализ, так и анализ динамических и термодинамических характеристик атмосферы [Алексеева, 2019; Алексеева и Песков, 2021; Ашабоков и др., 2022; Веремей и др., 2022; Золотухина, 2020; Калинин и др., 2021; Кузнецов и др., 2020; Макитов и др., 2022; Сивков и Калинин, 2020; Шихов и др., 2022б; Abshaev et al., 2019; Kulikov et al., 2020; Shikhov et al., 2021].

Оценивается прогнозная и диагностическая сила тех или иных индексов конвективной неустойчивости. В [Алексеева, 2019] было показано, что для прогноза шквалов наиболее информативными предикторами являются максимальная конвективная скорость и лапласиан приземного давления, который позволяет выделять зону полного отсутствия шквалов. Показано влияние скорости горизонтального переноса в средней тропосфере на увеличение (примерно на 4–4.5 м/с) максимальной скорости ветра при шквале, хотя ее вклад примерно в 4 раза меньше вклада от вертикальных конвективных скоростей и в 2–2.5 раза меньше вклада от лапласиана приземного давления. В [Калинин и др., 2021] показано, что важными факторами возникновения сильных шквалов и смерчей являются значительный контраст температуры на фронте (в среднем 9.6°C/500 км), а также наличие струйного течения в нижней или средней тропосфере. В большинстве случаев для возникновения шквалов и смерчей необходимо сочетание высокого влагосодержания воздушной массы (около 40 мм), умеренной или сильной конвективной неустойчивости (>1000 Дж/кг) и сильного сдвига ветра. Для формирования шквалов большее значение имеют влагосодержание и конвективная неустойчивость атмосферы, а для формирования смерчей – сдвиг ветра в нижнем слое. Похожий вывод о ключевой роли сдвига ветра и спиральности в формировании смерчей и термодиномической неустойчивости в формировании шквалов сделан в [Shikhov et al., 2021]. В [Ашабоков и др., 2022] на основе трехмерной модели конвективного облака отмечается уменьшение мощности выпадения градовых осадков при усилении сдвига ветра.

В [Abshaev et al., 2019] предложена двумерная математическая модель конвекции влажного воздуха в подоблачном и облачном слоях, на основе которой оценено влияние приземных параметров атмосферы на развитие конвекции и выведен критерий развития конвекции в подоблачной области. Установлено, что развитие конвекции в облачном слое зависит от абсолютных значений дефицита точки росы в приповерхностном слое и, в большей степени, от вертикальных градиентов массовой доли водяного пара. Показано, что при определенных критических значениях вертикального градиента массовой доли водяного пара наблюдается взрывной рост конвекции.

Продолжились исследования роли различных факторов в усилении конвективных явлений. В частности, в [Макитов и др., 2022] показано, что в результате слияния конвективных ячеек отмечается интенсификация микрофизических и динамических процессов, что в значительной степени способствует росту крупного града и увеличению продолжительности градовой стадии. В [Веремей и др., 2022] на основе модельных расчетов выявлена интенсификация КОЯП и конвективных облаков при начальном увеличении теплового потока от поверхности. Но дальнейшее его увеличение приводит к гораздо меньшим измене-

ниям величин, которое практически выходит на насыщение. Это связано с тем, что термическое возмущение играет роль только в подъеме термика до конвективно-неустойчивых слоев атмосферы. В дальнейшем же основным фактором, определяющим эволюцию облака, является не термическая неоднородность поверхности, а выделение теплоты при фазовых переходах. В [Кузнецов и др., 2020] показано, что в условиях значительной неустойчивости атмосферы интенсивное движение воздушных судов вблизи аэродрома может способствовать переходу кучевой облачности в кучево-дождевую.

Ряд исследований посвящен детальному анализу отдельных особенно выдающихся конвективных штормов (суперячейковых облаков и/или мезомасштабных систем), включая диагностику условий образования и развития таких штормов, возможности их моделирования и прогнозирования. Проведен анализ штормов, приведших в том числе к выпадению крупного града [Барекова и др., 2019; Абшаев и др., 2020; Бухаров и Бухаров, 2020], формированию водных или сухопутных смерчей [Попов и др., 2020; Романский и др., 2020; Синькевич и др., 2020; Chernokulsky et al., 2020; Калмыкова и др., 2021; Чернокульский и др., 2022; Шихов и др., 2020], долгоживущих шквалов [Куличков и др., 2019; Chernokulsky et al., 2022] или к разным КОЯП одновременно [Алексеева и др., 2022; Спрыгин и Вязилов, 2022; Чернокульский и др., 2022б]. Для большинства исследуемых событий отмечены условия сильной неустойчивости, выявлены экстремальные значения ряда характеристик. Например, для одного из исследуемых суперячейковых облаков отмечена скорость перемещения до 85 км/час [Абшаев и др., 2020].

В [Попов и др., 2020] по данным доплеровского поляризационного метеорологического радиолокатора, радиометра и грозопеленгатора исследуются характеристики грозового кучево-дождевого облака со смерчем, которое проходило над Финским заливом 12 августа 2018 г. Показано опускание вращательного движения в облаке перед возникновением смерча (что указывает на его природу по типу торнадо). На основе рассмотрения радиолокационных характеристик облака в момент наблюдения смерча сделан вывод, что для обнаружения смерча хорошими идентификаторами являются “столб Zdr” и область в нижней части облака с разными по направлению значениями доплеровской скорости и с большими значениями ширины спектра скоростей. По-видимому, данная особенность может использоваться для обнаружения не всех смерчей. Например, изучение радиолокационных характеристик облаков во время вспышки смерчей 16 июля 2019 г. над Черным морем [Калмыкова и др., 2021], показало, что облако со смерчем, вышедшем на берег и прошедшим существенное расстояние над сушей, по своим радиолокационным характеристикам не отличалось от несмерчеобразующих облаков, возникавших в тот день вблизи побережья.

В [Синькевич и др., 2020] для грозового кучево-дождевого облака с водным смерчем, зафиксированным 6 августа 2018 г. над Ладожским озером, впервые применены алгоритмы классификации гидрометеоров и определения восходящих потоков по данным поляризационных характеристик, полученных радиолокатором ДМРЛ-С. С их помощью обнаружено появление крупных ледяных частиц в начале грозовой активности в облаке и зафиксирован протяженный восходящий воздушный поток, связанный со смерчем.

Впервые для территории России зафиксированы так называемые события “деречо” – долгоживущие конвективные шторма с существенной длиной и интенсивностью разрушения [Chernokulsky et al., 2022]. Два таких события произошли 27 июня и 29 июля 2010 г. на фоне рекордной жары и привели к беспрецедентному ущербу лесам с общей площадью сплошных ветровалов более 1250 км^2. Длина пути повреждений превысила 500 км для одного шторма и 600 км для другого. Оба события развивались в условиях умеренной или сильной конвективной неустойчивости и чрезвычайно сильного сдвига ветра из-за наличия сильного струйного течения в средней атмосфере вблизи холодного фронта на западной периферии долгоживущих блокирующих антициклонов в даты их разрушения. Мезомасштабное моделирование ситуации с помощью модели WRF показало существенную недооценку ветрового воздействия. Важная роль блокирующих антициклонов в формировании мощных долгоживущих конвективных систем обсуждается также в [Чернокульский и др., 2022б] для события 15 мая 2021 г. Это событие также развивалось на западной периферии блокинга, но не во время разрушения (как события 2010 года), а во время его максимального развития.

3. МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ. ЯДРА КОНДЕНСАЦИИ. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОСАДКОВ

Изучение микрофизических свойств облаков проводится как в лабораторных, так и в натурных условиях в атмосфере, в том числе на борту летающей метеорологической лаборатории, созданной российскими учеными на базе самолета Як-42Д “Росгидромет” (СМЛ), оснащенного разнообразной измерительной аппаратурой и аппаратно-программными комплексами, позволяющими в частности регистрировать облачные частицы в диапазоне 25–6000 мкм, водность облаков и термодинамические характеристики атмосферы [Струнин, 2020; Струнин, 2021], анализировать аэрозольное загрязнение атмосферы и потоки атмосферной радиации [Волков и др., 2019]. В ходе

почти десятилетия летных работ на СМЛ накоплены уникальные экспериментальные данные о строении и свойствах облаков разных форм в разные сезоны и в разных синоптических ситуациях на мезо- и микро-масштабах. База данных зондирования облачной атмосферы со специально разработанным ПО (http://www.cao-rhms.ru/Lnic/raboty/raboty.html) позволяет произвести расчет реализаций пульсаций компонент скорости ветра и температуры, параметров турбулентности, микрофизических параметров, что было использовано в систематизации данных о термодинамическом строении облачной атмосферы [Волков и др., 2019; Petrov et al., 2022].

Возможности измерительной системы СМЛ позволяют изучать структуру поля ветра с высоким пространственным разрешением и определять вертикальные и горизонтальные сдвиги ветра. В частности, по данным двух исследовательских полетов максимальные значения горизонтального сдвига компонентов скорости ветра достигались выше пограничного слоя и составляли 0.2 м/с/км, а вертикального сдвига 1.2 м/с/100 м. Профили энергии горизонтальных и вертикальных турбулентных пульсаций, показали, что интенсивная турбулентность нивелирует сдвиги ветра в конвективном пограничном слое атмосферы. Суммарная энергия турбулентности в пограничном слое в конвективных условиях, достигала величин 1.6–2.5 $м^2/с^2$ [Волков и др., 2021а].

Самолетные исследования проводятся преимущественно в облачных зонах атмосферных фронтов. Так, выполнен анализ структуры сдвигов ветра и характеристик турбулентности в облачных системах теплых фронтов (Ns–As–Cs–Ci) во время полетов СМЛ в Московской воздушной зоне 17.12.2019 г. и 21.01.2021 г. [Волков и др., 2021б]. Отмечено различие форм кристаллов и их размеров в зависимости от высоты полета и типа облачности, обнаружено наличие жидкой воды в облаках всех типов, включая облака верхнего яруса. Получены распределения с высотой и типом облачности характеристик облачных частиц, значений объемно-модального радиуса частиц; произведен расчет водности облаков; зарегистрированы зоны жидко-капельной водности при $T = -48°C$ в облаках Ci верхнего яруса.

В рамках экспериментального направления в [Petrov et al., 2022] представлены результаты натурных авиационных исследований взаимосвязи микрофизических характеристик и турбулентности в переохлажденных облаках. В зонах с одновременным присутствием капель переохлажденной жидкости и кристаллов льда наблюдается анизотропия турбулентных пульсаций скоростей воздушного потока – энергия вертикальных пульсаций превышала энергию горизонтальных пульсаций, иногда более чем в 2 раза. Скорости восходящих потоков превышали 4.5 м/с, что создавало условия для подъема капель и роста жидкой фазы в присутствии кристаллов льда. Показано, что в областях с повышенной интенсивностью турбулентности при низких температурах в облаках со смешанным фазовым составом высока опасность обледенения самолетов вследствие обнаруженного механизма роста переохлажденных капель.

На основе измерений концентраций облачных капель (диапазон 2–48 мкм), облачных кристаллов (12.5–1562.5 мкм) и частиц кристаллических осадков (50–6250 мкм) по данным измерений на СМЛ получена аппроксимация функций распределения облачных капель и ледяных кристаллов, которая может использоваться для построения численных моделей облаков и осадков и для анализа результатов активного воздействия на облака [Владимиров и др., 2021].

Наряду с самолетными измерениями микрофизические параметры облаков исследуются и на основе других наблюдений и экспериментов, в том числе лабораторных [Самохвалов и др., 2019; Gabyshev et al., 2019, 2022; Karagodin et al., 2022]. В экспериментальной работе [Gabyshev et al., 2019] конденсационный рост сферических микрокапель воды анализировался для капельных кластеров, которые удерживались в свободно левитирующем состоянии в направленном вверх потоке водяного пара. Было обнаружено, что в присутствии электростатического поля напряженностью 1.5×10^5 В $м^{-1}$ рост капель ускоряется в 1.5–2.0 раза по сравнению с условиями без внешнего электрического поля. Предположительно, молекулы воды в окружающем воздухе ускоряются благодаря наличию электрического поля. Кинетическая модель, позволяющая предсказать ускорение конденсационного роста, подтверждает справедливость этой гипотезы. Сами капли поляризованы таким образом, что в электрическом поле облегчается осаждение молекул пара. В работе [Gabyshev et al., 2022] для лучшего понимания механического движения мелких дождевых капель изучались колебания траектории одиночных сферических капель воды, левитируемых в аэродинамической трубе, при этом был заполнен экспериментальный пробел в исследованиях колебаний траектории одиночных жидких сфер микроскопических размеров при малых числах Бонда <1 и относительно низких числах Рейнольдса ~10^2. Было обнаружено, что исследуемые колебания удлиняют траектории, уменьшают конечную скорость мельчайших капель и заставляют капли дождя падать неравномерно даже после достижения конечной скорости.

Проведены исследования оптических и микрофизических характеристик конденсационных следов самолетов с помощью уникального высотного поляризационного лидара [Самохвалов и др., 2019]. Показано, что образующийся в атмосфере конденсационный след за самолетом через 30–40 мин после выброса из двигателей продуктов сгорания топлива состоит из мелких хаотиче-

ски ориентированных частиц льда, преимущественно столбчатой формы.

На основе спутниковых данных и ансамблевых модельных экспериментов проверена гипотеза о влиянии межпланетного магнитного поля на состояние тропосферы в полярных широтах, которое осуществляется через модулирование глобальной электрической цепи и последующее влияние заряженных частиц на скорость слияния облачных капель в облаках “хорошей погоды” [Karagodin et al., 2022]. Анализ не позволил выявить возможное влияние изменения микрофизических параметров облаков на приземную температуру воздуха и атмосферное давление в полярных регионах на фоне их существенной собственной изменчивости.

Изучается взаимодействие облачной среды и аэрозоля, в том числе гигроскопические и конденсационные свойства аэрозолей, определяющие их роль в качестве облачных ядер конденсации [Довгалюк и др., 2022; Михайлов и др., 2019; Морозов, 2022; Полькин и др., 2022; Припачкин и Будыка, 2020; Стулов и др., 2021; Mikhailov and Vlasenko, 2020; Mikhailov et al., 2021; Shuvalova et al., 2022].

Анализ самолетных и наземных измерений концентрации аэрозоля показал, что высота, с которой наблюдаются фоновые концентрации аэрозольных частиц, в теплое время года составляет 2000–3000 м, в зависимости от положения приподнятой инверсии температуры, а в холодное время года (ноябрь–март) 800–1000 м при отсутствии сильных турбулентных потоков. Получены экспериментальные данные по структуре и изменчивости приземного и тропосферного аэрозоля, включая облачные ядра конденсации (ОЯК) на наземном пункте измерения и с помощью самолета-лаборатории. Систематизированы данные о концентрациях, спектрах размеров и образцах облачных частиц в облаках различных типов и осадках в полетах 2020–2022 гг. Исследован суточный ход концентрации частиц субмикронного аэрозоля при различных синоптических ситуациях. По данным прибора CCN-200 о концентрации облачных ядер конденсации (ОЯК), и данным о тонкой структуре микронного и субмикронного аэрозоля, проведен анализ связи концентрации ОЯК с различными фракциями аэрозоля. Исследовано влияние наземных источников загрязнения (крупных населенных пунктов, промышленных объектов) на содержание аэрозоля в нижних слоях тропосферы. Исследованы характеристики облачных ядер конденсации в Московском регионе [Стулов и др., 2021]. В работе приводятся результаты измерений за 2017–2020 гг. концентрации и спектра по пересыщениям облачных ядер конденсации (ОЯК) в приземном слое в Подмосковье. Установлены среднемесячные концентрации ядер и значения параметров распределения ядер по пересыщениям для разных месяцев. Оценены преимущественные размеры ОЯК и их распределение по фракциям частиц атмосферного аэрозоля разных размеров.

Способность вторичных аэрозолей (вторичных частиц, субчастиц) пыльцы ряда растений выступать в качестве ядер конденсации оценивается в [Михайлов и др., 2019; Mikhailov et al., 2021]. Вторичные частицы получены путем водной экстракции биологического материала из пыльцевых зерен и последующей осушки. Параметры облачной активации определены в диапазоне размеров 20–270 нм, а также в условиях насыщения и пересыщения. Установлено, что параметр гигроскопичности изменяется в диапазоне от 0.12 до 0.13 для пересыщенных условий (пересыщение водяным паром 0.1–1.1%). Во всех исследованных образцах вторичных частиц наблюдалось резкое увеличение обводнения аэрозоля при относительно влажности выше 95%. Результаты измерений показали, что конденсационная активность вторичных пыльцевых аэрозолей сопоставима с конденсационной активностью вторичных органических аэрозолей и слабо зависит от типа первичной пыльцы.

На основе результатов расчетов с численной нестационарной трехмерной моделью исследуется эволюция конвективного облака и осадков для случая грозы, наблюдавшейся 11 августа 2017 г. в окрестностях Пекина (Китай) на фоне сильного аэрозольного загрязнения атмосферы, при этом в модели варьировались различные микрофизические параметры капель и ледяных частиц, которые зависят от аэрозольного загрязнения атмосферы, включая параметры распределения дождевых капель и градин по размерам [Довгалюк и др., 2022]. В связи с тем, что жидкокапельная влага играет сравнительно небольшую роль в процессе эволюции конвективного облака, аэрозольное загрязнение в исследуемом случае хотя и влияет на спектр размеров дождевых капель и на переход облачных капель в дождевые, но не оказывает существенного влияния на динамические, микрофизические и электрические параметры облака. В то же время изменение спектра размеров ледяных частиц осадков в сторону уменьшения под действием повышенного аэрозольного загрязнения оказывает существенное влияние на эволюцию облака и осадков. Уменьшается количество осадков как в облаке, так и на подстилающей поверхности. Молниевая активность облака под действие аэрозольного загрязнения изменяется слабо.

Анализируется влияние локдауна в Москве весной 2020 г., введенного в связи с пандемией коронавируса, на снижение содержание ядер конденсации и связанное с этим изменение характеристик облаков [Shuvalova et al., 2022]. По данным спутниковых наблюдений MODIS исследуется концентрация облачных капель на нижней границе облаков весной 2018–2020 гг. для Московского региона. Получено, что для синоптических ситуаций с адвекцией воздуха с севера концентра-

ция облачных капель составляет 200–300 см$^{-3}$. При этом в период локдауна при аналогичных условиях северной адвекции обнаружено снижение концентрации облачных капель на 40–50 см$^{-3}$ (на 14–16%), при этом выявлено увеличение эффективного радиуса капель на 8 ± 1% и уменьшение оптической толщины облаков на 5 ± 2%.

Оптические свойства облачной среды анализируются в работах [Артюшина и др., 2020; Бусыгин и др., 2019; Галилейский и др., 2022; Коршунов и др., 2021; Самохвалов и др., 2019; Тимофеев и др., 2019, 2022; Ткачев и др., 2021; Kustova et al., 2022a, 2022b; Okamoto et al., 2019, 2020; Shishko et al., 2019, 2020; Sterlyadkin et al., 2020; Veselovskii et al., 2020; Wang et al., 2021], получен ряд важных результатов в области изучения оптики облачных частиц. В частности, получено решение задачи рассеянии света на сферических частицах, адаптированное для интерпретации лидарных сигналов [Shishko et al., 2019]. Решение получено для типичных длин волн, используемых в задачах лидарного дистанционного зондирования воды и льда. На основе совместного зондирования перистых облаков лидаром и радаром построена уникальная база данных для соотношений радарных и лидарных сигналов для разных размеров и разных типичных форм ледяных кристаллов [Wang et al., 2021]. Показано, что лидарно-радарное отношение наиболее чувствительно к размеру кристаллов, а деполяризационное отношение – к их форме. Впервые в рамках приближения физической оптики рассчитаны матрицы обратного рассеяния света для ледяных атмосферных гексагональных частиц для случая их хаотической пространственной ориентации [Тимофеев и др., 2022, Kustova et al., 2022b]. Для интерпретации данных лидарного дистанционного зондирования облаков создан банк данных матриц обратного рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах размером 10–100 мкм, получены значения спектрального и линейного деполяризационного отношений [Ткачев и др., 2021], рассчитаны матрицы обратного рассеяния света для частиц нерегулярной формы [Kustova et al., 2022a].

На основе разработанных математических моделей оценен перенос коротких оптических импульсов через облачный слой в космос [Бусыгин и др., 2019], при этом в качестве основных переменных параметров облачного слоя выбраны его оптическая и геометрическая толщины в вертикальном направлении. Показано, что наличие облачного слоя приводит к формированию вторичного источника на верхней границе облака и к существенному искажению временной формы исходного импульса.

Исследуется химический состав осадков, жидких и твердых, а также снежного покрова исследуется, в том числе анализируется изотопный состав [Казанцева и др., 2020, Малыгина и др., 2020; Скакун и др., 2020; Vasil'chuk et al., 2022], кислотность [Семенец и Павлова, 2019; Vlasov et al., 2021], содержание аэрозолей различного происхождения [Курятникова и др., 2022; Митяев и др., 2019; Чечко и Топчая, 2019; Topchaya and Chechko, 2022; Ukraintsev et al., 2020; Volodina et al., 2022], содержание тяжелых металлов и других токсичных элементов [Митяев и др., 2019; Ianchenko et al., 2021; Ivanchenko, 2022; Kotova and Topchaya, 2022; Krupnova et al., 2021; Opekunov et al., 2021; Topchaya and Kotova, 2022; Vlasov et al., 2020, 2021; Yakovlev et al., 2022], ароматических углеводородов [Журба и др., 2019; Тентюков и др., 2019; Khaustov and Redina, 2021; Kozhevnikov et al., 2021; Moskovchenko et al., 2022; Noskova et al., 2022]. Исследования химического состава проведены для различных регионов России, в том числе для Московского региона [Khaustov and Redina, 2021; Vasil'chuk et al., 2022; Vlasov et al., 2020, 2021], севера европейской части России [Митяев и др., 2019; Kotova and Topchaya, 2022; Kozhevnikov et al., 2021; Opekunov et al., 2021; Yakovlev et al., 2022], Балтийского региона [Семенец и Павлова, 2019; Чечко и Топчая, 2019; Topchaya and Chechko, 2022; Topchaya and Kotova, 2022], Баренцбурга (Шпицберген) [Скакун и др., 2020], Урала [Казанцева и др., 2020; Krupnova et al., 2021], севера Западной Сибири [Малыгина и др., 2020], юга Западной Сибири [Курятникова и др., 2022; Moskovchenko et al., 2022; Noskova et al., 2022; Volodina et al., 2022], юга Восточной Сибири [Журба и др., 2019; Ianchenko et al., 2021; Ianchenko, 2022], Байкальского региона [Ukraintsev et al., 2020]. Исследования позволяют уточнить для ряда крупных российских городов распределение и уровень осаждения загрязняющих веществ из атмосферы, в том числе в зависимости от расположения и интенсивности источников загрязнения, обсуждаются вопросы трансграничного переноса вредных примесей.

В [Vlasov et al., 2021] впервые оценены скорости вымывания растворимых форм потенциально токсичных элементов в дождях в Московском мегаполисе. Выявлено, что во время продолжительных дождей уровень влажного осаждения потенциально токсичных элементов резко снижается на второй и последующие дни из-за активного подоблачного вымывания аэрозолей во время первых осадков. Показано, что продолжительность сухого периода и содержание аэрозолей перед началом дождя определяют количество твердых частиц в дождевой воде, что приводит к увеличению pH дождевой воды и сильно влияет на скорость вымывания потенциально токсичных элементов преимущественно антропогенного происхождения. Также показано, что интенсивность осадков способствует увеличению скорости вымывания ряда элементов. Отмечено увеличение растворимости в дождевой воде металлов и металлоидов при снижении pH и более длительных периодах осадков и снижение растворимости при увеличении интенсивности осадков, продолжительности

предшествующего сухого периода и содержания твердых частиц в дождевой воде. Для ряда металлов и металлоидов отмечено увеличение растворимости в кислотных дождях на 20–50% по сравнению с некислотными дождями.

В [Ianchenko et al., 2021; Ianchenko, 2022] на основе многолетних полевых исследований снежного покрова в окрестностях сибирских алюминиевых заводов исследовано распределение в снеге фтора, натрия и лития. Показано, что изменения концентраций этих элементов может быть описана экспоненциальной зависимостью от расстояния до источника. Предполагается, что осаждение аэрозолей от промышленного производства алюминия может быть достигнуто на минимальном расстоянии от заводов или в пределах территории завода путем укрупнения частиц различными технологическими методами в производстве алюминия. Установлено влияние на концентрацию фтора в снежном покрове таких сопутствующих факторов, как количество атмосферных осадков, температура воздуха и продолжительность оттепелей в период от формирования устойчивого снежного покрова до даты отбора проб.

В [Тентюков и др., 2019] обсуждается возможность загрязнения поверхности снежного покрова полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) путем осаждения мелких кристаллов ПАУ из атмосферы в составе криогидратов при образовании изморози. Процесс начинается в атмосфере при взаимодействии мелкодисперсных кристаллов ПАУ с облачными переохлажденными каплями. Благодаря наличию температурной инверсии над снежным покровом и ее осушающему воздействию на приповерхностный слой воздуха, формируется устойчивый массовый перенос водяного пара вниз к снежному покрову, что может инициировать поток тонкодисперсных криогидратов из ПАУ. В работе анализируются физические свойства снежного покрова (в верхнем 18-мм слое снега), контролирующие механизм загрязнения снежного покрова ПАУ при образовании поверхностной изморози. Показаны некоторые микроморфологические признаки различных форм кристаллов изморози, участвующих в указанном процессе. Поскольку условия для образования поверхностного инея возникают чаще, чем для снегопадов, изморозь может быть информативным объектом тестирования при выявлении углеводородного загрязнения снежного покрова в интервалах между снегопадами.

4. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ОБЛАКАМИ И ОСАДКАМИ

Продолжаются исследования, направленные на повышение точности наблюдений за различными характеристиками облаков и осадков, валидацию глобальных и региональных моделей, создание долгопериодных однородных рядов данных за характеристиками облаков и осадков, развитие методов восстановления характеристик облаков и осадков по данным дистанционного зондирования.

В работах [Волков и др., 2019, 2021; Ehrlich et al., 2019; Kalnajs et al., 2021] представлены и обсуждаются самолетные и аэростатные методы наблюдений за характеристиками облаков. Описана бортовая система сбора данных для самолета-лаборатории нового поколения Як-42Д “Росгидромет”, предназначенного для исследования атмосферы и подстилающей поверхности [Волков и др., 2019]. Приведено описание разработанного бортового измерительно-вычислительного комплекса, локальной вычислительной сети, представлено решение задач синхронизации данных высокочастотных измерений. Показаны возможности использования локальной сети для интеграции измерительных систем на борту самолета–лаборатории. Представленные в статье принципы организации единой системы сбора данных могут быть использованы для построения измерительных систем мобильных лабораторий любого класса. Рассмотрены различные конструкции датчиков и представлены алгоритмы расчета содержания мелкокапельной части и общего содержания воды [Volkov et al., 2022], получены данные о коэффициентах захвата для датчиков различной конструкции в капельных облаках и в облаках со смешанной фазой.

Представлена новая платформа для измерения профиля температуры, водяного пара и аэрозоля с разрешением 1 метр в слое тропической тропопаузы [Kalnajs et al., 2021], которая представляет собой опускающийся подвесной комплекс измерительных приборов под дрейфующим аэростатом. Система объединяет проверенные датчики водяного пара, температуры, давления, облачных и аэрозольных частиц. Продемонстрирована возможность использования данной измерительной платформы для будущих кампаний по изучению характеристик облаков в тропиках на уровне тропопаузы.

Систематизируются данные стандартных наземных и аэрологических наблюдений [Черных и Алдухов, 2020; Швець и др., 2019; Швець, 2020], которые могут представлять ценность как для анализа пространственно-временных особенностей характеристик облаков и осадков, так и использоваться для валидации сеточных продуктов, например – спутниковых данных и систем реанализа [Григорьев и др., 2022; Подлесный и др., 2022; Синицын и Гулев, 2022; Kharyutkina et al., 2022; Lockhoff et al., 2019; Voropay et al., 2021].

Оценена ошибка воспроизведения поля осадков по данным реанализа ERA5 в сравнении с данными станционных наблюдений [Григорьев и др., 2022]. Показано, что ERA5 завышает количество осадков от 14% летом до 37% весной, при этом в зависимости от сезона ложно идентифицирует 30–40% дней без осадков. Величина случайной ошибки в среднем на треть меньше изменчивости

суточной суммы осадков, а доля дней с осадками, корректно выявленная ERA5, составляет 84–89% и в среднем меньше летом, чем в другие сезоны. В целом ERA5 демонстрирует меньшую точность для районов и сезонов с относительно малым количеством дней с осадками и количеством осадков. В [Voropay et al., 2021] предложена методика коррекции ошибки реанализа ERA5 с учетом данных наблюдений и представлена скорректированная база данных для юга Сибири.

Особенности наземных наблюдений за осадками с помощью различных приборов (в том числе осадкосборников, оптических осадкомеров и т.д.) также обсуждаются в [Аршинов и др., 2019; Екайкин и др., 2020; Жарашуев, 2019; Кальчихин и Кобзев, 2019; Кальчихин и др., 2021].

В связи с объективными трудностями проведения контактных наблюдений за облаками и осадками активно используются данные дистанционного зондирования гидрометеоров, полученные как со спутников, так и с измерительной аппаратуры, расположенной на поверхности. Среди наземных дистанционных наблюдений в качестве источника данных для оценки характеристик облаков и осадков наибольшее распространение получили метеорологические радиолокаторы [Алексеева и др., 2020, 2021; Восканян и др., 2019; Денисенков и др., 2019; Довгалюк и др., 2020; Жарашуев, 2022; Кагермазов и Созаева, 2019; Ильин и Кутерин, 2020; Клименко, 2019, 2020; Костарев и др., 2020; Созаева, 2021, 2022; Созаева и Жабоева, 2020, 2021; Синькевич и др., 2021; Шаповалов и др., 2022].

Оценен вклад различных гидрометеоров в суммарную радиолокационную отражаемость [Кагермазов и Созаева, 2019]. Показано, что при решении обратных задач теории рассеяния вкладом дождевых капель в отражаемость на длине волны 10 см можно пренебречь, а на длине волны 3.2 см этот вклад необходимо учитывать, при этом вкладом облачных капель и кристаллов на обеих длинах волн можно пренебречь. Влияние формы капель, в том числе их деформации, на их рассеивающие свойства и радиолокационную отражаемость оценено в [Созаева и Макитов, 2019; Созаева и Жабоева, 2021]. Анализ показал, что фактор формы капель не вносит заметного влияния на радиолокационную отражаемость при отсутствии электрических полей. Но при наличии электрического поля фактор формы вносит существенный вклад в радиолокационную отражаемость, и при расчете интенсивности осадков по радиолокационной отражаемости необходимо вносить соответствующую коррекцию. В [Денисенков и др., 2019] предложена методика по определению сдвига ветра на основе данных метеорологических радиолокаторов путем восстановления профиля ветра на основе использования оценок ширины спектра отражений. В [Ильин и Кутерин, 2020] предложен новый алгоритм распознавания гроз, основанный на сумме положительных значений радиолокационной отражаемости, превосходящий по оправдываемости и достоверности более сложные модели. В [Жарашуев, 2022] предложены методы оптимизации работы радиолокационной сети России, включающие в себя объектно-ориентированный подход к отображению метеорологических карт, автокалибровку радиолокационной сети по эталонному локатору и автоматическую фильтрацию аномального радиоэха.

Предложен способ оценки максимально возможных за сутки ливневых осадков на основе совместного использования наземной, аэрологической, спутниковой и радиолокационной информации [Клименко, 2020]. Оценка максимально возможных осадков проводится на примере региона Среднего Урала на основе общего влагосодержания облачных систем, описываемого с позиций их стационарности или динамики во времени, при этом отдельно рассмотрены разные способы оценки влагосодержания – на основе характеристик вертикального распределения температуры в тропосфере; скорости конвекции; высоты верхней границы облаков. Разработанная методика оценки предельных максимумов ливневых осадков может быть использована в инженерной практике.

Наряду с метеорологическими радиолокаторами развиваются методы восстановления характеристик облаков на основе других наземных дистанционных наблюдений, в том числе с помощью облачных камер [Krinitskiy et al., 2022], инфразвуковых [Сорокин и Добрынин, 2022], лидарных [Коршунов и Зубачев, 2021; Махотина и др., 2021] и микроволновых наблюдений [Аквилонова и др., 2022; Бирюков и Косцов, 2019, 2020; Быков и др., 2020; Караваев и Щукин, 2019; Караваев и др., 2022; Ростокин и др., 2019; Klimenko et al., 2022; Kostsov et al., 2020], на основе систем грозопеленгации [Аджиев и др., 2019; Жарашуев, 2022; Клещева и др., 2021; Куров и др., 2022] или совместного использования разных видов наблюдений [Спивак и др., 2022].

В [Krinitskiy et al., 2022] предложена схема оценки алгоритмов восстановления характеристик облачности на основе наземных оптических снимков с помощью широкоугольных снимков небосвода, а также представлено несколько новых алгоритмов, основанных на методах глубокого обучения. Показано, что алгоритмы, основанные на сверточных нейронных сетях, обеспечивают более высокое качество по сравнению со всеми ранее опубликованными подходами по оценке облачности на основе снимков небосвода. Выявлено значительное снижение способности к обобщению обучающих данных для случаев сильного смещения между обучающим и тестовым подмножествами изображений, что может, например, произойти в случае использования региональной выборки.

Возможности микроволновой радиометрии для экспериментальных исследований водозапаса об-

лаков, в том числе в период возникновения опасных явлений погоды, связанных с развитием конвективных облаков и грозовых процессов обсуждаются в [Караваев и др., 2022]. В [Аквилонова и др., 2022] показана возможность исследования изменчивости водозапаса разных типов облаков с 200-метровым пространственным разрешением и 10-секундным временным разрешением на основе спектральных СВЧ-радиометрических измерений в области линии поглощения водяного пара 18.0–27.2 ГГц. Временные ряды спектров значений яркостной температуры могут служить основой оперативного анализа временной изменчивости водозапаса облаков. Многочастотные микроволновые радиометрические измерения также могут использоваться в период формированиях сильного дождя [Ростокин и др., 2019]. Радиометрические измерения в режиме углового сканирования позволяют восстановить пространственный градиент водозапаса облаков, например на границе “суша–море” [Kostsov et al., 2020]. Полученные средние за 7 лет микроволновых измерений значения градиента водозапаса для лета и зимы показывают наличие положительного градиента водозапаса облаков “суша–море” (большие значения над сушей, меньшие – над морем) в оба периода, что качественно согласуется с имеющимися спутниковыми данными [Бирюков и Косцов, 2020]. В [Klimenko et al., 2022] показано, что одновременные микроволновые измерения и измерения электрического поля атмосферы могут быть использованы для выявления возможных связей между скоростью электризации и интенсивностью турбулентности в облаках.

В [Клещева и др., 2021] с помощью разных статистических методов получены оценки радиусов круговой области выборки данных грозопеленгационной сети WWLLN, при которых выявлена наилучшая согласованность с числом дней с грозами по данным станционных метеорологических наблюдений. Показано, что эти радиусы для всех станций лежат в диапазоне от 12 до 36 км при среднем значении 23 км. Днем радиусы меньше по сравнению с радиусами ночью и в среднем по всем станциям составляют 21 и 26 км соответственно. Показано, что увеличение (уменьшение) радиуса выборки данных WWLLN на 1 км относительно среднего значения ведет к увеличению (уменьшению) среднегодового числа дней с молниями WWLLN относительно метеосводок на ~1 день.

Большой корпус работ посвящен развитию методов исследования характеристик облаков и осадков на основе спутниковых наблюдений. В частности, развиваются методики восстановления характеристик облаков и осадков на основе пассивных спутниковых наблюдений, в том числе с российских космических аппаратов “Метеор-М № 2”, “Электро-Л” и “Арктика-М” [Андреев и др., 2019; Андреев и Шамилова, 2021; Асмус и др., 2019; Астафуров и Скороходов, 2021; Волкова и Кухарский, 2020; Волкова и др., 2021; Готюр и др., 2020; Саворский, 2022; Скороходов, 2020; Тарасов, 2020; Филей, 2019а, 2019б, 2020; Шакина и др., 2021; Шишов и Горлач, 2020; Bloshchinskiy et al., 2020; Kostsov et al., 2019; Tarasenkov et al., 2022]. Активно используются методы искусственных нейронных сетей [Андреев и др., 2019; Андреев и Шамилова, 2021; Астафуров и Скороходов, 2021; Волкова и др., 2021; Готюр и др., 2020; Скороходов и Курьянович, 2022; Bloshchinskiy et al., 2020]. Например, с помощью глубокой нейронной сети предложено определять куполообразные вершины над кучево-дождевой наковальней для определения очагов кучево-дождевой облачности [Готюр и др., 2020]. Вероятность обнаружения вершин составила 50–70%, частота ложного обнаружения 45–55%. Автоматизированное обнаружение очагов глубокой конвекции также обсуждается в [Шишов и Горлач, 2020].

Ряд методик разработан для радиометра МСУ-МР, установленного на борту российского гидрометеорологического спутника “Метеор-М” № 2. В том числе, разработан алгоритм определения оптической толщины и эффективного радиуса частиц облачности [Филей, 2019а], в основе которого лежат физические принципы использования коэффициентов спектральной яркости облачности на длинах волн 0.64 и 1.68 мкм. Представлен алгоритм определения фазового состояния облачности (капельное, кристаллическое и смешанное) по коэффициентам спектральной яркости на длинах волн 1.6 и 3.7 мкм и яркостным температурам на длинах волн 11 и 12 мкм [Филей, 2019б]. На основе сопоставления с другими методиками отмечено, что наибольшие неточности наблюдались для тонкой полупрозрачной облачности из-за дополнительного излучения, идущего от подстилающей поверхности, а также для смешанной облачности в силу специфики алгоритма. Разработана методика восстановления высоты верхней границы облачности [Филей, 2020], основанная на измерениях собственного излучения облака в расщепленном окне прозрачности атмосферы на длинах волн 11 и 12 мкм. Результаты сравнения восстановленных оценок высоты верхней границы облачности по данным МСУ-МР и по данным спутникового лидара CALIOP показали высокую согласованность.

На основе использования данных различных радиометров (установленных на спутниках NOAA, Метеор-М № 2, Meteosat) разработана и внедрена в оперативную практику в ФГБУ “НИЦ “Планета” технология диагноза параметров облачного покрова, суточных, месячных и годовых сумм осадков, опасных явлений погоды [Волкова и Кухарский, 2020; Волкова и др., 2021]. В основе технологии лежат оригинальные авторские методы автоматизированного порогового попиксельного дешифрирования и классификации спутниковой информации по косвенным признакам.

Отличительной чертой являются высокие оперативность (поступление результатов дешифрирования в базу данных менее чем через 0.5 мин) и периодичность (15 мин), а также возможность комплексного анализа синоптической ситуации на большой площади. Технология испытана и внедрена в оперативную работу.

Продолжает развиваться подход классификации облачности по разным типам на основе спутниковых данных в том числе в ночное время [Скороходов, 2020; Астафуров и Скороходов, 2021]. Приведена объединенная классификация распознаваемых разновидностей облаков. Предложена статистическая модель текстуры изображений разных типов облачности и ее физических параметров на основе двухпараметрических распределений. Представлено описание алгоритма обнаружения атмосферных фронтов и определения их типов по спутниковым данным, приведены результаты его апробации для территории Западной Сибири.

Предложен алгоритм восстановления высоты нижней границы облаков на основе пассивных наблюдений из космоса, основанный на применении адаптированной самоорганизующейся карты Кохонена [Скороходов и Курьянович, 2022]. На этапе обучения нейронной сети используются данные пассивного дистанционного зондирования MODIS и лидарные наблюдения CALIOP, а при кластеризации изображений – только снимки MODIS и тематические продукты их обработки. Определены ключевые признаки кластеризации, одним из которых выступает геометрическая толщина облаков. Приведены ограничения разработанного алгоритма и перспективные направления его доработки с привлечением дополнительной информации. В целом показано, что результаты восстановления высоты нижней границы облачности по данным MODIS хорошо согласуются с измерениями CALIOP над исследуемым регионом для тонких облаков нижнего и верхнего ярусов с оптической толщиной меньше 15.

Ряд результатов получен на основе использования активных спутниковых наблюдений [Скороходов и Коношонкин, 2022], наблюдений за гравитационным полем Земли [Данилова и Онучин, 2019] и данных глобальных навигационных спутниковых систем [Хуторова и др., 2019, 2022]. Так, в [Данилова и Онучин, 2019] представлена методика оценки ежегодного пространственного распределения твердых атмосферных осадков с использованием данных спутниковых измерений за гравитационным полем Земли GRACE в ячейках координатной сетки с шагом 1° по широте и долготе, позволяющих рассчитывать водный эквивалент в земной толще, включая запасы воды в снежном покрове. На основе выявленных закономерностей в районе исследований и пространственной детализации возможно построение ежегодных растровых карт распределения количества твердых атмосферных осадков с пространственным разрешением до 90 м. В [Хуторова и др., 2019, 2022] обсуждается принципиальная возможность мониторинга конвективных процессов с помощью приемников спутниковых навигационных систем.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ

Остаются актуальными научные задачи, связанные с достоверным численным моделированием процессов формирования, роста и диссипации облаков, формирования и выпадения осадков. Решение этих задач важно как для краткосрочного и среднесрочного прогноза погоды, включая прогноз опасных явлений, связанных с осадками, так и для долгосрочного прогноза климата, учитывая, что реакция облаков на внешнее воздействие попрежнему является основной причиной неопределенности в оценке чувствительности климата к таким воздействиям.

Различные вопросы моделирования облаков и облачных процессов в том числе в глобальных и региональных моделях климата рассматриваются в работах [Ашабоков и др., 2020; Володин, 2021; Галин и Дымников, 2019; Елисеев и др., 2019; Михайловский и др., 2019; Полюхов и др., 2022; Прессман, 2021; Lesev et al., 2021; Volodin, 2021; Yakovleva et al., 2021], моделированию осадков посвящены работы [Пискунов и др., 2022; Торопов и др., 2022].

Исследовано влияние изменений параметризации облачности на равновесную чувствительность климата в глобальной климатической модели ИВМ РАН [Volodin, 2021] – модели INM-CM4-8, обладающей самой низкой чувствительностью среди всех моделей ансамбля CMIP6. Показано, что обоснованные изменения в параметризации облачности могут приводить к изменению чувствительности в модели в пределах от 1.8 до 4.1 K, что составляет более половины интервала для ансамбля моделей CMIP6. За увеличение чувствительности отвечают три основные механизма: увеличение диссипации облачности в более теплом климате из-за увеличения дефицита водяного пара в безоблачной части ячейки, ослабление процессов образования облачности в атмосферном пограничном слое в теплом климате и быстрая реакция облаков на рост концентрации CO_2 из-за изменения стратификации атмосферы. При учетверении концентрации CO_2 изменения в параметризации облачности могут приводить к изменению равновесной чувствительности модели INM-CM4-8 в пределах от 3.6 до 8.1 K [Володин, 2021]. Также в модели ИВМ РАН обновлена параметризация облачно-аэрозольного взаимодействия [Полюхов и др., 2022], в которой учитывается содержание сульфатного аэрозоля. Показано, что учет сульфатного аэрозо-

ля позволяет корректно воспроизводить изменения облачного пропускания с 1980 по 2005 г. по сравнению с данными наблюдений. Среднеглобальный радиационный форсинг за счет непрямого аэрозольного воздействия составил по модельным данным –0.13 Вт/м^2 для 2005 г. относительно 1850 г.

Формулируется метод динамико-стохастической параметризации балла неконвективной облачности в модели общей циркуляции атмосферы исходя из общих предположений о распределении полей влажности внутри ячейки интегрирования [Галин и Дымников, 2019]. Сравнение результатов расчетов с данными наблюдений CALIPSO показывает разумность использования данной параметризации.

Предложена модель орографической компоненты осадков, основанная на алгоритме расчета скорости конденсации водяного пара в воздухе, вынужденно поднимающемся вдоль горного склона [Торопов и др., 2022]. В модели учтены затухание вертикальной компоненты скорости ветра, инициированной рельефом, в зависимости от стратификации, а также доля влаги, выпадающей в виде осадков, от общей массы конденсата. В качестве начальных данных применяется информация реанализа ERA5 (температура, характеристики влажности, компоненты скорости ветра). Показано, что предложенный алгоритм удовлетворительно воспроизводит синоптическую изменчивость осадков, их сезонный ход и климатическую изменчивость, а также пространственное распределение по склонам Эльбруса. Предложенная модель может применяться для расчета годовой аккумуляции на горных ледниках и в глобальных климатических моделях в качестве параметризации орографических осадков.

Развивается моделирование конвективных процессов в облаках [Елисеев и др., 2019; Михайловский и др., 2019; Ашабоков и др., 2020, 2021; Lesev et al., 2021]. В частности, в [Lesev et al., 2021] представлена трехмерная численная модель конвективного облака с учетом электрических процессов, использующая детальные микрофизические уравнения с несколькими десятками классов капель и кристаллов. Модель учитывает 61 категорию размеров капель и 75 категорий размеров кристаллов. Модель была использована для количественной оценки влияния электрических процессов на формирование осадков. Определены пространственное распределение и количественные значения объемных электрических зарядов и напряженности поля в облаке и вокруг него в последовательные моменты времени в процессе эволюции. Также продолжает развиваться трехмерная модель конвективного облака, разработанная в Главной геофизической обсерватории (см., напр. [Михайловский и др., 2019]), с помощью которой получен ряд важных оценок различных характеристик конвективных облаков (см. раздел 2).

Разработана модификация схемы Прайса–Ринда для вычисления частоты молний, которая может быть использована при расчетах с большим шагом по времени и пространству [Елисеев и др., 2019]. При таких шагах по времени и пространству показатель степени в зависимости частоты вспышек от высоты конвективных облаков оказывается меньше в 2 раза над сушей и на четверть над океаном, чем в исходном варианте схемы Прайса–Ринда. Модифицированная версия схемы внедрена в климатическую модель ИФА РАН. Результаты расчетов характеристик молниевой активности с модифицированной схемой лучше согласуются со спутниковыми данными для частоты молний, чем с исходной версией. Показано, что при глобальном потеплении (похолодании) частота молнии увеличивается (уменьшается) по модельным расчетам во все сезоны. Чувствительность частоты молний к изменению приповерхностной температуры атмосферы на глобальном уровне получена равной 10%/K.

Одной из основных целей моделирования облаков и осадков является повышение качества и заблаговременности их прогноза. Значительное внимание уделяется развитию методов заблаговременного прогноза опасных конвективных явлений, учитывая отечественный и мировой опыт. Различные аспекты прогноза характеристик облаков с помощью разных моделей и методов обсуждается в [Алехин и др., 2020, 2022; Иванова, 2021; Шатунова и др., 2019]. Ряд работ посвящен прогнозированию осадков, в том числе экстремальных, как с помощью моделей (COSMO-Ru2, ПЛАВ, WRF) с целью краткосрочного и среднесрочного прогнозирования [Ветров и Костарев, 2021; Кагермазов и др., 2019; Калинин и Сивков, 2022; Калинин и др., 2019; Свиязов и Ветров, 2021; Тищенко и др., 2019; Травова и др., 2020], так и с привлечением спутниковых данных и данных метеорологических радиолокаторов с целью сверхкраткосрочного прогнозирования (наукастинга) [Иванова, 2019; Иванова и Денисенко, 2020; Муравьев и др., 2019, 2022а, 2022б, 2022в; Рубинштейн и др., 2019; Andreev et al., 2020]. Помимо прогноза сильных осадков, существенный интерес также представляет прогноз других опасных конвективных явлений [Алексеева, 2020; Алексеева и Лосев, 2019; Анискина и др., 2022; Губенко и Рубинштейн, 2020; Дементьева и др., 2020; Кагермазов и Созаева, 2020, 2022; Калинин и др., 2019; Калмыкова и др., 2019; Торопова и Русин, 2019; Торопова и др., 2022], тумана [Костромитинов и Яременко, 2022], гололедных явлений [Игнатов и др., 2020, 2022], а также общие вопросы оценки качества прогноза [Калинин и др., 2022; Кисельникова, 2021].

Прогноз характеристик облаков важен для функционирования авиации. В [Иванова, 2021] представлен обзор работ, посвященных влиянию внутриоблачного обледенения на работу авиаци-

онного транспорта. Обсуждаются проблемы наземного обледенения, приводящего к ухудшению состояния взлетно-посадочных полос и усложнению предполетных аэродромных работ. Рассматриваются причины обледенения воздушных судов в полете, средства и методы наблюдения за обледенением, подходы к прогнозированию. Анализируются методы прогноза обледенения двигателей воздушных судов в зонах высокой концентрации ледяных кристаллов. В [Игнатов и др., 2020, 2022] предложено использовать теплобалансовую модель и модель WRF-ARW для прогноза гололедных явлений и максимальной толщины гололеда. В [Алехин, 2020] обсуждается возможность использования полуэмпирического метода прогнозирования общего количества облаков в практике метеорологического обеспечения авиации, основанного на информации о дефиците точки росы. Метод прогнозирования тумана на основе модели сверточных нейронных сетей на основе данных метеорологических и аэрологических наблюдений за предшествующие 12 ч предложен в [Костромитинов и Яременко, 2022]. Показано, что описанный метод позволяет прогнозировать возникновение и рассеяние тумана, в том числе на аэродромах, с заблаговременностью от 3 до 12 ч.

Существенное влияние на авиацию оказывает грозовая активность. В [Иванова, 2019] представлен обзор работ, посвященный истории развития и современному состоянию технологий наукастинга гроз. Показаны роль информации о грозах, получаемой от различных источников – спутников, радаров, грозопеленгаторов, наземных микроволновых радиометров, и значение выходной продукции численных моделей прогноза погоды для наукастинга гроз. Обсуждаются особенности систем наукастинга грозовых штормов, используемых мировыми метеослужбами. В [Иванова и Денисенко, 2020] проанализированы ситуации с грозами на московских аэродромах с использованием карты опасных явлений ДМРЛ-С Внуково, информации установленных на аэродромах грозопеленгаторов и выходной продукции модели COSMO-Ru02 для территории Центрального федерального округа с высоким временным разрешением. Обсуждается согласованность информации о грозах, представленной различными источниками информации и возможность прогнозирования грозы на масштабах так называемого “ближнего” наукастинга (с заблаговременностью до 2 ч). В цикле работ [Муравьев и др., 2019, 2022а, 2022б, 2022в] обсуждаются результаты испытаний оперативной системы наукастинга осадков Гидрометцентра России в различные периоды года на основе на основе данных радиолокаторов на Европейской территории России. Выявлены особенности наукастинга зимних осадков в условиях их более слабой интенсивности по сравнению с летними осадками. Отмечены проблемы объектно-ориентированной верификации прогнозов областей осадков с привлечением методов теории экстремальных величин.

Объектно-ориентированная оценка качества воспроизведения и прогнозирования осадков также проведена в [Кисельникова, 2021] для модели COSMO-Ru2 и в [Калинин и др., 2019, 2022] для модели WRF. В [Калинин и др., 2019] на примере воспроизведения сильных осадков в Пермском крае на основе модели WRF показано, что при прямом моделировании конвекции воспроизводятся локальные зоны интенсивных осадков, причем их максимальная интенсивность оказывается близкой к фактическим значениям. При моделировании с использованием любой параметризации конвекции (за исключением схемы Каина–Фритша) площадь зон осадков существенно завышается, а максимальная интенсивность занижается, что ведет к снижению числа ложных тревог при прогнозе сильных ливней. В [Рубинштейн и др., 2019] представлены результаты усвоения данных грозопеленгационных наблюдений в модели WRF. Установлено, что средние абсолютные ошибки для всех величин благодаря учету гроз уменьшаются. Показано, что при учете данных грозопеленгации конфигурация полей прогностических осадков и их интенсивность заметно приближается к наблюдаемым и в областях, где наблюдались грозы, и в областях их отсутствия. Особенно ярко это прослеживается для осадков слабой интенсивности (0–7 мм). Данные грозопеленгации также успешно используются для верификации модельного прогноза конвективных явлений [Дементьева и др., 2020]. Совместное использование модельных данных, а также данных спутниковой и радиолокационной информации (хотя и без усвоения этих данных в модели) для расчета максимальной скорости конвективных потоков в облаках рассматривается в [Алексеева и Лосев, 2019; Алексеева, 2020]. Показано, что диагностические расчеты максимальной конвективной скорости на основе спутниковой и радиолокационной информации позволяют уточнить краткосрочный прогноз опасных конвективных явлений погоды, особенно места и времени их возникновения. Предлагаемый подход используется в методах прогноза опасных конвективных явлений погоды в летний период года, внедренных в оперативную практику Гидрометцентра России.

Развивается ансамблевый подход для прогнозирования сильных осадков и грозовой деятельности. Преимущества и особенности такого подхода оцениваются в [Ветров и Костарев, 2021; Торопова и др., 2022]. Предложена техника ансамблевого мультимодельного прогнозирования сильных летних осадков в Пермском крае с заблаговременностью 15 и 27 ч по глобальным гидродинамическим моделям GFS, GEM и ICON [Ветров и Костарев, 2021]. Показано, что осреднение по ансамблю глобальных моделей приводит к существенному сокращению числа ложных тревог.

Разработана схема комбинирования глобальных моделей, заключающаяся в фильтрации прогнозов сильных дождей по модели GEM и в использовании в оставшихся точках средних значений по моделям GFS, GEM и ICON. Применение схемы позволяет повысить надежность краткосрочных прогнозов сильных фронтальных дождей летнего периода в Пермском крае в сравнении с любой из моделей в отдельности. В [Торопова и др., 2022] представлены результаты ансамблевого прогноза развития грозовых облаков с использованием модели конвективного облака малой размерности. Показано, что внесение возмущений в начальные данные приводит к развитию облаков с различными характеристиками, при этом изменения выявлены как для максимальных величин в ходе развития облака, так и в самой динамике развития ячеек при переходе в грозовую стадию. Наибольшая изменчивость отмечена для микрофизических параметров осадков и вертикальных скоростей в облаке.

Возможности и недостатки прогноза опасных конвективных явлений, включая осадки, шквалы, град, смерчи на основе тех или иных предикторов (индексов неустойчивости) обсуждаются в [Кагермазов и Созаева, 2020, 2022; Калинин и Сивков, 2022; Калмыкова и др., 2019; Торопова и Русин, 2019]. В цикле работ [Кагермазов и Созаева, 2020, 2022] предложено использовать выходные поля модели GFS NCEP с разной заблаговременностью и методы статистического анализа для прогноза града и определение его максимального размера. В [Торопова и Русин, 2019] рассмотрена задача воспроизведения стратификации атмосферы при помощи численной модели прогноза погоды WRF. Рассматриваются погрешности воспроизведения стратификации на различных вертикальных уровнях (как у земли, так и для средней и верхней тропосферы) и при различных погодных условиях (гроза и кучевая облачность “хорошей погоды”). Показано, что существуют погрешности в приземных значениях температуры и температуры точки росы, а также погрешности в оценке влажности нижней и средней тропосферы, что можно привести к ошибкам в прогнозе конвекции. В [Калмыкова и др., 2019] предложена методика автоматизированного краткосрочного прогноза смерчеопасных ситуаций по данным композитного индекса неустойчивости (на основе выходных полей модели COSMO-Ru2), а также дальнейшего распознавания смерчеопасных областей в реальном времени по радиолокационным и спутниковым наблюдениям. Обоснована принципиальная возможность выдачи предупреждений о возникновении водных смерчей в автоматическом режиме. Успешность использования методики также обсуждается в [Калмыкова и др., 2021].

Важной научно-практической задачей является прогноз осадков, в том числе паводкообразующих, с заблаговременностью несколько месяцев. В [Тищенко и др., 2019] обсуждается возможность прогноза осадков в бассейне р. Амур с помощью модели ПЛАВ. Показано, что полученные прогностические значения сумм осадков имеют более высокую оправдываемость по сравнению с исходными прогнозами в узлах сетки. Выявлена достаточно высокая оправдываемость таких прогнозов для июля и августа – месяцев, критических для формирования паводков на р. Амур. Предложена процедура статистической коррекции месячных и сезонных прогнозов осадков по модели ПЛАВ и регрессионная схема прогноза стока р. Амур.

6. АКТИВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАКА. МЕТОДЫ, РЕАГЕНТЫ ЗАСЕВА И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

История и анализ развития работ в Гидрометслужбе России, связанных с активными воздействиями (АВ) на гидрометеорологические процессы, опубликованы в обзорах за 2019–2022 гг. [Абшаев и др., 2022; Берюлев и Данелян, 2021; Боброва, 2022; Ковалев и др., 2022; Корнеев и др., 2022; Лиев и Кущев, 2022; Малкарова, 2022; Черноус, 2022; Flossmann et al., 2019], где рассмотрены работы нескольких последних десятилетий, касающиеся предотвращения градобитий, борьбы с лавиной опасностью, с туманами и результатов исследований с целью регулирования осадков различного генезиса. Выпадение осадков регулируется во время проведения массовых культурных или спортивных мероприятий, а также для нужд сельского хозяйства – для обеспечения осадками посевных территорий. В зависимости от ситуации используется один из методов АВ: *увеличение осадков* для агропромышленного комплекса с использованием методов: микрофизического засева; динамического засева; *уменьшение осадков* с использованием методов: рассеяния слоистообразной облачности; стимулирования выпадения осадков на наветренной стороне от защищаемой территории путем засева облаков для образования “тени” осадков; интенсивного засева (“перезасева”) натекающей на защищаемую территорию осадкообразующей облачности для снижения в ней эффективности осадкообразования, а также разрушения мощных кучево-дождевых облаков динамическим способом. Данные методы разрабатываются и совершенствуются в том числе научно-исследовательскими коллективами Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) и Высокогорного геофизического института (ВГИ). В частности, в ВГИ получены научно-практические результаты в области защиты от градобития сельскохозяйственных культур, в ЦАО совершенствуется технология искусственного регулирования осадков на больших территориях в интересах агропромышленного комплекса, энергетики, дорожного и коммунального хозяйства, противопожарных работ. Исследования в области искусственного

регулирования атмосферных осадков здесь начались с 1948 г. с работ лауреата Государственной премии СССР И.И. Гайворонского. В 2022 г. отмечался юбилей (55-й год) начала проекта по борьбе с градом в нашей стране, стартовавший по постановлению Совета Министров СССР 1967 г. В связи с юбилеем, выпуски журнала "Метеорология и гидрология" №№ 7 и 8 за 2022 г., целиком посвящены вопросам АВ.

Важной составляющей в работах планирования АВ для увеличения осадков является оценка эффективности воздействия. Данная оценка включает в том числе задачу определения периодов максимального развития и продолжительности существования облачности, подходящей для выбранного метода воздействия. Предварительно анализируются климатические данные об условиях образования облаков: вертикальные профили и градиенты температуры, влажности. Фактическое состояние объекта воздействия определяют исключительно по данным самолетного зондирования: водность облаков, водозапас, фазовую структуру, высоту нижней и верхней границ облака, ветер, температурные характеристики, осадки, обледенение (см. также раздел 3). При правильном выборе периода воздействия и наличия облачности, содержащей ресурс влаги достаточный для дополнительного осаждения, задача воздействия конкретным методом может быть успешно решена.

Результаты многолетних исследований ЦАО по проблеме искусственного увеличения количества осадков представлены в [Берюлев и Данелян, 2021]. Исследования проходили на специально оборудованных метеорологических полигонах, расположенных в разных географических районах, что позволило получить экспериментальное подтверждение эффективности воздействий в разных климатических зонах и разработать технологию искусственного увеличения количества осадков.

С целью увлажнения посевов зерновых, страдающих от засух в Южном регионе, Поволжье и в районах Северного Кавказа, разрабатывается методика выявления ресурсной облачности [Данелян и др., 2021а] и определяются наиболее эффективные периоды для АВ. На основе данных многолетних наблюдений показано, что учитывая условия вегетации озимой пшеницы, продолжительность периода с облачностью пригодной для АВ не превышает 11–15 дней, а ожидаемый прирост влаги в виде осадков может колебаться от 10 до 27 мм в весенне-летний период и от 6 до 25 мм в зимний.

На основе самолетного зондирования атмосферы над Москвой в [Доронин и др., 2019, 2020] даны оценки пригодности переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков для АВ над центром Европейской территории России, которые могут использоваться для планирования и проведения мероприятий по АВ на эти формы облаков. Эффективность воздействия на конвективные облака льдообразующими реагентами для увеличения осадков, с использованием трехмерной численной модели конвективного облака, рассматривается в [Дрофа и др., 2020]. На примере облачности, характерной для двух различных регионов России, выявлены условия получения максимально возможного количества дополнительных осадков, при небольших расходах реагента, включающие наличие в облаках достаточно больших площадей с переохлажденными жидко-капельными зонами, где при внесении искусственных ядер кристаллизации создаются необходимые условия эффективного преобразования облачных капель в ледяные частицы. Выявление ресурсной облачности для получения дополнительных осадков гигроскопическими реагентами предложено также в [Дрофа и др., 2022] с использованием методики мониторинга и краткосрочного прогнозирования.

Анализируется увеличение электрической активности в конвективных облаках после проведения воздействий льдообразующими кристаллизующим реагентом AgJ [Синькевич и др., 2020, 2021]. Электрическое состояние определялось на основе анализа частоты молниевых разрядов, которая рассчитывалась по радиолокационным характеристикам исследуемых облаков. Анализ свидетельствует об увеличении электрической активности в облаках после проведения АВ, которая может выражаться через увеличение частоты молний. В [Алита и Борисова, 2020; Михайловский и др., 2021] отмечено, что в целом любые воздействия на облака приводят к изменению всех процессов: электрические процессы в облаках тесно связаны с микрофизическими параметрами и динамикой облака и оказывают существенное влияние на динамику потоков и формирование осадков, в том числе и града. Представлен обзор физических гипотез, лабораторных и натурных полевых экспериментов по исследованию возможности воздействия на электрические процессы в облаках. Показано, что наиболее обоснованы теоретически и подтверждены экспериментально работы с помощью воздействия льдообразующим реагентом, который позволяет воздействовать на количество и размеры крупных ледяных частиц, а они в свою очередь, определяют интенсивность процессов электризации облака.

Исследовано влияние кристаллизующего засева на грозовые характеристики 40 градовых и градоопасных облаков [Абшаев и др, 2022]. Анализируется объем радиоэха облака с отражаемостью более 35 дБZ выше уровня нулевой изотермы. Получено, что ракетный засев градовых и градоопасных облаков кристаллизующим реагентом приводит к статистически значимым изменениям характеристик облаков: увеличению в 4.4 раза частоты внутриоблачных разрядов, увеличению в 3.7 раза частоты разрядов облако–земля отрицательной полярности и почти полному прекращению разрядов облако–земля положительной по-

лярности, что свидетельствует о возможности искусственного регулирования их грозовой активности. Строение облака и его эволюция в разные моменты времени в естественных условиях и при АВ исследуются на основе численных экспериментов с использованием разработанной модели конвективного облака [Беккиев и др., 2022]; в частности, смоделирован засев облака с использованием функций источников искусственных кристаллов, которые имитируют АВ.

Совершенствуются реагенты и технические средства для АВ [Хучунаев и др., 2020, 2021а, 2021б, 2021в; Шилин, 2021; Шилин и др., 2021а, 2021б; Шилин и Хучунаев, 2022а, 2022б]. Отмечено, что при проведении АВ на облачные системы, наличие в атмосфере электрического поля и заряда на частицах реагента может влиять на удельный выход льдообразующих ядер [Хучунаев и др., 2021в]. Это влияние необходимо учитывать при определении дозировки реагентов и эффективности воздействия. Представлены результаты исследований изменения льдообразующих свойств природных и антропогенных аэрозолей, содержащих алюмосиликаты, при воздействии йода [Шилин и др., 2022]. Показано, что пары йода могут увеличивать льдообразующую активность естественных аэрозолей, в частности имеющих в составе алюмосиликатные структуры.

Аэрозольные генераторы все чаще используются в мировой практике АВ на облака с целью искусственного регулирования осадков и предотвращения града. В [Бычков и др., 2022] приведены теоретические и экспериментальные оценки распространения реагента в пограничном слое атмосферы при работе наземных аэрозольных генераторов: концентрация йодистого серебра становится выше фоновых значений до высоты 1200 м на удалении от 3 до 9 км от места установки генератора. Эксперимент по искусственному увеличению количества осадков на территории Республики Крым показал, что при прохождении облачности над генераторами происходило увеличение высоты ее верхней границы, максимальной отражаемости и интенсивности осадков, что свидетельствует о положительном эффекте воздействия на облачность. Использование генераторов может быть дополнением к самолетному методу, особенно при проведении воздействий на облака ночью и в регионах с горным рельефом. В традиционно использующихся при проведении АВ генераторах [Шилин и Хучунаев, 2022] в определенных условиях возможно вторичное воспламенение продуктов горения с практически полным выгоранием активных веществ и значительным, на несколько порядков, снижением льдообразующей активности полученного аэрозоля. Обсуждается возможность значительного сокращения этого недостатка посредством изменения как физических, так и химических свойств льдообразующего аэрозоля.

Искусственные осадки также используются для понижения класса пожароопасности: впервые Центральной аэрологической обсерваторией было выполнено экспериментальное применение современной технологии искусственного увеличения атмосферных осадков в целях увлажнения обширных территорий Республики Саха (Якутия) для понижения класса пожароопасности на этих территориях. Авиационные работы осуществлялись с применением самолетов–лабораторий Як-42Д “Росгидромет” и Ан-30М в период с 14 мая по 09 августа 2022 г. Было выполнено 27 полетов с общим налетом 142 ч. 42 мин. На фоне применения технологии искусственного увеличения атмосферных осадков [Берюлев и Данелян, 2021] в целях предупреждения возникновения пожаров и предупреждения увеличения класса пожароопасности, количество пожаров на территории Республики Саха (Якутия) в 2022 г. по сравнению 2021 годом уменьшилось в 2.8 раз, площадь, пройденная огнем всех пожаров, уменьшилась в 17 раз, при этом количество дней с наивысшим классом пожарной опасности в 2022 г. по сравнению с 2021 г. уменьшилось в 4.08 раза, а по сравнению со средним многолетним за период с 2017 по 2021 гг. в 2.3 раза. В целом отмечается высокая эффективность АВ для снижения пожарной опасности; в 2017–2021 гг. на большей части Сибири и Дальнего Востока фактическая сумма осадков в 1.4–1.5 раза превышала ожидаемое количество осадков, осредненное по данным прогностических моделей [Ковалев и др., 2022].

Важным направлением АВ является борьба с градобитием. Краткие сведения по истории развития противоградовых работ в СССР и Российской Федерации представлены в [Абшаев и др., 2022; Лиев и Кущев, 2021], включая основные положения применяемой в настоящее время автоматизированной ракетной технологии предотвращения града, характеристики современной системы противоградовой защиты на Северном Кавказе, результаты оценки ее эффективности, основные проблемы и рекомендации по дальнейшему совершенствованию. В направлении исследования механизмов образования града и градозащиты имеют место научные дискуссии об использующихся методах и производимом ими эффекте, рассматриваются технические проблемы, анализируются статистические характеристики эффекта воздействия. Отдельные недостатки градозащиты связываются как с организационно-техническими причинами, так и с несоответствием концепции ускорения осадкообразования физике образования и развития конвективных облаков. Отмечена возможность объяснения эффекта градозащиты полной кристаллизацией облачной влаги. Анализ экономической эффективности противоградовых работ за 2016–2020 гг. представлен в [Лиев и Кущев, 2021].

Предложена концепция расположения дополнительно мобильных пунктов воздействия на градовые процессы [Жарашуев, 2022] с целью выявления слабых мест, обусловленных неподвижностью стационарных пунктов, на основе анализа годовых отчетов Ставропольской военизированной службы за 2010–2019 гг. Разработаны методы и программы для оптимизации порядка радиолокационных наблюдений при противоградовых работах на основе метода автоматической идентификации конвективных ячеек и контроля их параметров [Кузнецов и др., 2019]. Ведутся работы в области математического моделирования, моделируется размер градин при воздействии на облака.

Результаты работ в борьбе с лавинами и многолетние экспериментальные исследования в высокогорных условиях помогли разработать технологию предупредительного спуска снежных лавин на основе прогноза лавиноопасности, диагноза состояния снега и с использованием динамического воздействия на устойчивость снега [Аджиев, 2022]. В [Черноус, 2022] проанализирован 90-летний опыт предупредительного спуска лавин в Хибинах и аналогичные методы работ в других регионах, которые основаны на воздействии взрывов, нарушающих устойчивость снежного покрова. Разные авторы, обсуждая состояние проблемы, считают, что несмотря на длительный опыт, научная основа этих методов все еще развита недостаточно. Недостаточная изученность механизмов возникновения лавин, а также большая пространственная изменчивость свойств снега, и его устойчивость в лавинном очаге, являются основными препятствиями для решения этих проблем. В [Боброва, 2022] изложена 70-летняя история исследования лавин на Сахалине, основные этапы противолавинной деятельности, создание специальных организаций и структур, деятельность которых направлена на снижение лавинной опасности. Задачи исследования лавинной опасности также решаются с помощью моделирования: в [Болгов, 2022] приведено описание трехмерной модели движения лавин – представлены предварительные результаты моделирования движения лавины применительно к реальному рельефу местности лавиноопасного участка на территории горнолыжного курорта Приэльбрусья.

Продолжается исследование процессов образования и рассеяния туманов, изучение статистических данных о повторяемости и интенсивности туманов, особенно в районах ключевых транспортных узлов, крупных технических сооружениях, близ аэродромов и на магистралях [Алексеева и др., 2022; Баззаев и др., 2021; Данелян и др., 2021б]. Подобные исследования базируются на механизме укрупнения в тумане частиц гигроскопических реагентов, генерируемых пиротехническими изделиями. Разрабатываются автоматизированные системы рассеяния переохлажденных туманов хладореагентами (жидкий азот, жидкая углекислота). В НПО “Тайфун” и Институте прикладной геофизики развивается способ рассеяния теплых туманов путем использования сеточных электрофильтров [Андреев и др., 2021]. В [Алексеева и др., 2022] исследуется возможность экспериментальной проверки влияния ионного ветра на инициацию движения в первоначально неподвижном теплом тумане в замкнутом объеме.

Наряду с изучением искусственного регулирования атмосферных осадкообразующих процессов проводились исследования возможности воздействия на природный аридный ландшафт с целью увеличения или создания искусственных осадков. Моделирование на основе региональной модели WRF [Mostamandi et al., 2022] показало, что с помощью геоинженерных методов (например, лесоразведением), можно, изменяя характеристики подстилающей поверхности, менять бризовую циркуляцию и, как следствие, влиять на осадки. Согласно полученным оценкам, понижение альбедо поверхности до 0.2 над прибрежными равнинами увеличивает приземную температуру воздуха на 1–2 K, что вследствие усиления температурного контраста между морем и сушей и интенсификации бриза, может увеличить влажность воздуха (отношение смеси) в пограничном слое выше 3 км на ~0.5 г/кг, усилить вертикальное перемешивание в планетарном пограничном слое сгенерировать дополнительно 1.5 Гт дождевой воды, что эквивалентно годовому потреблению пяти миллионов человек. По мнению авторов, внедрение такой формы региональной геоинженерии наряду с использованием передовых методов сбора и хранения пресной воды, сможет решить задачу адаптации засушливых прибрежных районов к условиям нехватки пресной воды.

Очевидно, что подобные работы выдвигают совершенно новую парадигму – новую модель рациональной деятельности, ставящей перед научным сообществом новые задачи, решение которых позволит создавать осадки искусственно, не ограничиваясь только усилением их природной интенсивности. Как считают авторы, наблюдаемый прогресс в понимании облачных процессов и явные достижения в исследованиях по усилению осадков, *с одной стороны* побуждают к расширению подобных исследований от масштаба облака до попыток воздействия на облачность в масштабе водосбора на земле, *с другой стороны* указывают на пробелы в наших знаниях, которые должны стать актуальными темами дальнейших исследований для продвижения вперед в создании искусственных осадков [Abshaev et al., 2020, 2022; Flossman et al., 2019; Liang et al., 2019]. В частности, на основе численных экспериментов оценивается возможность достижения уровня конденсации от воздействия искусственной горячей струей за счет введения в струю гигроскопических аэрозолей (предлагается использовать двухслойный аэрозоль $NaCl/TiO_2$, способный по-

глощать водяной пар в количестве, значительно превышающем его массу) с дальнейшим восполнением струи теплом конденсации водяного пара, что позволит расширить границы благоприятных условий для создания искусственных облаков при вертикальном градиенте температуры >8°С/км, достаточно слабом ветре в подоблачном слое и при влажности воздуха от 65% [Abshaev et al., 2019, 2022]. Данный совместный проект ученых из России и ОАЭ рассматривался на 6-м Международном форуме по увеличению осадков (https://iref.ae/) и вызвал большой интерес в научном сообществе. Запланированные авторами полевые эксперименты помогут проверить модельные расчеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Синькевич А.А. и др. Исследования влияния кристаллизующего засева на грозовую активность конвективных облаков // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 46–58.

Абшаев А.М., Аджиев А.Х., Веремей Н.Е. и др. Развитие электризации конвективного облака по данным эмпирической и численной моделей // Труды ВКА им. Можайского. 2020. № S674. С. 68–74.

Абшаев М.Т., Абшаев А.А., Синькевич А.А. и др. Об особенностях развития суперячейкового конвективного облака в стадии максимальной грозовой активности (19 августа 2015 г., Северный Кавказ) // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 96–110.

Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Циканов Х.А. Защита сельскохозяйственных растений от градобития на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 11–27.

Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Михайловский Ю.П. и др. Исследование особенностей развития процессов электризации и градообразования в суперячейковом облаке дистационными радиофизическими средствами // Труды ГГО. 2020. № 596. С. 96–130.

Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Кулиев Д.Д. и др. Аппаратно-программный комплекс для мониторинга электрических и грозовых явлений в атмосфере // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 4(36). С. 5–11.

Аджиев А.Х., Докукин М.Д., Кондратьева Н.В., Кумукова О.А. Активные воздействия на снежные лавины. Результаты исследований и оперативно-производственных работ // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 5–13.

Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Гятов Р.А., Керефова З.М. Взаимосвязь числа дней с грозой и продолжительности гроз по данным визуальных и инструментальных наблюдений // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2020. № 3(207). С. 30–36.

Аквилонова А.Б., Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Смирнов М.Т. Изучение характеристик облачной атмосферы по результатам измерений спектров ее нисходящего СВЧ-излучения в области резонансного поглощения водяного пара 18.0–27.2 ГГц // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 66–77.

Алексеева А.А. Особенности условий возникновения активной конвекции с сильными шквалами // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2(372). С. 41–58.

Алексеева А.А. Способы оценки максимальной конвективной скорости в диагнозе и прогнозе опасных конвективных явлений погоды // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2(376). С. 6–22.

Алексеева А.А., Бухаров В.М., Васильев Е.В., Лосев В.М. Диагностика шквалов в снежных зарядах по данным доплеровских метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3(377). С. 6–18.

Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М. Диагноз сильных шквалов на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 3(381). С. 6–23.

Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М. Конвективный шторм в Московском регионе 28 июня 2021 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 1(383). С. 22–42.

Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз опасных конвективных явлений погоды в летний период года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4(374). С. 127–143.

Алексеева А.А., Песков Б.Е. Физико-синоптические предикторы, определяющие формирование сильных ливневых осадков // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 3(381). С. 24–43.

Алексеева А.В., Давыдов В.Е., Зинкина М.Д. и др. Лабораторный эксперимент по исследованию воздействия ионного ветра коронного разряда на теплый туман в замкнутом объеме // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 120–124.

Алехин С.Г. Полуэмпирический метод краткосрочного прогнозирования общего количества облаков // Труды ВКА им. Можайского. 2020. № 672. С. 148–157.

Алехин С.Г., Иванов Р.Д., Шемелов В.А. Метод построения прогностических уравнений для определения высоты нижней границы облачности на основе полуэмпирических зависимостей // Труды ВКА им. Можайского. 2022. № 684. С. 62–68.

Алешина М.А., Семенов В.А. Изменения характеристик осадков на территории России в XX–XXI вв. по данным ансамбля моделей CMIP6 // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8. № 4. С. 424–440.

Алешина М.А., Семенов В.А., Чернокульский А.В. Исследование роли глобальных и региональных факторов в изменении экстремальности летних осадков на Черноморском побережье Кавказа по результатам экспериментов с моделью климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. Т. 3. С. 59–75.

Алита С.Л., Аппаева Ж.Ю. О пространственной эволюции области градообразования в одноячейковых градовых облаках // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2021. № 601. С. 116–124.

Алита С.Л., Борисова Н.А. Разработка концепции расположения мобильных пунктов воздействия на градовые процессы // Труды ГГО. 2020. № 599. С. 151–161.

Андреев А.И., Шамилова Ю.А. Детектирование облачности по данным КА Himawari-8 с применением сверточной нейронной сети // Исследование Земли из космоса. 2021. № 2. С. 42–52.

Андреев А.И., Шамилова Ю.А., Холодов Е.И. Применение сверточной нейронной сети для детектирования облачности по данным прибора МСУ-МР спутника "Метеор-М" № 2 // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 44–53.

Андреев Ю.В., Васильева М.А., Иванов В.Н. и др. Результаты экспериментальных исследований по рассеиванию теплых туманов с использованием сетчатых электрофильтров // Метеорология и гидрология. 2021. № 11. С. 123–130.

Анискина О.Г., Стогниева В.В., Толстоброва Н.Б. Прогноз гроз с помощью мезомасштабных гидродинамических моделей // Труды ВКА им. Можайского. 2022. № S685. С. 6–10.

Антохина О.Ю. Атмосферные осадки в бассейне реки Селенга и крупномасштабная циркуляция атмосферы над Евразией в июле // География и природные ресурсы. 2019. № 4(158). С. 104–115.

Аппаева Ж.Ю. Результаты статистических исследований основных характеристик грозо-градовых облаков по данным радиолокационных наблюдений // Труды ГГО. 2020. № 598. С. 188–196.

Аржанова Н.М., Коршунова Н.Н. Оценка многолетних изменений характеристик гололедно-изморозевых отложений на территории России // Труды ВНИИГМИ. 2021. № 188. С. 18–29.

Артюшина А.В., Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М. Влияние 3D эффектов облаков на интенсивность солнечного излучения в схеме лимбового зондирования Земли: результаты численных экспериментов // Труды ВКА им. Можайского. 2020. № S674. С. 87–91.

Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К. и др. Автоматические осадкосборники // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 118–123.

Асмус В.В., Иоффе Г.М., Крамарева Л.С. и др. Космический мониторинг опасных природных явлений на территории России // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 20–32.

Астафуров В.Г., Скороходов А.В. Использование результатов классификации облачности по спутниковым данным для решения задач климатологии и метеорологии // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 57–70.

Астафуров В.Г., Скороходов А.В., Курьянович К.В. Статистические модели характеристик облачности над Западной Сибирью в летний период по данным MODIS // Метеорология и гидрология. 2021. № 11. С. 20–35.

Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов В.А. и др. Численное моделирование влияния структуры поля ветра в атмосфере на макро- и микроструктурные характеристики конвективных облаков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 6. С. 669–680.

Ашабоков Б.А., Хибиев А.Х., Шхануков–Лафишев М.Х. Метод суммарной аппроксимации для уравнения, описывающего процессы дробления и замерзания капель в конвективных облаках // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2020. Т. 60. № 9. С. 1566–1575.

Баззаев Т.В., Владимиров С.А., Кочетов Н.М. и др. Способ укрупнения частиц гигроскопических реагентов, генерируемых пиротехническими изделиями для задач рассеяния теплых туманов // в: Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 08–10 сентября 2021 г. Сб. научн. тр. Нальчик, 2021 г. С. 302–307.

Барекова М.В., Инюхин В.С., Калов Х.М. и др. Радиолокационные исследования интенсивного градового процесса, развивавшегося над центральной частью Северного Кавказа 07.06.2012. // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2019. Т. 19. № 2. С. 64–78.

Безрукова Н.А., Чернокульский А.В. Российские исследования облаков и осадков в 2011–2014 гг. // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 577–589.

Безрукова Н.А., Чернокульский А.В. Российские исследования облаков и осадков в 2015–2018 гг. // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2020, Т. 56, № 4, С. 397–417.

Беккиев К.М., Шаповалов В.А., Шериева М.А., Лесев В.Н. Математическая модель конвективного облака в работах по активному воздействию на град // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 28–38.

Берюлев Г.П., Данелян Б.Г. Искусственное увеличение количества осадков. Результаты исследований и оперативно-производственных работ // Метеорология и Гидрология. 2021. № 9. С. 32–45.

Бирюков Е.Ю., Косцов В.С. Использование линейных регрессионных соотношений, полученных на основе модельных и экспериментальных данных, для определения водозапаса облаков из наземных микроволновых измерений // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 5. С. 386–394.

Бирюков Е.Ю., Косцов В.С. Применение регрессионного алгоритма к задаче исследования горизонтальной неоднородности водозапаса облаков по наземным микроволновым измерениям в режиме углового сканирования. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 8. С. 613–620.

Боброва Д.А., Казакова Е.Н. История исследования лавинных процессов на острове Сахалин // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 112–119.

Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Харламов М.А. Об оценках статистических характеристик дождевых осадков в Московском регионе // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 77–85.

Болгов Ю.В. Математическое моделирование динамики снежных лавин с использованием клеточных автоматов. // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 26–33.

Брусова Н.Е., Кузнецов И.Н., Нахаев М.И. Особенности режима осадков в Московском регионе в 2008–2017 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 1(371). С. 127–142.

Бусыгин В.П., Краснокутская Л.Д., Кузьмина И.Ю. Перенос оптического излучения подоблачных молний в космос Кузьмина // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 85–93.

Бухаров М.В., Бухаров В.М. Анализ быстро растущей мезомасштабной системы глубокой конвекции по картам спутникового диагноза // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2(376). С. 23–38.

Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Караваев Д.М., Щукин Г.Г. СВЧ радиометрические измерения содержания парообразной и жидкокапельной влаги в тропосфере // Труды ВКА им. Можайского. 2020. № S674. С. 128–132.

Бычков А.А., Петрунин А.М., Частухин А.В. и др. Перспективы применения наземных генераторов в работах по воздействию на облака // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 78–85.

Васильев Д.Ю., Кучеров С.Е., Семенов В.А., Чибилев А.А. Реконструкция атмосферных осадков по радиальному приросту сосны обыкновенной на Южном Урале Чибилев // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 37–42.

Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Торопова М.Л. и др. Влияние термических неоднородностей подстилающей поверхности на образование и развитие конвективных облаков и связанных с ними опасных явлений погоды // Труды ГГО. 2022. № 606. С. 32–49.

Ветров А.Л., Костарев С.В. Возможность использования ансамблевого мультимодельного прогноза сильных осадков для территории Пермского края на примере лета 2019 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 7. С. 35–49.

Владимиров С.А., Кирин Д.В., Крутиков Н.О., Пастушков Р.С. Аппроксимация функций распределения облачных капель и ледяных кристаллов по данным измерений микрофизического комплекса самолёта-лаборатории ЯК-42Д "Росгидромет" для построения численных моделей облаков и осадков и активных воздействий на них. // Всероссийская открытая конференциия по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 8–10 сентября 2021 г. Сб. науч. тр., Нальчик, 2021б. С. 8–12.

Волков В.В., Кирин Д.В., Петров В.В., Струнин А.М. Исследование микрофизических характеристик зимних облаков теплого фронта с борта самолета-лаборатории ЯК-42Д "Росгидромет" // Всероссийская открытая конференциия по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 8–10 сентября 2021 г. Сб. науч. тр., Нальчик, 2021б. С. 68–73.

Волков В.В., Колокутин Г.Э., Струнин М.А., Базанин Н.В. Бортовая система сбора данных самолета-лаборатории для исследования атмосферных процессов. // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 3. С. 104–110.

Волков В.В., Струнин М.А., Струнин А.М. Определение сдвига ветра и интенсивности турбулентности по данным самолета-лаборатории Як-42Д "Росгидромет". // Метеорология и гидрология. 2021а. № 9. С. 117– 129.

Волкова Е.В., Андреев А.И., Косторная А.А. Мониторинг характеристик облачного покрова и осадков по данным полярно-орбитальных и геостационарных спутников // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 45–56.

Волкова Е.В., Кухарский А.В. Автоматизированная технология диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды для Европейской территории России по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4(378). С. 43–62.

Володин Е.М. Равновесная чувствительность модели климата к увеличению концентрации CO2 в атмосфере при различных методах учета облачности // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 139–145.

Восканян К.Л., Заморин И.С., Крюкова С.В. и др. Сопоставление эффективности обнаружение метеорологических объектов двумя доплеровскими радиолокаторами на территории Ленинградской области // Труды ГГО. 2019. № 592. С. 80–97.

Гавриков А.В., Золина О.Г., Разоренова О.А. и др. Экстремальные осадки в июне 2021 г. над Черным морем в контексте их долгопериодной климатической изменчивости // Океанология. 2022. Т. 62. № 3. С. 357–364.

Галилейский В.П., Гришин А.И., Елизаров А.И. и др. Экспериментальное исследование отражения светового излучения от кристаллических частиц в нижней тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 11(406). С. 918–922.

Галин В.Я., Дымников П.В. Динамико-стохастическая параметризация облачности в модели общей циркуляции атмосферы // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 3–8.

Готюр И.А., Мешков А.Н., Рудь М.Ю., Яременко И.А. Метод поиска очагов кучево-дождевой облачности по данным космических аппаратов гидрометеорологического назначения с применением технологий искусственных нейронных сетей // Труды ВКА им. Можайского. 2020. № S674. С. 146–151.

Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 3. С. 435–446.

Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Тестирование комплексного метода прогноза молниевой активности // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12(383). С. 949–957.

Данелян Б.Г., Банкова Н.Ю., Хижняк А.Н., Ломакин И.В. Анализ повторяемости дней с туманами в крупных аэропортах юга России для планирования и разворачивания работ по активным воздействиям (рассеяние туманов, регулирование осадков) // в: Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 08–10 сентября 2021 г. Сб. научн. тр. Нальчик, 2021г. С. 298–302.

Данелян Б.Г., Кирин Д.В., Колокутин Г.Э., Спрыгин А.А. Ресурсная облачность для активных воздействий в основных районах агропроизводства европейской части России // в: Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 08–10 сентября 2021 г. Сб. научн. тр. Нальчик, 2021 г. С. 281–286.

Данилова И.В., Онучин А.А. Оценка пространственного распределения твердых атмосферных осадков в таежной зоне бассейна реки Енисей с использованием спутниковых данных // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 103–112.

Дементьева С.О., Ильин Н.В., Шаталина М.В. Мареев Е.А. Прогноз конвективных явлений и его верификация по данным наблюдений атмосферного электричества // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 150–157.

Дементьева Т.В., Коршунова Н.Н. Эмпирико-статистический анализ количества общей облачности и облачности нижнего яруса на территории России // Труды ВНИИГМИ. 2020. № 187. С. 197–204.

Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Распознавание сдвига ветра по данным метеорологического

радиолокатора // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 109–118.

Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. и др. Влияние сильного аэрозольного загрязнения воздуха на эволюцию конвективных облаков во время грозы в Китае по результатам трехмерного численного моделирования // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 55–67.

Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. и др. Численное моделирование эволюции и электрической структуры кучево-дождевого облака на северо-западе России // Метеорология и гидрология. 2020. № 4. С. 33–41.

Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. Исследование механизмов электризации и связи частоты электрических разрядов с радиолокационными характеристиками грозового облака в Китае // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 63–72.

Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Торопова М.Л. и др. Численное моделирование влияния электрических процессов на формирование опасных явлений погоды, связанных с конвективными облаками // Труды ГГО. 2019. № 595. С. 63–82.

Доронин А.П., Козлова Н.А., Петроченко В.М. Оценки пригодности переохлажденной облачности к рассеянию над центральным районом европейской территории России в интересах решения прикладных задач // Труды ВКА им. Можайского. 2019. № 671. С. 163–171.

Доронин А.П., Петроченко В.М., Гончаров И.В. и др. Оценки пригодности к рассеянию волнистообразных и слоистообразных облаков в Северо-западном районе европейской территории России в интересах гидрометеорологического обеспечения // Навигация и гидрография. 2020. № 59. С. 70–80.

Дрофа А.С. Об эффективности воздействия льдообразующими реагентами на конвективные облака // Труды ГГО. 2020. № 597. С. 34–50.

Дрофа А.С., Козлов С.В., Спрыгин А.А. Прогноз ресурсной конвективной облачности для активных воздействий // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 51–60.

Екайкин А.А., Тебенькова Н.А., Липенков В.Я. и др. Недооценка скорости снегонакопления в центральной части Антарктиды (станция Восток) по данным реечных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 114–125.

Елисеев А.В., Плосков А.Н., Чернокульский А.В., Мохов И.И. Связь частоты молний со статистическими характеристиками конвективной активности в атмосфере // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485. № 1. С. 76–82.

Жарашуев М. Измерение осадков с увеличенной площадью водосборника // Русский инженер. 2019. № 3(64). С. 45–48.

Жарашуев М.В. Методика автоматизированного статистического анализа разрядов “облако – земля” для территории Северного Кавказа // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 111–116.

Жарашуев М.В. Оптимизация работы радиолокационной сети Российской Федерации // Труды ГГО. 2022. № 606. С. 145–151.

Жарашуев М.В. Сопоставление статистических данных грозовой и градовой активности на территории Северного Кавказа // Труды ГГО. 2021. № 603. С. 145–154.

Жарашуев М.В. Статистический анализ повторяемости молниевых разрядов типа “облако – облако” на территории северокавказских республик и Ставропольском крае // Труды ГГО. 2019. № 595. С. 145–152.

Журба О.М., Алексеенко А.Н., Шаяхметов С.Ф., Меринов А.В. Исследование полициклических ароматических и нефтяных углеводородов в снеговом покрове на урбанизированной территории // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 10. С. 1037–1042.

Золотухина О.И. Термодинамические условия образования опасных конвективных явлений в районе космодрома “Восточный” // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. 2020. № S674. С. 181–187.

Иванова А.Р. Влияние обледенения на функционирование авиационного транспорта: состояние вопроса и проблемы прогнозирования // Метеорология и гидрология. 2021. № 7. С. 59–78.

Иванова А.Р. Мировой опыт наукастинга грозовой деятельности // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 71–83.

Иванова А.Р., Денисенко И.А. О возможности наукастинга гроз на московских аэродромах с использованием радарной и грозопеленгационной информации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1(375). С. 142–161.

Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Динамика эпизодов низкой облачности и ограниченной видимости на аэродромах Российской Федерации в период 2001–2020 гг // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 2(384). С. 53–68.

Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И. Прогноз максимальной толщины гололедных отложений Юсупов // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 5(400). С. 408–413.

Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И. Численные эксперименты по прогнозу гололедных явлений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 9. С. 735–741.

Ильин Н.В., Кутерин Ф.А. Оценка точности распознавания гроз по данным доплеровского метеорологического локатора ДМРЛ-С // Метеорология и гидрология. 2020. № 9. С. 104–112.

Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т. Оценка вклада различных гидрометеоров в суммарную радиолокационную отражаемость в градовых облаках // Труды ГГО. 2019. № 594. С. 107–119.

Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т. Прогноз града и оценка его размера на основе глобальной математической модели атмосферы // Труды ВКА им. Можайского. 2022. № S685. С. 133–140.

Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т. Прогноз града с заблаговременностью до трех суток по выходным данным глобальной модели атмосферы // Труды ГГО. 2020. № 598. С. 204–214.

Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т., Жарашуев М.В. Прогноз паводкообразующих осадков на территории Северного Кавказа с использованием глобальной модели атмосферы // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 80–86.

Казанцева А.С., Кадебская О.И., Дублянский Ю.В., Катаев В.Н. Результаты мониторинга изотопного состава атмосферных осадков на территории Северного и Среднего Урала // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 87–94.

Калинин Н.А., Быков А.В., Шихов А.Н. Объектно-ориентированная оценка краткосрочного прогноза

конвективных опасных явлений погоды в Пермском крае по модели WRF // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 3(398). С. 232–240.

Калинин Н.А., Сивков Б.А. Численный прогноз летних осадков разной интенсивности с использованием модели WRF и индексов неустойчивости атмосферы // Географический вестник. 2022. № 3(62). С. 92–108.

Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Ажигов И.О. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов и смерчей на Европейской территории России // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 1. С. 62–69.

Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Тарасов А.В. Анализ результатов численного прогноза ливневых осадков по модели WRF с применением различных параметризаций конвекции (на примере территории Пермского края) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 3(373). С. 43–59.

Калинин Н.А., Шихов А.Н., Чернокульский А.В. и др. Условия возникновения сильных шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы в лесной зоне европейской части России и Урала // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 35–49.

Калмыкова О.В., Федорова В.В., Фадеев Р.О. Анализ условий возникновения вспышки смерчей над Черным морем 16 июля 2019 г. и оценка успешности прогноза // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 1(379). С. 112–129.

Калмыкова О.В., Шершаков В.М., Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я. Автоматизированный прогноз смерчей у Черноморского побережья России: первый опыт и оценка его результативности // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 84–94.

Кальчихин В.В., Кобзев А.А. Определение параметров опасных метеорологических явлений, связанных с выпадением осадков, с использованием оптического осадкомера // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 10. С. 867–869.

Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Тихомиров А.А., Филатов Д.Е. Метод поэлементной калибровки оптико-электронного измерителя атмосферных осадков // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 10(393). С. 812–816.

Караваев Д.М., Лебедев А.Б., Щукин Г.Г., Ильин Г.Н. Перспективы применения методов наземной микроволновой радиометрии для синоптического анализа атмосферных фронтов и прогноза опасных явлений погоды // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 56–65.

Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Исследование вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков методом микроволновой радиометрии // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 11. С. 930–935.

Кисельникова В.З. Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков для теплого периода (май–сентябрь) 2016–2020 гг. по модели COSMO-Ru2 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2(380). С. 43–51.

Клещева Т.И., Поталова Е.Ю., Пермяков М.С. Сравнение данных глобальной сети локализации молний WWLLN и стандартных наблюдений на метеостанциях юга Дальнего Востока России // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 89–98.

Клименко Д.Е. Исследование пространственной редукции ливней Урала на основе радиолокационной информации // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 78–91.

Клименко Д.Е. Оценка предельных максимумов дождевых осадков физическими методами на основе спутниковых и радиолокационных данных наблюдений (на примере Среднего Урала) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 443–452.

Клименко Д.Е., Черепанова Е.С., Кузнецова Т.В. Оценка и картографирование параметров паводкоформирующих ливней в бассейне реки Тобол // География и природные ресурсы. 2019б. № 3. С. 165–172.

Клименко Д.Е., Черепанова Е.С., Кузьминых А.Ю. Оценка параметров распределений экстремальных ливней при учете нескольких событий в году // Водные ресурсы. 2019а. Т. 46, № 4. С. 438–446.

Ковалев Н.А., Нетягин О.В., Сажин И.В. Опыт искусственного увеличения осадков в целях тушения лесных пожаров в Сибири и на Дольнем Востоке в 2017–2021 гг.: предварительные результаты и вопросы оценки эффективности // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 71–77.

Кожевников В.Н. Облака как проявление волновых возмущений над горными хребтами // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 2. С. 138–148.

Корнеев В.П., Колосков Б.П., Бычков А.А. и др. Активные воздействия на облака с целью улучшения условий погоды в мегаполисах. // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 61–70.

Коршунов В.А. Многократное рассеяние в перистых облаках и его учет при интерпретации лидарных измерений в стратосфере // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 12(395). С. 969–975.

Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Параметры перистых облаков по данным лидарных измерений в Обнинске // Труды ГГО. 2021. № 602. С. 68–78.

Костарев С.В., Ветров А.Л., Сивков Б.А., Поморцева А.А. Исследование радиолокационных характеристик облачных систем при выпадении сильных дождей // Географический вестник. 2020. № 3(54). С. 113–124.

Костромитинов А.В., Яременко И.А. Метод прогнозирования тумана с использованием сверточных нейронных сетей // Труды ВКА им. Можайского. 2022. № S685. С. 186–193.

Кузнецов А.Д., Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Моделирование размера градин при активных воздействиях на облака // Труды. 2019. № 595. С. 132–144.

Кузнецов А.Д., Лялюшкин А.С., Михайлушкин С.Ю. О влиянии движения воздушных судов на развитие кучево-дождевой облачности // Труды ГГО. 2020. № 599. С. 162–175.

Кузьмин В.А. Исследование напряженности электрического поля атмосферы при грозах // Труды ГГО. 2021. № 601. С. 104–115.

Куличков С.Н., Чунчузов И.П., Попов О.Е. и др. Внутренние гравитационные и инфразвуковые волны во время урагана в Москве 29 Мая 2017 г // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 2. С. 32–40.

Куров А.Б., Геккиева Ж.М., Синькевич А.А. и др. Исследование особенностей работы грозопеленгационной системы Blitzortung // Труды ГГО. 2022. № 606. С. 50–62.

Курятникова Н.А., Малыгина Н.С., Митрофанова Е.Ю. Атмосферное поступление и разнообразие биоаэрозолей в зимних осадках на юге Западной Си-

бири // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 1(396). С. 19–24.

Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г. Анализ влияния мегаполиса Санкт-Петербург на осадки и ветер для валидации численного прогноза погоды // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 1(384). С. 36–45.

Леонов И.И., Соколихина Н.Н. Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4(382). С. 69–83.

Лиев К.Б., Кущев С.А. Анализ экономической эффективности противоградовых работ в Российской федерации // Труды ГГО. 2021. № 602. С. 124–133.

Макитов В.С., Инюхин В.С., Кущев С.А, Лиев К.Б. Формирование градового облака при слиянии конвективных ячеек // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, № 4. С. 448–455.

Малкарова А.М. Развитие работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы в Гидрометслужбе России // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 5–10.

Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Агбалян Е.В., Папина Т.С. Изотопный состав и регионы-источники зимних осадков в Надымской низменности // Лед и снег. 2020. Т. 60. № 1. С. 98–108.

Махотина И.А., Чечин Д.Г., Макштас А.П. Радиационный эффект облачности над морским льдом в Арктике во время полярной ночи по данным дрейфующих станций “Северный Полюс”-37, 39, 40 // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 514–525.

Митяев М.В., Герасимова М.В., Рыжик И.В., Ишкулова Т.Г. Нерастворимые фракции аэрозолей и тяжелых металлов в свежевыпавшем снеге на северо–западе Кольского полуострова в 2018 г. // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 3. С. 307–318.

Михайлов Е.Ф., Иванова О.А., Небосько О.А. и др. Вторичные аэрозоли пыльцы как атмосферные ядра конденсации // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 4. С. 64–72.

Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Синькевич А.А. и др. Физико-статистическая эмпирическая модель развития молниевой активности конвективных облаков// Труды ГГО. 2019. № 595. С. 83–105.

Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Абшаев А.М., Торопова М.Л. О методах воздействия на электрические процессы в облаках // Труды ГГО. 2021. № 602. С. 6–22.

Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Веремей Н.Е. и др. Динамика электрической структуры кучево-дождевых облаков // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 5. С. 341–353.

Михайлушкин С.Ю., Глибчук С.А., Заморин И.С. и др. Мезомасштабные особенности распределения радиолокационных характеристик кучево-дождевых облаков и их связь с приземными метеорологическими параметрами // Труды ГГО. 2021. № 603. С. 130–144.

Морозов В.Н. Взаимодействие облачных зарядовых структур с окружающей проводящей атмосферой с неоднородной электрической проводимостью // Труды ГГО. 2019. № 592. С. 23–79.

Морозов В.Н. Влияние облаков и аэрозольных частиц на распределение электрической проводимости в атмосфере // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2022. № 606. С. 78–93.

Мохов И.И., Парфенова М.Р. Взаимосвязь площади снежного покрова в Северном полушарии по спутниковым данным с приповерхностной температурой // Метеорология и гидрология. 2022. № 2. С. 32–44.

Муравьев А.В., Бундель А.Ю., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Верификация радиолокационного наукастинга областей осадков значительной площади с помощью обобщенного распределения Парето. Часть 1: элементы теории и методы оценки параметров // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022б. № 3(385). С. 6–41.

Муравьев А.В., Бундель А.Ю., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Верификация радиолокационного наукастинга областей осадков значительной площади с помощью обобщенного распределения Парето. Часть 2: приложение к прогнозам в теплый и холодный периоды 2017–2018 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022в. № 3(385). С. 42–77.

Муравьев А.В., Бундель А.Ю., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Опыт пространственной верификации радиолокационного наукастинга осадков: определение и статистика объектов, ситуаций и условных выборок // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022а. № 2(384). С. 6–52.

Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В., Зайченко М.Ю. Оперативная технология наукастинга осадков на основе радиолокационных данных и сравнительные результаты точечной верификации для теплого и холодного периодов года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2(372). С. 12–40.

Нагорский П.М., Жуков Д.Ф., Картавых М.С. и др. Характеристики и структура мезомасштабных конвективных систем над Западной Сибирью по данным дистанционных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 45–55.

Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Громова А.В. Грозовая активность над Западной Сибирью // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 123–134.

Пермяков М.С., Клещева Т.И., Поталова Е.Ю. и др. Локальные особенности грозовой активности на юге Дальнего Востока России // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 101–111.

Петров В.В. Микрофизические и термодинамические характеристики тропических конвективных облаков (по результатам исследований на Кубе) // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 84–94.

Пискунов В.Н., Гайнуллин К.Г., Петров А.М. и др. Моделирование кинетики формирования осадков в смешанном облаке // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 4. С. 438–447.

Подлесный С.В., Девятова Е.В., Саункин А.В., Васильев Р.В. Сопоставление методов определения облачного покрова над Байкальской природной территорией в декабре 2020 г // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 4. С. 102–109.

Полькин В.В., Панченко М.В., Терпугова С.А. Конденсационная активность частиц атмосферного аэрозоля разного размера по данным фотоэлектрического счетчика Терпугова // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 12(395). С. 956–964.

Полюхов А.А., Чубарова Н.Е., Володин Е.М. Влияние учета непрямого эффекта сульфатного аэрозоля на радиацию и облачность по данным климатической

модели ИВМ РАН // Известия Российской академии наук. Физикаатмосферыиокеана. 2022. Т. 58. № 5. С. 566–575.

Попов В.Б., Синькевич А.А., Янг Д. и др. Характеристики и структура кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Финским заливом // Метеорология и гидрология. 2020. № 9. С. 5–16.

Прессман Д.Я. К аппроксимации уравнений модели облачной атмосферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 11. С. 5–19.

Припачкин Д.А., Будыка А.К. Влияние параметров аэрозольных частиц на их вымывание из атмосферы дождевыми каплями // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 203–209.

Романский С.О., Вербицкая Е.М., Суляндзига П.Б. Результаты численного моделирования формирования и развития интенсивной конвекции, вызвавшей смерч в Благовещенске 31 июля 2011 г // Метеорология и гидрология. 2020. № 6. С. 25–35.

Ростокин И.Н., Ростокина Е.А., Федосеева Е.В., Щукин Г.Г. Многочастотные микроволновые радиометрические исследования радиотеплового излучения конвективной облачности в условиях формирования и развития опасных атмосферных метеоявлений // Труды ВКА им. Можайского. 2019. № 670. С. 140–145.

Рубинштейн К.Г., Губенко И.М., Игнатов Р.Ю. и др. Эксперименты по усвоению данных сети грозопеленгации // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 11. С. 936–941.

Саворский В.П. Коррекция оценок водозапаса облачности по данным спутникового мониторинга. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 78–86.

Самохвалов И.В., Брюханов И.Д., Шишко В.А. и др. Оценка микрофизических характеристик конденсационных следов самолетов по данным поляризационного лидара: теория и эксперимент. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 3. С. 193–201.

Свиязов Е.М., Ветров А.Л. Численное моделирование сильных летних осадков при различных вариантах шага регулярной сетки // Географический вестник. 2021. № 4(59). С. 73–83.

Семенец Е.С., Павлова М.Т. Кислотность атмосферных осадков, выпадающих на территории Северо-Западного федерального округа // Труды ГГО. 2019. № 593. С. 99–115.

Сивков Б.А., Калинин Н.А. Особенности термодинамического состояния атмосферы при сильных осадках на территории Пермского края // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1(375). С. 83–95.

Синицын А.В., Гулев С.К. Сравнение натурных и спутниковых данных об общем балле облачности для Атлантического океана в период 2004–2014 гг. // Океанология. 2022. Т. 62. № 1. С. 5–13.

Синькевич А.А., Боу Б., Михайловский Ю.П., Богданов Е.В. Изменение электрического состояния конвективных облаков при воздействиях с самолета кристаллизующим реагентом // Труды ГГО. 2020. № 596. С. 131–147.

Синькевич А.А., Боу Б., Павар С.Д. и др. радиолокационных и электрических характеристик грозовых облаков при воздействии на них кристаллизующим реагентом (штат Карнатака, Индия) // Метеорология и гидрология. 2021. № 8. С. 112–122.

Синькевич А.А., Куров А.Б., Михайловский Ю.П. и др. Исследование характеристик грозовых облаков на Северо-Западе России с использованием нейронных сетей // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 12(407). С. 1008–1014.

Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Матросов С.Ю. и др. Связь структуры конвективных облаков с частотой молний по результатам радиофизических измерений // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 37–51.

Синькевич А.А., Попов В.Б., Абшаев А.М. и др. Радиолокационные характеристики конвективных облаков разных регионов при переходе в грозовую стадию // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12. С. 932–936.

Синькевич А.А., Попов В.Б., Михайловский Ю.П. и др. Характеристики кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Ладожским озером по данным дистанционных измерений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 2. С. 153–158.

Синькевич А.А., Торопова М.Л., Михайловский Ю.П. и др. Особенности взаимосвязей электрических и радиолокационных параметров грозовых облаков в Индии (натурные исследования) // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 99–106.

Скакун А.А., Чихачев К.Б., Екайкин А.А. и др. Изотопный состав атмосферных осадков и природных вод в районе Баренцбурга (Шпицберген) // Лед и снег. 2020. Т. 60. № 3. С. 379–394.

Скороходов А.В. Изменчивость характеристик облачности по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 34–43.

Скороходов А.В. Исследование изменчивости характеристик облачных проявлений внутренних гравитационных волн в течение времени их существования на основе спутниковых данных HIMAWARI-8 // Известия Российской академии наук. Физикаатмосферыиокеана. 2020. Т. 56. № 2. С. 186–194.

Скороходов А.В. Классификация облачности в ночное время суток по спутниковым данным VIIRS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 240–251.

Скороходов А.В., Коношонкин А.В. Статистический анализ характеристик зеркально отражающих слоев в облаках верхнего яруса над Западной Сибирью по спутниковым данным MODIS // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 9(404). С. 711–716.

Скороходов А.В., Курьянович К.В. Использование данных CALIOP для оценки высоты нижней границы облаков на спутниковых снимках MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 43–56.

Созаева Л.Т. О возможности применения сфероидальной модели частиц для расчета характеристик рассеяния радиоволн от удлиненных облачных кристаллов // Труды ГГО. 2022. № 606. С. 133–144.

Созаева Л.Т. Обратное рассеяние радиоволн на сфероидальных дождевых каплях // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 8–9. С. 732–737.

Созаева Л.Т., Жабоева М.М. Обратное рассеяние радиолокационного излучения облачными и дождевыми каплями // Труды ГГО. 2020. № 599. С. 140–150.

Созаева Л.Т., Жабоева М.М. Оценка влияния деформации капель на определение интенсивности осадков

радиолокационным методом / Л. Т. Созаева, М. М. Жабоева // Труды ГГО. 2021. № 602. С. 104–115.

Сорокин А.Г., Добрынин В.А. О методике исследования инфразвуковых волн от гроз // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 1. С. 62–69.

Соснин Э.А., Кузнецов В.С., Панарин В.А. Энерговыделение в грозовом облаке, необходимое для образования транзиентных световых явлений средней атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 8(391). С. 617–620.

Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А. Комплексный прогностический признак опасных атмосферных явлений // Доклады Российской академии наук. НаукиоЗемле. 2022. Т. 504. № 1. С. 69–74.

Спрыгин А.А., Вязилов А.Е. Исследование мезомасштабной конвективной системы в центральных районах ЕТР 7 августа 2021 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 2(384). С. 69–91.

Струнин М.А. Методы исследования термодинамического состояния атмосферы с помощью самолета-лаборатории. Москва: Печатный салон Шанс, 2020, 212 с.

Струнин М.А. Оценка точности температурно-ветровых измерений в системе AMDAR по данным, полученным с помощью самолета-лаборатории Як-42Д “Росгидромет” // Метеорология и гидрология. 2020. № 8. С. 102–117.

Стулов Е.А., Сосникова Е.В., Кирин Д.В., Монахова Н.А., Поздеев В.Н. Исследование характеристик облачных ядер конденсации в Московском регионе. // Всероссийская открытая конференциия по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 8–10 сентября 2021 г. Сб. науч. тр., Нальчик, 2021, С. 63—68.

Тарасов А.В. Оценка точности алгоритмов выделения маски облачности по данным Sentinel-2 и PlanetScope. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 26–40.

Тентюков М.П., Габов Д.Н., Симоненков Д.В., Язиков Е.Г. Загрязнение поверхности снега полициклическими ароматическими углеводородами при образовании изморози // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 4. С. 483–493.

Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В., Кустова Н.В. и др. Оценка влияния поглощения на рассеяние света на атмосферных ледяных частицах для длин волн, характерных для задач лазерного зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 5. С. 381–385.

Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А. Характеристики обратного рассеяния света атмосферных ледяных гексагональных частиц искаженной формы в рамках приближения физической оптики // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 1(396). С. 37–41.

Тищенко В.А., Хан В.М., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Прогнозирование осадков и температуры в бассейне реки Амур на месячных и сезонных интервалах времени // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 24–39.

Ткачев И.В., Тимофеев Д.Н., Кустова Н.В., Коношонкин А.В. Банк данных матриц обратного рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах размерами 10–100 мкм для интерпретации данных лазерного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 3(386). С. 199–206.

Торопов П.А., Шестакова А.А., Ярынич Ю.И., Кутузов С.С. Моделирование орографической составляющей осадков на примере Эльбруса // Лед и снег. 2022. Т. 62. № 4. С. 485–503.

Торопова М.Л., Михайловский Ю.П., Веремей Н.Е. и др. Ансамблевый прогноз развития грозовой облачности на северо–западе ЕТР и верификация результатов моделирования // Труды ГГО. 2022. № 606. С. 7–31.

Торопова М.Л., Русин И.Н. Воспроизведение стратификации атмосферы с целью прогноза конвективных явлений при помощи мезомасштабной модели WRF-ARW / М.Л. Торопова, И.Н. Русин // Труды ГГО. 2019. № 593. С. 160–176.

Торопова М.Л., Синькевич А.А., Павар С. и др. Характеристики грозовых облаков муссонного и постмуссонного периодов в Индии / М.Л. Торопова, А.А. Синькевич, С. Павар [и др.] // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 68–79.

Травова С.В., Толстых М.А., Шашкин В.В. Оценка прогноза сильных осадков по данным оперативной глобальной модели атмосферы ПЛАВ20 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1(375). С. 96–112.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии, 2022. 676 с.

Филей А.А. Восстановление высоты верхней границы облачности по данным спутникового прибора МСУ-МР КА “Метеор-М” N 2-2 // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12(383). С. 918–925.

Филей А.А. Восстановление оптической толщины и эффективного радиуса частиц облачности по данным дневных измерений спутникового радиометра МСУ-МР // Оптика атмосферы и океана. 2019а. Т. 32. № 8. С. 650–656.

Филей А.А. Определение фазового состояния облачности по данным спутникового радиометра МСУ-МР космического аппарата “Метеор-М” № 2 // Оптика атмосферы и океана. 2019б. Т. 32. № 5. С. 376–380.

Хлебникова Е.И., Рудаков Ю.Л., Школьник И.М. Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 5–16.

Хлебникова Е.И., Школьник И.М., Рудакова Ю.Л. Климатические изменения характеристик редких экстремумов атмосферных осадков: результаты регионального моделирования для территории России // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 42–53.

Хуторова О.Г., Близоруков А.С., Дементьев В.В., Хуторов В.Е. Зондирование мезомасштабной структуры тропосферы в периоды прохождения атмосферных фронтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 254–262.

Хуторова О.Г., Маслова М.В., Хуторов В.Е. О мониторинге конвективных процессов с помощью приемников спутниковых навигационных систем // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6(401). С. 505–509.

Хучунаев Б.М., Байсиев Х.М., Геккиева С.О. Лабораторные исследования повышения льдообразующей эффективности пиротехнических составов на основе

АД1 // Наука. Инновации. Технологии. 2021а. № 2. С. 125–140.

Хучунаев Б.М., Байсиев Х.М., Геккиева С.О., Будаев А.Х. Экспериментальные исследования льдообразующей эффективности пиротехнического состава АД1 с добавками цинка // Труды ГГО. № 597. 2020. С. 51–60.

Хучунаев Б.М., Геккиева С.О., Будаев А.Х. Методы определения льдообразующей эффективности противоградовых изделий на лабораторных установках // Наука. Инновации. Технологии. 2021б. № 3. С.105–118.

Хучунаев Б.М., Геккиева С.О., Будаев А.Х. Лабораторные исследования влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов // Наука. Инновации. Технологии. 2021в. № 4. С. 209–226.

Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А. и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022а. № 5. С. 27–41.

Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И. и др. Смерчи в российских регионах // Метеорология и гидрология, 2021. № 2. С. 17–34.

Чернокульский А.В., Шихов А.Н., Ажигов И.О. и др. Шквалы и смерчи на европейской части России 15 мая 2021 г.: диагностика и моделирование // Метеорология и гидрология. 2022б. № 11. С. 71–90.

Черноус П.А. Опыт предупредительного спуска лавин в Хибинах. Проблемы и перспективы // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 14–25.

Черных И.В., Алдухов О.А. Годовой ход параметров сплошных облачных слоев над Арктикой на фоне их глобальных оценок по многолетним радиозондовым данным // Труды ВНИИГМИ 2019. № 185. С. 115–135.

Черных И.В., Алдухов О.А. Долгопериодные оценки числа облачных слоев по данным радиозондирования атмосферы за 1964–2017 гг. в разных широтных зонах // Метеорология и гидрология. 2020. № 4. С. 18–32.

Черных И.В., Алдухов О.А. Описание базы данных “Срочные данные о границах облачных слоев, восстановленных по результатам радиозондовых наблюдений температуры и влажности на 58 станциях территории Российской Федерации и соседних регионов” // Труды ВНИИГМИ. 2020. № 186. С. 21–34.

Чечко В.А., Топчая В.Ю. Распределение и состав аэрозольных частиц в дождевых осадках на побережье в Калининградской области // Метеорология и гидрология. 2019. № 5. С. 32–39.

Шакина Н.П., Горлач И.А., Скриптунова Е.Н. Использование спутниковых данных о конвективной облачности для анализа летных происшествий и их предупреждения // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 94–101.

Шамин С.И., Санина А.Т. Основные тенденции появления опасных гидрометеорологических явлений, нанесших ущерб на территории Российской Федерации // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. 2021. № 188. С. 154–166.

Шаповалов А.В., Шаповалов В.А., Стасенко В.Н., Лесев В.Н. Применение радиолокационных и грозорегистрационных данных и результатов численного моделирования для исследования связи “полная молниевая активность – опасные явления погоды” // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 59–68.

Шаталина М.В., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Характеристики опасных метеорологических явлений в Нижнем Новгороде по данным натурных наблюдений электрического поля // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 107–111.

Шатунова М.В., Хлестова О.Ю., Чубарова Н.Е. Прогноз микрофизических и оптических характеристик крупномасштабной облачности и ее радиационного воздействия с помощью мезомасштабной модели численного прогноза погоды COSMO // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 10. С. 824–831.

Швець Н.В. Интенсивность осадков: методы измерений, базы данных наблюдений, использование данных интенсивности осадков в исследовании климата и для решения прикладных задач // Труды ВНИИГМИ 2020. № 186. С. 69–89.

Швець Н.В., Разуваев В.Н., Катина С.П. Специализированный массив данных числа дней с осадками ≥1 мм // Труды ВНИИГМИ. 2019. № 185. С. 67–76.

Шилин А.Г. Исследование функционирования льдообразующих средств активных воздействий в реальных условиях применения // Известия высших учебных заведений. Северо–Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2021б. № 4 (212). С. 69–73.

Шилин А.Г. Исследование эффективности автономных пиротехнических генераторов льдообразующего аэрозоля в различных условиях // Труды ГГО. 2021а. № 602. С. 79–91.

Шилин А.Г., Хучунаев Б.М. Возможности увеличения эффективности пиротехнических генераторов льдообразующего аэрозоля // Наука. Инновации. Технологии. 2022а. № 1. С. 87–110.

Шилин А.Г., Хучунаев Б.М. Особенности формирования льдообразующего аэрозоля, образованного при горении пиротехнического состава в тракте сопла Лаваля // Метеорология и гидрология. 2022б. № 7. С. 94–100.

Шилин А.Г., Хучунаев Б.М., Будаев А.Х. Влияние растворимых соединений йода на эффективность льдообразующего аэрозоля // Труды ГГО. 2021. № 602. С. 92–103.

Шилин А.Г., Шилина А.С., Андреев Ю.В., и др. Исследование режимов адсорбции молекулярного йода и возможности модификации льдообразующих характеристик аэрозолей силикатной и алюмосиликатной природы соединений йода // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 86–93.

Шихов А.Н., Абдуллин Р.К., Чернокульский А.В. и др. Создание картографической базы данных и веб-сервиса “Конвективные опасные метеорологические явления на территории Центрального федерального округа” // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27. № 3. С. 120–135.

Шихов А.Н., Калинин Н.А., Быков А.В. и др. Смерчи в условиях слабой конвективной неустойчивости атмосферы: анализ двух случаев на востоке европейской территории России // Современные про-

блемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 255–268.

Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Ажигов И.О. Пространственно-временное распределение ветровалов в лесной зоне Западной Сибири в 2001–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022а. Т. 19. № 3. С. 186–202.

Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ажигов И.О. Идентификация мезомасштабных конвективных облачных систем со смерчами по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 223–236.

Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ярынич Ю.И. Оценка конвективной неустойчивости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5 // Оптика атмосферы и океана. 2022б. Т. 35. № 6(401). С. 429–435.

Шишов А.Е., Горлач И.А. Алгоритм распознавания и мониторинга облачности глубокой конвекции по данным МИСЗ на основе целочисленного программирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2(376). С. 39–59.

Abshaev M.T., Abshaev A.M., Aksenov A.A et al. CFD simulation of updrafts initiated by a vertically directed jet fed by the heat of water vapor condensation. // Scientific Reports. 2022. V. 12. P. 9356. https://doi.org/10.1038/s41598-022-13185-2

Abshaev M.T., Abshaev A.M., Zakinyan R.G., et al. Investigating the feasibility of artificial convective cloud creation // Atm. Res. 2020. V. 243. P. 104998. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104998

Abshaev M.T., Zakinyan R.G., Abshaev A.M. et al. Atmospheric conditions favorable for the creation of artificial clouds by a jet saturated with hygroscopic aerosol // Atm. Res. 2022. V. 277. P. 106323. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106323

Abshaev M.T., Zakinyan R.G., Abshaev A.M. et al. Influence of Atmosphere Near-Surface Layer Properties on Development of Cloud Convection. // Atmosphere. 2019. V. 10. P. 131. https://doi.org/10.3390/atmos10030131

Aleksandrova M. Cloudiness over the oceans at subarctic latitudes as a visible part of atmospheric moisture transport // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. V. 21. № 1. P. ES1004. https://doi.org/10.2205/2020ES000738

Aleshina M.A., Semenov V.A., Chernokulsky A.V. A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data // Environmental Research Letters. 2021. V. 16. P. 105004. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1cba

Andreev A.I., Pererva N.I., Kuchma M.O. Development of precipitation nowcasting method using geostationary satellite data // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2020. V. 17. № 6. P. 18–22. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-18-22

Basharin D., Stankūnavičius G. European precipitation response to Indian ocean dipole events // Atmospheric Research. V. 273. 2022. P. 106142. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106142

Bezrukova N.A., Chernokulsky A.V. Clouds and Precipitation // in: Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences: 2019–2022 (*Mokhov I. I. and A.A. Krivolutsky* eds.), Moscow: MAKS Press, 2023. 440 p. P. 86–150. https://doi.org/10.29003/m3460.978-5-317-07017-5

Bloshchinskiy V.D., Kuchma M.O., Andreev A.I., Sorokin A.A. Snow and cloud detection using a convolutional neural network and low-resolution data from the Electro-L № 2 Satellite // Journal of Applied Remote Sensing. 2020. V. 14(3). P. 034506. https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.034506

Chernokulsky A., Esau I. Cloud cover and cloud types in the Eurasian Arctic in 1936–2012 // International Journal of Climatology. 2019. V. 39(15). P. 5771–5790. https://doi.org/10.1002/joc.6187

Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., et al. Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era // Monthly Weather Review. 2020. V. 148(8). P. 3081–3110. https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0251.1

Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Azhigov I. Satellite-Based Study and Numerical Forecasting of Two Tornado Outbreaks in the Ural Region in June 2017 // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 1146. https://doi.org/10.3390/atmos11111146

Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., et al. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // Atmospheric Research. 2022. V. 267. P. 105928 https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105928

Chernokulsky A.V., Kozlov F.A., Zolina O.G., et al. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environmental Research Letters. 2019. V. 4. № 4. P. 045001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82

Ehrlich A., Wendisch M., Lüpkes C., et al. A comprehensive in situ and remote sensing data set from the Arctic CLoud Observations Using airborne measurements during polar Day (ACLOUD) campaign. // Earth Syst. Sci. Data. 2019. V. 11. P. 1853–1881. https://doi.org/10.5194/essd-11-1853-2019

Essery R., Kim H., Wang L., et al. Snow cover duration trends observed at sites and predicted by multiple models // The Cryosphere. 2020. V. 14, P.4687–4698. https://doi.org/10.5194/tc-14-4687-2020

Evstigneev V.P., Naumova V.A., Voronin D.Y. et al. Severe Precipitation Phenomena in Crimea in Relation to Atmospheric Circulation // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 1712. https://doi.org/10.3390/atmos13101712

Flossmann A.I., Manton M., Abshaev A. et al. Review of Advances in Precipitation Enhancement Research. // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2019. V.100(8). P. 1465–1480. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0160.1

Gabyshev D.N., Fedorets A.A., Aktaev N.E., et al. Acceleration of the condensational growth of water droplets in an external electric field // Journal of Aerosol Science. 2019. V. 135. P. 103–112.

Gabyshev D.N., Szakáll M., Shcherbakov D.V. et al. Oscillatory Signatures in the Raindrop Motion Relative to the Air Medium with Terminal Velocity // Atmosphere 2022, 13, 1137. https://doi.org/10.3390/atmos13071137

Golitsyn G.S., Chkhetiani O.G., Vazaeva, N.V. Clouds and Turbulence Theory: Peculiar Self-Similarity, 4/3 Fractal Exponent and Invariants. // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2022. V. 58. P. 645–648.

Hosseini-Moghari S.-M., Sun S., Tang Q., Groisman P.Ya. Scaling of precipitation extremes with temperature in

China's mainland: Evaluation of satellite precipitation data // Journal of Hydrology. 2022. V. 606. P.127391. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127391

Ianchenko N.I. Features of the fluoride behavior in the snow cover under the action of technological and weather conditions // Pure and Applied Chemistry. 2022. V. 94. № 9. P. 1071–1077. https://doi.org/10.1515/pac-2021-0901

Ianchenko N.I., Talovskaya A.V., Zanin A.A. Comparative assessment of fluorine, sodium, and lithium distributions in snow cover in Siberia // Pure and Applied Chemistry. 2022. V. 94. № 3. P. 261–267. https://doi.org/10.1515/pac-2021-0319

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson–Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Kalchikhin V., Kobzev A., Nagorskiy P. et al. Connected Variations of Meteorological and Electrical Quantities of Surface Atmosphere under the Influence of Heavy Rain // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 1195. https://doi.org/10.3390/atmos11111195

Kalnajs L.E., Davis S.M., Goetz J.D. et al. A reel-down instrument system for profile measurements of water vapor, temperature, clouds, and aerosol beneath constant-altitude scientific balloons // Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14. P. 2635–2648. https://doi.org/10.5194/amt-14-2635-2021

Karagodin A., Rozanov E., Mironova I. On the Possibility of Modeling the IMF By-Weather Coupling through GEC-Related Effects on Cloud Droplet Coalescence Rate // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 881. https://doi.org/10.3390/atmos13060881

Karashtin A.N., Shlyugaev Yu.V., Karashtina O.S. Cloud-to-ground lightning discharge indicator in the radio frequency emission of thunderclouds as observed in the Upper Volga region of Russia // Atmospheric Research. 2021. V. 256. P. 105559. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105559

Kharyutkina E., Pustovalov K., Moraru E., Nechepurenko O. Analysis of Spatio-Temporal Variability of Lightning Activity and Wildfires in Western Siberia during 2016–2021 // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 669. https://doi.org/10.3390/atmos13050669

Khaustov A., Redina, M. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Snow Cover of Moscow (Case Study of the RUDN University Campus) // Polycyclic Aromatic Compounds. 2021. V. 41(5). P. 1030–1041. https://doi.org/10.1080/10406638.2019.1645707

Khaykin S.M., Moyer E., Krämer M. et al. Persistence of moist plumes from overshooting convection in the Asian monsoon anticyclone // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22. P. 3169–3189. https://doi.org/10.5194/acp-22-3169-2022

Kislov A., Matveeva T., Antipina U. Precipitation Extremes and Their Synoptic Models in the Northwest European Sector of the Arctic during the Cold Season // Atmosphere. 2022, *13*, 1116. https://doi.org/10.3390/atmos13071116

Klimenko V.V., Lubyako L.V., Mareev E.A., Shatalina M.V. Ground-based measurements of microwave brightness temperature and electric field fluctuations for clouds with a different level of electrical activity // Atmospheric Research. 2022. V. 266. P. 105937. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105937

Korolev V., Gorshenin A. Probability Models and Statistical Tests for Extreme Precipitation Based on Generalized Negative Binomial Distributions // Mathematics. 2020. V. 8. P. 604. https://doi.org/10.3390/math8040604

Korolev V., Gorshenin A., Belyaev K. Statistical Tests for Extreme Precipitation Volumes // Mathematics. 2019. V. 7. P. 648. https://doi.org/10.3390/math7070648

Kostsov V.S., Ionov D.V., Kniffka A. Detection of the cloud liquid water path horizontal inhomogeneity in a coastline area by means of ground-based microwave observations: feasibility study // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. P. 4565–4587. https://doi.org/10.5194/amt-13-4565-2020

Kostsov V.S., Kniffka A., Stengel M., Ionov D.V. Cross-comparison of cloud liquid water path derived from observations by two space-borne and one ground-based instrument in northern Europe // Atmos. Meas. Tech. 2019. V. 12. P. 5927–5946. https://doi.org/10.5194/amt-12-5927-2019

Kotova E.I., Topchaya V.Yu. Chemical and algological composition of the snow cover at the mouth of the Onega River (White Sea basin) // Pure and Applied Chemistry. 2022. V. 94. № 3. P. 291–295. https://doi.org/10.1515/pac-2021-0309

Kozhevnikov A.Y., Falev D.I., Sypalov S.A. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow cover of the northern city agglomeration // Sci Rep. 2021. V. 11. P. 19074. https://doi.org/10.1038/s41598-021-98386-x

Krinitskiy M., Aleksandrova M., Verezemskaya P. et al. On the Generalization Ability of Data-Driven Models in the Problem of Total Cloud Cover Retrieval // Remote Sens. 2021. V. 13. P. 326. https://doi.org/10.3390/rs13020326

Krupnova T.G., Rakova O.V., Struchkova G.P. et al. Insights into Particle-Bound Metal(loid)s in Winter Snow Cover: Geochemical Monitoring of the Korkinsky Coal Mine Area, South Ural Region, Russia // Sustainability. 2021. V. 13. P. 4596. https://doi.org/10.3390/su13094596

Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Skalyga N.K. et al. Skills of Thunderstorm Prediction by Convective Indices over a Metropolitan Area: Comparison of Microwave and Radiosonde Data // Remote Sens. 2020. V. 12. P. 604. https://doi.org/10.3390/rs12040604

Kustova N., Konoshonkin A., Shishko V. et al. Coherent Backscattering by Large Ice Crystals of Irregular Shapes in Cirrus Clouds. // Atmosphere. 2022a. V. 13. P. 1279. https://doi.org/10.3390/atmos13081279

Kustova N., Konoshonkin A., Shishko V. et al. Depolarization Ratio for Randomly Oriented Ice Crystals of Cirrus Clouds // Atmosphere. 2022b. V. 13. P. 1551. https://doi.org/10.3390/atmos13101551

Kuzhevskaya I.V., Zhukova V.A., Koshikova T.S. etal. The spatio-temporal distribution of mesoscale convective complexes over the Southeastern Western Siberia // Geosphere Research. 2021. № 3. P. 115–124.

Lesev V. N., Shapovalov V. A., Ashabokov B. A. et al. 3D model of a convective cloud: the interaction of microphysical and electrical processes // JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 23(1). P. 1–18. https://doi.org/10.17654/HM023010001

Liang, Abshaev M., Abshaev A. et al. Water vapor harvesting nanostructures through bioinspired gradient-driven mechanism // Chem. Phys. Let. 2019. V. 728. P. 167–173. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2019.05.008

Liu Y., Zhu Y., Wang H., et al. Role of autumn Arctic Sea ice in the subsequent summer precipitation variability over East Asia // International Journal of Climatology. 2020 V. 40. P. 706– 722. https://doi.org/10.1002/joc.6232

Lockhoff M., Zolina O., Simmer C., Schulz J. Representation of Precipitation Characteristics and Extremes in Regional Reanalyses and Satellite- and Gauge-Based Estimates over Western and Central Europe // J. Hydrometeor. 2019. V. 20. P. 1123–1145. https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0200.1

Mikhailov E.F., Pöhlker M.L., Reinmuth-Selzle K. et al. Water uptake of subpollen aerosol particles: hygroscopic growth, cloud condensation nuclei activation, and liquid–liquid phase separation // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21. P. 6999–7022. https://doi.org/10.5194/acp-21-6999-2021

Mikhailov E.F., Vlasenko S.S. High-humidity tandem differential mobility analyzer for accurate determination of aerosol hygroscopic growth, microstructure, and activity coefficients over a wide range of relative humidity // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. P. 2035–2056. https://doi.org/10.5194/amt-13-2035-2020

Moskovchenko D., Pozhitkov R., Lodygin E., Toptygina M. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Snow Cover in the City of Tyumen (Western Siberia, Russia) // Toxics. 2022. V. 10. P. 743. https://doi.org/10.3390/toxics10120743

Mostamandi S., Predybaylo E., Osipov S., et al. Sea Breeze Geoengineering to Increase Rainfall over the Arabian Red Sea Coastal Plains // Journal of Hydrometeorology. 2022. V. 23(1). P. 3–24. https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0266.1

Noskova T.V., Lovtskaya O.V., Panina M.S. et al. Organic carbon in atmospheric precipitation in the urbanized territory of the South of Western Siberia, Russia // Pure and Applied Chemistry. 2022. V. 94. № 3. P. 309–315. https://doi.org/10.1515/pac-2021-0321

Okamoto H., Sato K., Borovoi A. et al. Interpretation of lidar ratio and depolarization ratio of ice clouds using spaceborne high-spectral-resolution polarization lidar // Opt. Express. 2019. V. 27. P. 36587–36600. https://doi.org/10.1364/OE.27.036587

Okamoto H., Sato K., Borovoi A. et al. Wavelength dependence of ice cloud backscatter properties for spaceborne polarization lidar applications // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 29178–29191. https://doi.org/10.1364/OE.400510

Opekunov A.Y., Opekunova M.G., Kukushkin S.Y. et al. Mineralogical–Geochemical Characteristics of the Snow Cover in Areas with Mining and Ore-Processing Facilities. // Geochem. Int. 2021. V. 59. P. 711–724. https://doi.org/10.1134/S0016702921060070

Petrov V.V., Bazanin N.V., Kirin D.V. et al. Relationship Between Microphysical Characteristics and Turbulence in Winter Clouds // in: Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring. Modern Problems of Atmospheric Physics. Springer, 2022. P. 269–275.

Santolaria-Otín M., Zolina O. Evaluation of snow cover and snow water equivalent in the continental Arctic in CMIP5 models // Climate Dynamics. 2020. V. 55. P. 2993–3016. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05434-9

Shepetov A., Antonova V., Kalikulov O. et al. The prolonged gamma ray enhancement and the short radiation burst events observed in thunderstorms at Tien Shan // Atmospheric Research. 2021. V. 248. P. 105266. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105266

Shestakova A.A., Toropov P.A. Orographic and lake effect on extreme precipitation on the Iranian coast of the Caspian Sea: a case study // Meteoroly and Atmospehric Physics. 2021. V. 133. P. 69–84. https://doi.org/10.1007/s00703-020-00735-4

Shikhov A., Chernokulsky A., Kalinin N. et al., Climatology and Formation Environments of Severe Convective Windstorms and Tornadoes in the Perm Region (Russia) in 1984–2020 // Atmosphere. 2021. V. 12. P. 1407. https://doi.org/10.3390/atmos12111407

Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., and Semakina A.V. A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017 // Earth Syst. Sci. Data. 2020. V. 12. P. 3489–3513, https://doi.org/10.5194/essd-12-3489-2020

Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Khaikin V.B., Kiselev A.V. Precipitable Water Vapor and Fractional Clear Sky Statistics within the Big Telescope Alt-Azimuthal Region // Remote Sensing. 2022. V. 14. P. 6221. https://doi.org/10.3390/rs14246221

Shishko V., Konoshonkin A., Kustova N. et al. Coherent and incoherent backscattering by a single large particle of irregular shape // Opt. Express. 2019. V. 27. P. 32984–32993. https://doi.org/10.1364/OE.27.032984

Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Timofeev D.N. Light scattering by spherical particles for data interpretation of mobile lidars // Optical Engineering. 2020. V. 59(8). P. 083103. https://doi.org/10.1117/1.OE.59.8.083103

Shuvalova J., Chubarova N., Shatunova M. Impact of Cloud Condensation Nuclei Reduction on Cloud Characteristics and Solar Radiation during COVID-19 Lockdown 2020 in Moscow // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 1710. https://doi.org/10.3390/atmos13101710

Sin'kevich A., Boe B., Pawar S. et al. Investigation of Thundercloud Features in Different Regions // Remote Sens. 2021. V. 13. P. 3216. https://doi.org/10.3390/rs13163216

Sterlyadkin V.V. Some Aspects of the Scattering of Light and Microwaves on Non-Spherical Raindrops // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 531. https://doi.org/10.3390/atmos11050531

Svechnikova E.K., Ilin N.V., Mareev E.A., Chilingarian A.A. Characteristic features of the clouds producing thunderstorm ground enhancements // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2021. V. 126. P.e2019-JD030895. https://doi.org/10.1029/2019JD030895

Sviashchennikov P., Drugorub A. Long-term trends in total cloud cover in the Arctic based on surface observations in 1985–2020 // Bulletin of Geography. Physical Geography Series. 2022. V. 22. P. 33–43. https://doi.org/10.12775/bgeo-2022-0003

Tarabukina L., Kozlov V. Seasonal Variability of Lightning Activity in Yakutia in 2009–2019 // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 918. https://doi.org/10.3390/atmos11090918

Tarasenkov M.V., Engel M.V., Zonov M.N., Belov V.V. Assessing the Cloud Adjacency Effect on Retrieval of the Ground Surface Reflectance from MODIS Satellite Data for the Baikal Region // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 2054. https://doi.org/10.3390/atmos13122054

Topchaya V.Yu., Chechko V.A. Study of insoluble atmospheric material of the snow cover of the coastal zone of the southeastern Baltic Sea // Regional Studies in Marine Science. 2022. V. 52. P. 102399. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102399

Topchaya V.Yu., Kotova, E.I. Composition of rainfall in the coastal zone of the Kaliningrad region of the Russian Federation (based on data from 2019) // Pure and Applied Chemistry. 2022. V. 94. № 3. P. 285–290. https://doi.org/10.1515/pac-2021-0302

Ukraintsev A.V., Plyusnin A.M., Zaikovskii V.I. Morphology and chemical composition of dispersed particles in the snow cover of burnt forest areas in Western Transbaikalia (Russia) // Applied Geochemistry. 2020. V. 122. P. 104723. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104723

Vasil'chuk Y., Chizhova J., Budantseva N. et al. Stable isotope composition of precipitation events revealed modern climate variability // Theor Appl Climatol. 2022. V. 147. P. 1649–1661. https://doi.org/10.1007/s00704-021-03900-w

Veselovskii I., Hu Q., Goloub P. et al. Combined use of Mie–Raman and fluorescence lidar observations for improving aerosol characterization: feasibility experiment // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. P. 6691–6701. https://doi.org/10.5194/amt-13-6691-2020

Vlasov D., Vasil'chuk J., Kosheleva N., Kasimov N. Dissolved and Suspended Forms of Metals and Metalloids in Snow Cover of Megacity: Partitioning and Deposition Rates in Western Moscow // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 907. https://doi.org/10.3390/atmos11090907

Vlasov D.V., Kasimov N.S., Eremina I.D., et al. Partitioning and solubilities of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity // Atmospheric Pollution Research. 2021. V. 12. № 1. P.255–271. https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.09.012

Volkov V.V., Petrov V.V., Krutikov N.O. Measurement of Cloud Water Content from a Research Aircraft. // in: Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring. Modern Problems of Atmospheric Physics. Springer. 2022. P. 339–346.

Volodin E. The mechanisms of cloudiness evolution responsible for equilibrium climate sensitivity in climate model INM-CM4-8 // Geophysical Research Letters. 2021. V. 48. P. e2021GL096204. https://doi.org/10.1029/2021GL096204

Volodina D.A., Talovskaya A.V., Devyatova A.Yu. et al. Elemental composition of dust aerosols near cement plants based on the study of samples of the solid phase of the snow cover // Pure and Applied Chemistry. 2022. V. 94. № 3. P. 269–274. https://doi.org/10.1515/pac-2021-0315

Voropay N., Ryazanova A., Dyukarev E. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia // Atmospheric Research. 2021. V. 254. P. 105528. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528

Vyshkvarkova E.; Sukhonos O. Compound Extremes of Air Temperature and Precipitation in Eastern Europe. // Climate. 2022. V. 10. P. 133. https://doi.org/10.3390/cli10090133

Wang Z., Shishko V., Kustova N. et al. Radar-lidar ratio for ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. 2021. V. 29. P. 4464–4474. https://doi.org/10.1364/OE.410942

Wang, P., Huang, Q., Tang, Q., et al. Increasing annual and extreme precipitation in permafrost-dominated Siberia during 1959–2018 // Journal of Hydrology. 2021. V. 603. P. 126865. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126865

Yakovlev E., Druzhinina A., Zykova E. et al. Assessment of Heavy Metal Pollution of the Snow Cover of the Severodvinsk Industrial District (NW Russia). // Pollution. 2022. V. 8(4). P. 1274–1293. https://doi.org/10.22059/poll.2022.341500.1438

Yakovleva V., Zelinskiy A., Parovik R. et al. Model for Reconstruction of γ-Background during Liquid Atmospheric Precipitation // Mathematics. 2021. V. 9. P. 1636. https://doi.org/10.3390/math9141636

Russian Studies on Clouds and Precipitation in 2019–2022

N. A. Bezrukova[1, *] and A. V. Chernokulsky[2, **]

[1]Central Aerological Observatory, Dolgoprudnyi, Pervomaiskaya 3, Moscow oblast, 141701 Russia

[2]Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Pyzhevsky per., 3, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

**e-mail: bezrukova@cao-rhms.ru*

***e-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru*

Results of Russian studies on cloud physics, precipitation, and weather modification in 2015–2018 are presented based on a survey prepared for the Russian National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences to the 28th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. Results concerning general issues of observation and modeling of clouds and precipitation, including convective clouds, issues of studying microphysical and optical characteristics of clouds, and weather modification are discussed.

Keywords: clouds, precipitation, convection, cloud microphysics, condensation nuclei, satellite and ground-based measurements of clouds and precipitation, cloud and precipitation modeling, weather modification

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2023, том 59, № 7, с. 915–929

УДК 551.506:551:582

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОЛЯРНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. А. В. Клепиков*

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга, д. 38, Санкт-Петербург, 199397 Россия

**e-mail: klep@aari.ru*

Поступила в редакцию 01.09.2023 г.
После доработки 07.11.2023 г.
Принята к публикации 15.11.2023 г.

Представлен обзор результатов российских полярных исследований в 2019–2022 гг., подготовленный в Комиссии по полярной метеорологии Национального геофизического комитета для Национального отчета по метеорологии и атмосферным наукам к XXVIII Генеральной Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (г. Берлин, Германия, 11–20 июля 2023 г.)*.

Ключевые слова: Арктика, Антарктика, изменение климата, метеорология, естественная изменчивость, потепление

DOI: 10.31857/S0002351523070040, **EDN:** TVOYTI

1. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МЕТЕОРОЛОГИИ АРКТИКИ

Описание современного состояния арктического климата дано в монографии [Климат Арктики, 2022], где представлены результаты исследований климата Арктики, выполненные в Институте физики атмосферы РАН. Приведены результаты анализа эмпирических данных для различных составляющих климатической системы Арктики: атмосферы, морских льдов, океана и суши с оценкой современных тенденций изменения. Рассмотрены характерные процессы и обратные связи в арктической климатической системе, важные для формирования долгопериодных аномалий климата в Арктике, а также механизмы влияния изменений климата в Арктике на циркуляцию атмосферы в средних широтах Северного полушария. Даны оценки возможных будущих изменений климата в Арктике по результатам численных расчетов с моделями климата при сценариях антропогенного воздействия, а также влияния этих изменений на продолжительность морской навигации вдоль Северного морского пути, морское волнение, характеристики многолетнемерзлых грунтов и распад придонных метангидратов.

В обзоре [Мохов, 2020] оцениваются особенности современных быстрых климатических изменений в Арктике и их последствий на основании результатов, полученных в последние годы. Наряду с данными наблюдений анализировались различные данные реанализа, а также результаты численных расчетов с глобальными и региональными версиями климатических моделей при разных сценариях антропогенных воздействий для XXI века. Представлены оценки сравнительной роли естественных и антропогенных факторов в формировании температурных трендов на разных временных горизонтах. Согласно полученным оценкам, доминирующая роль радиационного форсинга парниковых газов проявляется в арктических широтах на временных масштабах около полувека и более. Новые климатические явления, в частности формирование кратеров на Ямале в условиях тающей вечной мерзлоты, и новые эффекты, в том числе для тенденций изменения морского волнения в акваториях Арктического бассейна, свидетельствуют о достижении определенного критического уровня регионального и глобального потепления, сопоставимого с потеплением оптимума голоцена. При этом современные климатические модели проявляют способность не только воспроизводить ключевые особенности современных климатических режимов и их изменчивости, но и дают возможность получать адекватные прогностические оценки даже для сложных процессов в Арктике.

В статье [Мохов, 2022] получены аналитические условия для оценки вклада разных внутренних и внешних факторов в формирование арктического (полярного) усиления при потеплении для земной климатической системы – с более сильными изменениями приповерхностной тем-

* Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences: 2019–2022. Ed. by I.I. Mokhov, A. A. Krivolutsky. Moscow, MAKS Press. 2023. 440 p.

пературы в высоких широтах по сравнению с более низкими.

В работе [Демчев и др., 2020] приводятся результаты верификации значений приповерхностной температуры воздуха реанализов ERA-Interim и ERA-5 по данным, полученным с дрейфующих буев, наземных метеостанций, а также, впервые, по данным измерений, выполненных на дрейфующих станциях «Северный Полюс». Последние не ассимилировались ни в одном из рассматриваемых реанализов, что дает редкую возможность для независимого сравнения. По результатам сравнения с данными СП установлено, что средние ошибки для холодного сезона в Арктическом бассейне составляют: 2.25°C для ERA-I и 3.92°C для ERA5. Сравнение с данными дрейфующих буев позволяют сделать предположение о причине таких больших ошибок в реанализах. Часть буев была установлена с воздуха путем сброса на лед с борта воздушного судна. При этом температурный датчик буя был, с большой степенью вероятности, заглублен в снежный покров, который экранировал его от холодной атмосферы и способствовал прогреву вследствие потока тепла от нижележащего слоя морской воды. Ассимиляция таких данных вероятно и приводит к завышению реанализами температуры воздуха над дрейфующими льдами.

В [Акперов и др., 2019] на основе среднемесячных данных реанализа ERA-Interim (1979–2014 гг.) получены оценки вертикального градиента температуры g в тропосфере высоких широт Северного полушария с анализом его связи с приповерхностной температурой Ts в межгодовой изменчивости для разных сезонов. Проведен также анализ способности региональной климатической модели HIRHAM5 воспроизводить особенности распределения вертикального градиента температуры в тропосфере в арктических широтах и параметра чувствительности к изменению приповерхностной температуры dg/dTs, выявленные по данным реанализа. Отмечены региональные особенности связи вертикальной стратификации температуры в тропосфере с арктическим колебанием. Полученные по данным реанализа и модельным расчетам оценки имеют особую значимость в связи с более высокой изменчивостью и чувствительностью климата арктических широт при глобальных изменениях, что характеризуется так называемым арктическим усилением.

Изменения характеристик циклонической деятельности (частоты, глубины и размеров) в Арктике анализируются в [Akperov et al., 2019] на основе моделирования с использованием современных региональных климатических моделей (РКМ) инициативы Arctic-CORDEX и глобальных климатических моделей (ГКМ) из CMIP5 (Coupled Models Intercomparison project, phase 5) в рамках сценария репрезентативной траектории концентрации (RCP) 8.5. В большинстве РКМ к концу XXI века наблюдается увеличение повторяемости циклонов зимой (декабрь, январь, февраль) и уменьшение летом (июнь, июль, август). Однако, в половине РКМ циклоны становятся слабее и существенно меньше зимой и глубже и крупнее летом. РКМ, как и ГКМ, показывают увеличение повторяемости циклонов над морями Баффина и Баренцевым, к северу от Гренландии, Канадским архипелагом и снижение над Гренландским, Норвежским, Исландским, Бофорта и Карским морями, а также над субарктическими континентальными районами в зимний период. Летом модели дают к концу XXI века увеличение повторяемости циклонов над Центральной Арктикой и Гренландским морем и уменьшение над Норвежским и Карским морями. Снижение наблюдается и над высокоширотными континентальными районами, в частности над Восточной Сибирью и Аляской. Оценена чувствительность результатов расчетов по РКМ к граничным условиям и физике моделей. В целом, различные боковые граничные условия в ГКМ оказывают большее влияние на результаты моделирования по РКМ, чем различия в настройке и/или физике РКМ.

Влияние притока атлантических вод в Баренцево море на активность региональных циклонов в зимний период проанализировано в [Akperov et al., 2020] с использованием 10 ансамблевых расчетов по совместной модели арктической атмосферы-океана-морского льда HIRHAM-NAOSIM за период 1979–2016 гг. Модель показывает статистически устойчивую связь между притоком атлантических вод и изменчивостью климата в Баренцевом море. Анализ показывает, что аномально высокий приток атлантических вод приводит к изменению статической устойчивости и сдвига ветра в нижней тропосфере и, следовательно, к созданию благоприятных условий для циклогенеза над Баренцевом и Карском морями. Над Баренцевым морем увеличивается повторяемость циклонов, особенно интенсивных. Кроме того, циклоны в Баренцевом море становятся крупнее (увеличивается радиус) и сильнее (увеличивается интенсивность) в ответ на увеличение притока атлантических вод в Баренцево море по сравнению с годами аномально низкого притока атлантических вод.

Арктические циклоны, как преобладающая особенность совместной динамики арктической климатической системы, оказывают большое влияние на атмосферный перенос тепла и влаги, а также на деформацию и дрейф морского льда. Исследования, основанные на моделировании прошлого и будущего с использованием климатических моделей, показывают, что на арктический циклогенез влияет усиление глобального потепления в Арктике, например, растущий термический контраст между сушей и морем. Авторы работы [Akperov et al., 2021] предполагают, что биогеофизические обратные связи (БФОС) над сушей, в данном случае относящиеся, главным

образом, к потеплению из-за альбедо и похолоданию из-за испарения летом, могут потенциально существенно изменить циклоническую активность в Арктике. На основе региональной модели системы Земли (RCA-GUESS), которая объединяет динамическую модель растительности и региональную модель атмосферы, а также алгоритм обнаружения и отслеживания циклонов, в работе [Akperov et al., 2021] впервые оценивается влияние БФОС на характеристики арктических циклонов в рамках трех сценариев репрезентативных путей концентрации МГЭИК (т.е. RCP 2.6, RCP 4.5 и RCP 8.5). Анализ сосредоточен на весеннем и летнем периодах времени, поскольку предыдущие исследования показали, что в эти сезоны БФОС наиболее выражены. Было обнаружено, что БФОС, вызванные изменениями приземных тепловых потоков, приводит к изменению теплового контраста суши и моря и устойчивости атмосферы. Это, в свою очередь, заметно изменяет бароклинность атмосферы и, таким образом, приводит к изменению циклонической активности в Арктике, в частности к увеличению повторяемости циклонов над Северным Ледовитым океаном весной. В исследовании подчеркивается важность учета БФОС в прогнозировании арктических циклонов и роли циркуляции в арктической региональной системе Земли.

Параметризация процессов взаимодействия океана–морского льда–атмосферы представляет собой проблему для региональных климатических моделей (РКМ) Арктики, особенно для зимних условий, когда небольшие фракции тонкого льда или открытой воды вызывают сильные модификации пограничного слоя. Таким образом, обработка параметры морского льда и подсеточные потоки в РКМ имеет решающее значение. Однако, ряды данных по морскому льду для зимних условий редки. В работе [Heinemann et al., 2021a] представлены данные натурного (с борта судна) эксперимента “Трансарктика-2019” в конце арктической зимы для условий толстого однолетнего льда. Данные используются для верификации региональной климатической модели COSMOCLM (CCLM). Кроме того, данные спектрорадиометра среднего разрешения (MODIS) используются для сравнения температур поверхности льда (ТПЛ) модели морского льда CCLM. CLM используется в режиме прогноза (вложенном в ERA5) для Норвежского и Баренцева морей с разрешением 5 км и запускается с различными конфигурациями модели морского льда и параметризациями подсеточных потоков. Использование нового набора параметризаций дает улучшенные результаты при сравнении с данными натурных наблюдений. Сравнение с ТПЛ по данным MODIS позволяет проводить проверку на больших территориях, а также показывает хорошее качество расчетов по CCLM. Сравнение с аэрологическими зондированиями дважды в день во время “Трансарктики-2019”, ежечасными микроволновыми измерениями водяного пара на первых 5 км в атмосфере и ежечасными данными профиля температуры показывает очень хорошее представление температуры, влажности и структуры ветра во всей тропосфере для CCLM.

В 2014–2015 гг. в обсерватории Тикси (побережье моря Лаптевых) была проведена годовая полевая кампания с использованием измерений системы обнаружения звука и локации/радиоакустического зондирования (СОДАР/РАС) для исследования пограничного слоя атмосферы с упором на изучение струй малых высот (СМВ) в зимний сезон. В дополнение к вертикальным профилям температуры, скорости и направления ветра, полученным с помощью SODAR/RASS, был доступен набор дополнительных измерений обсерватории Тикси. В [Heinemann et al., 2021b] данные региональной атмосферной модели были использованы для помещения локальных данных в синоптический контекст и представлены два исследования событий СМВ. Статистика СМВ за шесть месяцев показывает, что примерно в 23% всех профилей присутствовали СМВ со средней скоростью и высотой струи около 7 м/с и 240 м соответственно. В 3.4% всех профилей наблюдались СМВ, превышающие 10 м/с. Основным движущим механизмом СМВ, по-видимому, является бароклинность, поскольку инерционных колебаний обнаружено не было. На СМВ высотой менее 200 м, вероятно, влияет местная топография.

Измерения структуры атмосферного пограничного слоя (АПС), выполненные в течение трех лет (октябрь 2017 г.–август 2020 г.) в российской обсерватории “Ледовая база мыс Баранова” (79.28° с.ш., 101.62° в.д.) с использованием ветрового профилемера SODAR, обсуждаются в [Heinemann et al., 2022]. В дополнение к вертикальным профилям скорости и направления ветра, полученным с помощью SODAR, обсерватория предоставила набор дополнительных измерений. Измерения ПСА использовались для верификации региональной климатической модели COSMO-CLM (CCLM) с разрешением 5 км на 2017–2020 гг. CCLM запускался с вложением в данные ERA5 в режиме прогноза на период измерения. Измерения SODAR в основном ограничивались скоростями ветра <12 м/с, поскольку сигнал часто пропадал при более сильном ветре. Данные SODAR показали эффект топографического контроля поля ветра в нижнем стометровом слое и некоторых струях малых высот (СМВ). Сравнение результатов CCLM с приземными данными обсерватории показала хорошее согласие для ветра и наличие погрешности в сторону уменьшения для температуры на высоте 2 м. Сравнение с данными SODAR показало наличие погрешности в сторону увеличения для скорости ветра примерно на 1 м/с для слоя ниже 100 м, которая возрастала до 1.5 м/с для более высоких уровней. В отличие от данных SODAR,

данные CCLM показали частое присутствие СМВ, связанных с топографическим каналом в проливе Шокальского. Хотя профили ветра SODAR ограничены по диапазону и имеют много пробелов, они представляют собой ценный набор данных для проверки модели. Однако, полную картину структуры АПС и климатологии каналообразующих событий можно было получить только на основе модельных данных. Климатологическая оценка показала, что на поле ветра у мыса Баранова влияло не только прямой топографический канал в условиях южных ветров через пролив Шокальского, но и канал через горный ущелье для западных ветров. СМВ были обнаружены в 37% всех профилей, и большинство СМВ были связаны с топографическими каналами, особенно СМВ со скоростью струи > 15 м/с (что составляло 29% всех СМВ). Анализ смоделированного поля ветра на высоте 10 м показал, что 99%-ная скорость ветра достигала 18 м/с и четко демонстрировала дипольную структуру направленного ветра на обоих выходах из пролива Шокальского. Климатология событий топографического канализирования показала, что такая дипольная структура была вызвана частым возникновением канализирования на обоих выходах. События канализирования продолжительностью не менее 12 часов происходили примерно 62 дня в году на обоих выходах из пролива Шокальского.

Простая аналитическая модель атмосферного пограничного слоя (АПС), связанного с морским льдом, представлена в [Chechin et al., 2019]. Он описывает охлаждение в случае ясного неба над морским льдом во время полярной ночи в присутствии разводий. Модельные решения показывают, что концентрация морского льда и скорость ветра оказывают сильное влияние на тепловой режим морского льда. Разводья вызывают как потепление АПС, так и повышение устойчивости над морским льдом. Модель описывает резкий переход АПС из слабоустойчивого "связанного" состояния в сильно устойчивое "отделенное" состояние при уменьшении скорости ветра. Пороговое значение скорости перехода ветра является функцией концентрации морского льда. Отделенное состояние характеризуется большой разницей между температурой воздуха и температурой поверхности морского льда, которая еще больше увеличивается из-за разводий. В связанном режиме температуры воздуха и поверхности увеличиваются почти линейно с увеличением скорости ветра из-за потепления от разводий, а также более медленного остывания АПС. Временные масштабы охлаждения демонстрируют немонотонную зависимость от скорости ветра будучи наименьшими при пороговом значении скорости ветра и возрастающими при слабом и сильном ветре. Теоретические решения хорошо согласуются с результатами более реалистичной одномерной модели и с наблюдениями, выполненными на трех российских дрейфующих станциях "Северный полюс" (СП-35, СП-37 и СП-39) и с поверхностным тепловым балансом Северного Ледовитого океана. Как результаты моделирования, так и наблюдения показывают сильную неявную зависимость чистого потока длинноволновой радиации на поверхности от скорости ветра.

В работе [Махотина и др., 2021] приводятся результаты анализа измерений облакомера на станциях "Северный Полюс"-37, 39 и 40. Для периода полярной ночи рассчитана повторяемость балла облачности, высот нижней границы облачности. Сравнение балла облачности по данным облакомера с данными визуальных наблюдений показало хорошее согласие, однако величина коэффициента корреляции зависит от интерпретации данных облакомера. В целом, для указанных станций характерно бимодальное распределение балла облачности с наибольшей повторяемостью ясного неба и сплошной облачности. Анализ повторяемости высоты нижней границы облачности показал, что наиболее характерны высоты нижней границы облачности ниже 600 м. В ноябре также наблюдаются высоты облачности в диапазоне 1000–2000 м, но их повторяемость снижается на протяжении зимы. Для облачности во время полярной ночи характерен сильный положительный радиационный эффект, который имеет отепляющий эффект на температуру поверхности льда и воздуха. Однако радиационный эффект облачности существенно отличается от станции к станции, как и повторяемость облачности и ее влияние на температурный режим. Эти различия могут стать предметом дальнейших исследований взаимосвязи характеристик облачности с другими процессами в климатической системе Арктики. Полученные статистические оценки существенно дополняют имеющиеся данные об облачном покрове Центральной Арктики.

В [Акперов и др., 2019] на основе результатов ансамблевых расчетов с использованием региональной климатической модели HIRHAM/NAOSIM для Арктики исследовано влияние притока океанических вод в Баренцево море на концентрацию морских льдов и характеристики атмосферы в зимние месяцы. Показана определяющая роль вариаций притока океанических вод в Баренцево море на режим морских льдов и приповерхностной температуры воздуха, а также статическую устойчивость атмосферы в зимний период. В работе [Мохов и Погарский, 2021] проведен анализ характеристик активности морского волнения в Арктическом бассейне с использованием модели WAWEWATCH III и результатов расчетов морских льдов и ветра в атмосфере с ансамблем глобальных климатических моделей CMIP5. Сделана оценка относительной роли ветровых волн и зыби в общей активности морских волн в Арктическом бассейне по модельным расчетам в сопоставлении с полученными с использованием

данных реанализа и спутниковых данных. Получены оценки возможных изменений морского волнения, сопровождающих значительное уменьшение протяженности морских льдов в Арктике по модельным расчетам для XXI века при разных сценариях антропогенных воздействий. Отмечены особенности различных режимов морских волн в Арктическом бассейне с оценкой роли ветровых волн, зыби, их взаимодействия, режимов хаотичного волнения типа волновой толчеи.

Прибрежные и припайные полыньи в арктических морях могут оказывать заметное влияние на арктический климат, повышая температуру холодного воздуха, поступающего зимой из материковой Сибири в эти моря и в Арктический бассейн. В работе [Prokhorova and Urazgildeeva, 2021] по данным полевых наблюдений и реанализа ERA-Interim изучено влияние полыней на приземную температуру воздуха и меридиональный перенос тепла и влаги. По результатам натурных наблюдений, проведенных в 1990-е гг., рассчитаны оценки притоков тепла с поверхности полыньи. Из реанализа получены меридиональные теплопереносы через 70° с.ш., профили температуры воздуха, скорости ветра в районе моря Лаптевых (100–140° в.д.) и полыньи, расположенной в море Лаптевых (120–130° в.д.). Подтверждено, что зимние переносы холодного воздуха с материка не оказывают охлаждающего действия на среднюю зимнюю температуру воздуха севернее 70° с.ш. за счет нагревающего воздействия полыньи.

В работе [Мохов и Парфенова, 2022а] получены количественные оценки связи внутригодовых и межгодовых вариаций протяженности снежного покрова и морских льдов в Северном полушарии с изменениями приповерхностной температуры на основе современных спутниковых данных и данных реанализа для периода 1979–2020 гг. Полученные новые результаты свидетельствуют об общей значимой когерентности и отрицательной корреляции с приповерхностной температурой протяженности снежного покрова и морских льдов не только в годовом ходе, но и для большинства месяцев в межгодовой изменчивости. При этом проявляются особенности в осенние месяцы, связанные с региональными особенностями изменчивости температурного режима и протяженности снежного покрова в сезон его формирования в Евразии и Северной Америке. Для зимних месяцев отмечено увеличение по абсолютной величине параметров чувствительности площади снежного покрова и морских льдов к температурным вариациям в течение последних десятилетий и коэффициентов их корреляции, а для теплых месяцев года – противоположные изменения. Наряду со статистически значимой отрицательной корреляцией общей протяженности снежного покрова и морских льдов с вариациями полушарной приповерхностной температуры в годовом ходе при кросс-вейвлетном анализе отмечена статистически значимая отрицательная корреляция для наиболее долгопериодных междесятилетних вариаций с проявлением в последние годы значимой антикорреляции для межгодовых вариаций, в частности для вариаций с периодичностью, характерной для явлений Эль-Ниньо.

В [Мохов и Парфенова, 2022б] получены количественные оценки связи внутригодовых и межгодовых вариаций протяженности снежного покрова и морских льдов в Северном полушарии с изменениями приповерхностной температуры на основе современных спутниковых данных и данных реанализа для периода 1979–2020 гг. Полученные новые результаты свидетельствуют об общей значимой когерентности и отрицательной корреляции с приповерхностной температурой протяженности снежного покрова и морских льдов не только в годовом ходе, но и для большинства месяцев в межгодовой изменчивости. При этом проявляются особенности в осенние месяцы, связанные с региональными особенностями изменчивости температурного режима и протяженности снежного покрова в сезон его формирования в Евразии и Северной Америке. Для зимних месяцев отмечено увеличение по абсолютной величине параметров чувствительности площади снежного покрова и морских льдов к температурным вариациям в течение последних десятилетий и коэффициентов их корреляции, а для теплых месяцев года – противоположные изменения. Наряду со статистически значимой отрицательной корреляцией общей протяженности снежного покрова и морских льдов с вариациями полушарной приповерхностной температуры в годовом ходе при кросс-вейвлетном анализе отмечена статистически значимая отрицательная корреляция для наиболее долгопериодных междесятилетних вариаций с проявлением в последние годы значимой антикорреляции для межгодовых вариаций, в частности для вариаций с периодичностью, характерной для явлений Эль–Ниньо.

В [Сакерин и др., 2019] обсуждаются результаты измерений комплекса физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля: аэрозольной оптической толщи, концентраций аэрозоля и сажи, элементного и ионного составов аэрозоля, содержания в нем органического и элементного углерода, а также изотопного состава углерода в пробах аэрозоля и снега в районе научно-исследовательского стационара ААНИИ “Ледовая база “Мыс Баранова” на архипелаге Северная Земля. Показано, что средние значения большинства характеристик аэрозоля, измеренных в апреле–июне 2018 г., немного ниже, чем в арктическом поселке Баренцбург (архипелаг Шпицберген), и в несколько раз меньше, чем на юге Западной Сибири в этот же период.

В [Sakerin et al., 2019] обсуждаются результаты сравнения средних физико-химических характеристик аэрозоля в соседних районах: в арктиче-

ском поселке Баренцбург (арх. Шпицберген) и над Баренцевым морем. Отмечено небольшое превышение (менее 0.02) аэрозольной оптической толщи атмосферы в островном районе относительно морского. Более значительно различаются микрофизические характеристики аэрозоля в приземном слое: концентрации сажи выше в Баренцбурге (в 4 раза), а концентрации частиц – над морем (в 2.4 раза). Абсолютные концентрации ионов в атмосфере Баренцбурга кратно меньше, чем над морем. Однако по относительному содержанию в обоих районах преобладают ионы Na^+, Cl^- и NH_4^+, SO_4^{2-}, что свидетельствует о равнозначности вклада континентальных и морских источников.

Химический состав (ионы, элементы, полициклические ароматические углеводороды) атмосферного аэрозоля в различных районах Северной Арктики, европейской и российской частях Северного Ледовитого океана (СЛО), морях северных широт и Дальнего Востока рассматривается в [Голобокова и др., 2020а]. Исследования выполнялись с морских судов по маршрутам их следования (НИС “Академик Мстислав Келдыш”, НЭС “Академик Трешников”, НИС “Профессор Мультановский”). Пробы воздуха отбирались по методике, принятой в международных сетях программ мониторинга атмосферы в Юго-Восточной Азии (EANET) и Европе (EMEP). Средняя сумма концентраций ионов и отдельных ионов в аэрозоле над морями Северной Атлантики и европейской частью СЛО согласуется с измерениями в море Лаптевых и Карском море в 2018 и 2019 гг. Повышенные значения ПАУ в аэрозоле морей и СЛО центральной части Российской Арктики совпадают с повышенными концентрациями ионов и микроэлементов в составе аэрозоля. Отмечается различие в распределении концентраций микроэлементов в составе аэрозолей морей Северной Атлантики и центрального района Российской Арктики, что может свидетельствовать о разных источниках этих компонентов.

Результаты исследований аэрозоля в арктической атмосфере, включая аэрозольную оптическую толщину (АОТ), концентрации аэрозоля и сажи, а также химический состав аэрозоля, представлены в [Sakerin et al., 2020]. Средние характеристики аэрозоля, измеренные в ходе девяти экспедиций (2007–2018 гг.) в евразийском секторе Северного Ледовитого океана, составили 0.068 для АОТ (0.5 мкм); 2.95 $см^{-3}$ для числовых концентраций частиц; 32.1 $нг/м^3$ для массовой концентрации сажи. В пространственном распределении аэрозоля выявлено примерно двукратное снижение средних характеристик в восточном направлении (от Баренцева моря к Чукотскому морю). Средние характеристики аэрозоля над Баренцевым морем уменьшаются в северном направлении: концентрации сажи в 1.5 раза; концентрации частиц в 3.7 раза. Эти особенности пространственного распределения обусловлены главным образом изменениями содержания мелкодисперсного аэрозоля, а именно: истечениями дымов от лесных пожаров и антропогенного аэрозоля. Отдельно авторы рассмотрели измерения характеристик аэрозоля в ходе двух экспедиций 2019 г.: на севере Баренцева моря (апрель) и по Северному морскому пути (июль–сентябрь). Во второй экспедиции средние характеристики аэрозоля оказались выше многолетних значений: АОТ достигала 0.36, концентрация частиц – до 8.6 $см^{-3}$, концентрация сажи – до 179 $нг/м^3$. На повышенное содержание аэрозоля повлияли частые выбросы дыма от лесных пожаров. Основной (99%) вклад в элементный состав аэрозоля в исследуемых регионах внесли Ca, K, Fe, Zn, Br, Ni, Cu, Mn и Sr. Пространственное распределение химического состава аэрозолей было аналогичным микрофизических характеристик. Наименьшие концентрации органического и элементарного углерода (ОУ, ЭУ) и большинства элементов наблюдаются в апреле на севере Баренцева моря, а максимальные – в дальневосточных морях и на юге Баренцева моря. Среднее содержание углерода в аэрозоле над морями азиатского сектора Северного Ледовитого океана составляет ОУ = 629 $нг/м^3$, ЭУ = 47 $нг/м^3$.

Данные глобального реанализа о температуре приземного воздуха (ТПВ) за последние десятилетия указывают на максимальное потепление в северной части Баренцева региона. Однако, нехватка наблюдений препятствует достоверности данных реанализа в этой “горячей” точке Арктики. В [Isaksen et al., 2022] авторы изучают потепление за последние 20–40 лет на основе новых доступных наблюдений ТПВ и комплексного набора данных ТПВ с контролируемым качеством с северных архипелагов в Баренцевом море. Выявлен статистически значимый рекорд – сильное годовое потепление до 2.7°C за десятилетие с максимумом осенью до 4.0°C за десятилетие. Результаты сравниваются с самыми последними наборами данных глобального и арктического регионального реанализа, а также с данными дистанционного зондирования концентрации морского льда, температуры поверхности моря и ледовыми картами высокого разрешения. Характер потепления в первую очередь соответствует сокращению морского ледяного покрова и подтверждает общие пространственные и временные закономерности, представленные реанализом. Однако, наши результаты предполагают даже более высокую скорость потепления и более сильную связь ТПВ с концентрацией морского льда, чем было известно в этом регионе до сих пор.

Электронные архивы данных стандартных метеорологических наблюдений (среднесуточные/месячные температуры приземного воздуха – ТПВ) на метеостанциях Бухта Тихая (остров Гукера, 1929–1960 гг.) и обсерватории Кренкеля (остров Хейса,

1957–2017 гг.) на Земле Франца-Иосифа (ЗФИ) представлены в [Ivanov et al., 2021a]. Проанализированы параллельные ряды данных ТПВ, сделанные в 1958 и 1959 годах на обеих метеостанциях. Также представлены уравнения линейной регрессии, использованные для экстраполяции репрезентативных данных наблюдений обсерватории Кренкеля за период 1929–1957 гг. Оценка отдаленных изменений ТПВ на ЗФИ проводилась на основе анализа полученных рядов (1929–2017 гг.). Основные выводы: общее потепление на архипелаге ЗФИ составило 1.6–1.8°C (0.2°C/десятилетие) за весь доступный период инструментальных наблюдений (1929–2017 гг.); самые высокие темпы потепления были зафиксированы в марте-апреле и составили 0.6°C/десятилетие; особенно сильное потепление наблюдается с 1990-х гг.; годовая температура увеличилась на 6.3°C (2.2°C/десятилетие) за период 1990–2017 гг. и на 5.2°C (2.9°C/десятилетие) за период 2000–2017 гг.; за период 1990–2017 гг. максимальная скорость потепления наблюдалась в период с октября по февраль и составляла 4.4°C/десятилетие; за период 2000–2017 гг. максимальная скорость потепления наблюдалась в период с января по апрель и с ноября по декабрь и составляла 5.6°C/десятилетие; доминирующие сезоны года – зима (ноябрь–апрель), весна (май), лето (июнь–сентябрь) и осень (октябрь); за весь период наблюдений наибольшее повышение температуры наблюдалось в зимний сезон; в период современного потепления (1990–2017 гг.) наибольшее повышение температуры наблюдалось зимой и осенью.

В статье [Ivanov et al., 2021b] рассматриваются региональные особенности климата Шпицбергена на основе данных регулярных метеорологических наблюдений, полученных на норвежских, российских и польских станциях. Особое внимание уделено пространственным особенностям многолетнего режима температуры приземного воздуха (ТПВ). Климатические нормы (1961–1990 гг., в соответствии с рекомендациями ВМО), рассчитанные по всем метеостанциям, а также многолетние изменения пространственных градиентов ТПВ и оценки размаха годовых колебаний, выявили станции (районы) с “континентальным” и “морским” типом климата, а также тенденции пространственных неоднородностей климата Шпицбергена. Темпы современного потепления климата (1990–2016 гг.) были в среднем в три раза выше по сравнению с периодом после Второй мировой войны (1948–2016 гг.). Анализируется континентальность и аномальность климата. Сформулированы выводы о закономерности изменения пространственных особенностей климата и проявлении его аномального характера в разные периоды (1960–1970, 1988 и 2005–2014 гг.).

На архипелаге Шпицберген в арктической части Северной Атлантики происходят быстрые изменения приземного климата и распределения морского льда, что оказывает воздействие на климатическую систему и местное сообщество. В исследовании [Dahlke et al., 2020] используются данные наблюдений за температурой приземного воздуха (ТПВ) в 1980–2016 гг. на всем архипелаге Шпицберген и за протяженностью морского льда (ПМЛ) на оперативных картах морского льда для систематической оценки долгосрочных изменений и региональных различий. Близость к теплым водным массам Западно-Шпицбергенского течения приводит к заметно более теплому климату в западных прибрежных регионах по сравнению с северным и восточным Шпицбергеном. Это накладывает отпечаток на климатологию ПМЛ на юге и западе Шпицбергена, где годовые максимумы 50–60% площади ледового покрова существенно меньше 80–90% в северных и восточных фьордах. Из-за усиления зимнего потепления местный климат смещается в сторону более морских условий, и в отдельных регионах наблюдается сокращение ПМЛ на 5–20% за десятилетие, так что ряд фьордов на западе были практически свободны ото льда в последние зимы. Самое сильное снижение вызвано воздействием ТПВ и происходит в течение последних одного – двух десятилетий во всех регионах; в то время как в 1980-х и 1990-х годах усиление северных ветров и дрейф морского льда могло объяснить 30–50% изменчивости ПМЛ вокруг северного Шпицбергена, где они, соответственно, привели к увеличению ПМЛ. Предполагается, что при продолжающемся потеплении как метеорологические, так и криосферные условия на Восточном Шпицбергене будут становиться все более похожими на то, что уже наблюдается в западных фьордах, а именно будет наблюдаться подавление типичных арктических условий.

В [Священников и др., 2020] приведены результаты исследования временной изменчивости циркуляции атмосферы в Западной Арктике (Норвежское и Баренцево моря). Для характеристики атмосферной циркуляции был использован ежедневный архив форм циркуляции E, W, C по классификации Гирса–Вангенгейма, охватывающий период с 1891 по 2016 г. Особое внимание уделено оценке различий в условиях погоды в современный период потепления 1985–2015 гг. и в период 1920–1950 гг., отмечаемый как период первого потепления в Арктике. Для холодного (ноябрь–март) и теплого (апрель–октябрь) сезонов определены тенденции изменения повторяемости форм циркуляции и вычислена повторяемость числа дней подряд с одинаковой формой циркуляции атмосферы, которую можно рассматривать как характеристику устойчивости условий погоды в рассматриваемые периоды потепления. Исследования показали, что для обоих периодов потепления характерно преобладание повторяемости формы циркуляции E в теплый сезон. Современный период потепления в изучаемом районе, по сравнению с периодом первого потепления, характеризу-

ется увеличением повторяемости формы циркуляции С малой продолжительности. Можно сделать вывод, что современный климатический режим характеризуется повышением приземной температуры воздуха и при этом менее устойчивыми условиями погоды.

В [Ivanov, 2019] анализируются наблюдаемые общие черты и различия “раннего” и “современного” потепления. Использованы наиболее длительные ряды метеорологических наблюдений, выполненных на архипелаге Шпицберген. Изучены фазы роста приземной температуры воздуха. Показано, что “раннее” потепление было более значительным по сравнению с “современным”. Наиболее значительные аномалии наблюдаются в зимние месяцы при “раннем” потеплении, тогда как “современное” потепление фиксируется в течение всего года.

В [Скакун и др., 2020] приведена интерпретация изотопных исследований проб воды, снега и льда, отобранных на ледниках Альдегонда, Западный и Восточный Грёнфьорд и в их долинах (озера, снежники, реки), а также в долине оз. Конгресс. На основании анализа изотопного состава атмосферных осадков в поселке Баренцбург в 2016–2017 гг. обсуждается использование изотопного состава как индикатора источника влаги для атмосферных осадков.

Химический состав (ионы, элементы, полициклические ароматические углеводороды) аэрозольных и газообразных примесей (SO_2, HNO_3, HCl, NH_3) в приземном слое атмосферы Баренцбурга, расположенного на острове Западный Шпицберген, проанализирован в [Голобокова и др., 2020б]. Атмосферные аэрозоли и газообразные примеси, приносимые в Арктику из средних широт и оседающие на снегу и льду, не только взаимодействуют с различными природными объектами, но и распространяются на большие расстояния с таянием загрязненного снега и льда. Отбор проб воздуха проводился в соответствии с методологией, принятой международными сетями программ мониторинга атмосферы в Юго-Восточной Азии (EANET) и Европе (EMEP). В 2011–2015 гг. наблюдения за химическим составом приземного слоя атмосферы проводились ежедневно в световой сезон (апрель–сентябрь) и ежемесячно в период с апреля 2016 г. по 2018 г. Наибольшие суммарные концентрации ионов наблюдались в 2011–2012 гг. Сезонная изменчивость концентраций ионов в аэрозоле характеризовалась высокими значениями в холодный период (октябрь–февраль) и низкими значениями в теплый (май–июнь). Высокие значения коэффициента корреляции между ионами Na^+ и Cl^- ($r = 0.93$), а также между Mg^{2+} и Cl^- ($r = 0.81$) в течение года показывают, что основным источником аэрозоля является морская поверхность. Значительная корреляция между ионами K^+, NO_3^-, NH_4^+, SO_4^{2-}, K^+, SO_4^{2-} в полярной ночи указывает на влияние местных источников: добычу угля на шахте и его сжигание на теплоэлектростанциях. На выбросы полициклических ароматических углеводородов и газообразных примесей (SO_2, HNO_3) в атмосферу, особенно в период полярной ночи, также влияют местные источники. Среди элементов максимальное обогащение аэрозоля выявлено As, Cr, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, W, Pb при низком содержании Cd, Sn, Sb, W, Pb в углях, шламах. и на подстилающей поверхности. На основе элементного состава аэрозоля и обратно-траекторного анализа показано, что в район поселка Баренцбург из средних широт приходят воздушные массы, обогащенные тяжелыми металлами.

В [Метан, 2022] рассмотрены источники и стоки метана, представлены количественные оценки соотношения естественных (природных) и антропогенных выбросов в атмосферу метана в России и в мире. Выполнен анализ роли метана в атмосферных фотохимических процессах с оценкой современных изменений концентрации метана в атмосфере и их причин. Особое внимание уделено выбросам метана в Арктической зоне, включая эмиссию метана из многолетнемерзлых болот России. Представлены результаты сравнительного анализа систем коэффициентов, используемых при определении эмиссии метана в атмосферу в национальных кадастрах. Представлены соответствующие коэффициенты для производственных процессов нефтяной и газовой промышленности. Рассмотрены новые метрики для оценки выбросов парниковых газов. Особое внимание уделено факторам, влияющим на глобальные и региональные изменения климата с оценкой роли антропогенных выбросов метана в атмосферу, в том числе с использованием различных моделей земной системы.

В последние годы в высокоширотных районах континентальной вечной мерзлоты наблюдаются новые геофизические явления. С 2014 г. на территории полуострова Ямал и соседних регионов обнаружены новые кратеры диаметром 10–20 м. Они связаны с выбросами газов, которые могли образоваться при диссоциации реликтовых газогидратных отложений вследствие повышения температуры почвы. В работе [Arzhanov et al., 2020] представлены результаты численного моделирования теплового режима вечной мерзлоты на севере Западной Сибири с оценкой зоны устойчивости гидрата метана при изменении климата за последние 130000 лет. Согласно полученным результатам, верхняя граница зоны устойчивости гидратов метана на Ямале могла достигать поверхности в периоды ледниковых максимумов (около 90000 и 60000 лет назад). Показано, что в настоящее время в вечной мерзлоте Ямала выше современной границы зоны устойчивости, вероятно, существуют реликтовые гидраты метана на глубинах до 100–150 м, которые могли “пережить” потепление в оптимум голоцена около 6000 лет назад. и сохраняются в многолетнемерз-

лых породах при отрицательных температурах даже в условиях трансгрессии и повышенного геотермального потока.

В [Мохов и др., 2022] получены оценки внутри- и межвековой деградации многолетнемерзлых грунтов на разной глубине и условий устойчивости метангидратов в регионе п-ва Ямал при потеплении на основе модели теплопереноса в грунте с использованием расчетов с глобальными климатическими моделями. В том числе использовались результаты расчетов с климатической моделью промежуточной сложности для последних 130 тыс. лет и расчеты с климатическими моделями общей циркуляции ансамбля CMIP6 (ScenarioMIP) с 1850 г. до конца XXI века при разных сценариях антропогенных воздействий семейства SSP, в частности сценария SSP5-8.5. Получены оценки предельных режимов существования многолетнемерзлых грунтов на разной глубине и условий устойчивости метангидратов в регионе п-ва Ямал при продлении сценариев глобального потепления до 2300 г. в соответствии с протоколом CMIP6 и модельных расчетов для следующих 15 тысячелетий с использованием, в частности, сценария антропогенных воздействий SSP5-8.5 до 2100 г.

Арктическая тундра сталкивается с беспрецедентным потеплением, которое приводит к изменениям в растительности, режимах оттаивания и, возможно, в обмене углерода между экосистемой и атмосферой (С). Однако оценки регионального баланса углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4) весьма неопределенны. Авторы работы [Juutinen et al., 2022] измерили потоки CO_2 и CH_4, состав растительности и индекс листовой площади (ИЛП), глубину протаивания и влажность почвы в Тикси (71° с.ш., 128° в.д.) – гетерогенном участке, расположенном в зоне обширной кустарничковой тундры на северо-востоке Сибири. Используя метод закрытой камеры, авторы определили чистый экосистемный обмен (NEE) CO_2, экосистемное дыхание в темноте (ER), валовой фотосинтез экосистемы (Pg) и поток CH_4 в течение вегетационного периода. Для пространственной экстраполяции авторы применили ранее разработанную карту земного покрова высокого пространственного разрешения на площади 35.8 км^2. Среди типов земного покрова, варьирующихся от бесплодной до кустарничковой тундры и тундровых водно-болотных угодий, NEE и Pg при плотности потока фотосинтетически активных фотонов 800 мкмоль м$^{-2}$ ч$^{-1}$(NEE800 и Pg800) были наибольшими в местах с преобладанием злаков, то есть в прибрежных лугах и болотах, с EE800 и Pg800 до –21 (поглощение) и 28 мкмоль м$^{-2}$ ч$^{-1}$ соответственно. Сосудистый ИЛП был надежным предиктором как NEE800, так и Pg800, а в ландшафтном масштабе болота были непропорционально важны для секвестрации CO_2 в летнее время. Сухая тундра, в том числе кустарничковая и лишайниковая, имела меньшие скорости обмена CO_2. Болота были крупнейшим источником CH_4, тогда как сухая минеральная почва тундры потребляла атмосферный CH_4, что в ландшафтном масштабе составляло ~9% от общего баланса CH_4 за вегетационный период. Наибольшая средняя сезонная скорость потребления CH_4, равная 0.02 мкмоль м$^{-2}$ ч$^{-1}$, наблюдалась на бесплодных территориях, покрытых песком и камнями. Высокий уровень потребления согласуется с оценкой, основанной на измерениях вихревой ковариации на том же участке. Признается неопределенность, связанная с пространственной экстраполяцией из-за небольшого количества повторов для каждого типа растительного покрова. В этом исследовании подчеркивается необходимость различать различные типы растительного покрова, включая места обитания в сухой тундре, чтобы учитывать их различные модели потоков CO_2 и CH_4, особенно потребление атмосферного CH_4, при оценке обмена углерода в тундре в более крупном пространственном масштабе [Juutinen et al., 2022].

В работе [Makhotina et al., 2022] описаны характеристики приземного слоя атмосферы и компоненты теплового баланса снежно-ледового покрова при дрейфе НИС “Академик Трешников” к северу от архипелагов Земля Франца-Иосифа и Шпицберген, в районе 80–82° с.ш., 30–45° в.д. (экспедиция “Трансарктика 2019”), по сравнению с наблюдениями на дрейфующей станции “Северный полюс-35”, работавшей в том же районе в апреле 2008 г. и на научно-исследовательском стационаре “Ледовая база мыс Баранова» в апреле 2019 г. На характеристики приземного слоя атмосферы и процессы энергообмена в период дрейфа экспедиции “Трансарктика-2019” существенное влияние оказали наличие облачности и состояние ледяного покрова. Влияние этих факторов привело к уменьшению радиационного охлаждения поверхности, образованию более теплого и влажного атмосферного погранслоя и к ослаблению турбулентного обмена между атмосферой и снежно-ледовым покровом. Сравнение характеристик энергообмена, рассчитанных для острова Большевик (79° с.ш.) и для района экспедиции “Трансарктика-2019”, показывает хорошее соответствие среднемесячных значений и трендов тепловых потоков, несмотря на то, что в первом случае подстилающей поверхностью был морской ледяной покров, а во втором – поверхность суши.

В [Макштас и др., 2020] приведено описание работы комплекса аппаратуры влажностно-температурного дистанционного зондирования нижнего слоя атмосферы (радиометр РВП и метеорологический профилемер МТР-5РЕ) в условиях Арктики. Выполнено сравнение результатов измерений радиометрических систем с данными аэрологического зондирования в широком спектре

метеорологических условий. Получены оценки интегрального влагосодержания атмосферы и характеристик инверсий в нижнем 1000-метровом слое атмосферы в период дрейфа НЭС “Академик Трешников” в северной части Баренцева моря.

В [Парфенова и др., 2022] проведен анализ продолжительности навигационного периода (ПНП) на Северном морском пути (СМП) в XXI веке на основе моделей ансамбля CMIP5 при сценарии RCP 8.5 с использованием методов байесового осреднения с выделением различных участков СМП. Получено, что различия качества воспроизведения моделями ПНП и ее изменений в западной части СМП больше, чем в восточной. Ансамблевое среднее для ПНП получено в диапазоне 3–4 мес в середине XXI века с увеличением до примерно 6 мес к концу века. Средние ансамблевые оценки изменения ПНП в целом устойчивы к выбору предположений, связанных с вычислением байесовых весов. Совместный учет качества воспроизведения моделями характеристик климата на всех временных масштабах (многолетнее среднее, межгодовые вариации, линейный тренд) в сравнении со спутниковыми данными позволяет уменьшить межмодельное стандартное отклонение вдвое для западной части СМП и в полтора раза – для восточной.

Каждый аспект деятельности человека в Арктике сталкивается с широким спектром рисков. К началу XXI века человечество осознало новый класс рисков, а именно риски, связанные с антропогенным изменением климата, что более заметно в Арктике, где темпы потепления вдвое превышают среднемировые. Глобальный и особенно арктический климат, вероятно, продолжит меняться, тем самым оказывая существенное влияние на будущее социально-экономическое развитие, биоразнообразие, экосистемы и человеческое общество. В работе [Soldatenko and Alekseev, 2020] авторы рассматривают климатические риски, связанные с социально-экономическим развитием Российской Арктики, и предлагают структуру моделирования, которая позволяет заинтересованным сторонам выявлять климатические риски и управлять ими, оценивать экономические последствия изменения климата в Арктике, а также оказывать помощь в разработка стратегий адаптации к изменению климата.

В [Soldatenko and Alekseev, 2020] получены количественные оценки изменений ветроэнергетических ресурсов в Арктике с использованием региональной климатической модели (РКМ) RCA4 при сценариях изменения климата RCP4.5 и RCP8.5 для 2006–2099 гг. Проанализирована мощность ветроэнергетического потенциала, пропорциональная кубу скорости ветра. Для оценки мощности ветрового потока (МВП) применена процедура коррекции систематической ошибки модельной скорости приземного ветра с использованием данных ERA5 в качестве эталонных с последующей экстраполяцией скорости ветра на высоту турбины. По расчетам с помощью РКМ RCA4 для XXI в. при обоих сценариях антропогенных воздействий отмечено, в частности, заметное увеличение МВП над Баренцевым, Карским и Чукотским морями зимой. Летом проявляется общее увеличение МВП над Северным Ледовитым океаном. При этом изменения больше при сценарии RCP8.5 с сильными антропогенными воздействиями для XXI века. Согласно полученным модельным оценкам, увеличение межсуточных вариаций МВП в целом не приводит к отклонениям скорости ветра до значений, при которых работа ветрогенераторов невозможна.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МЕТЕОРОЛОГИИ АНТАРКТИКИ

Если в Арктике установлена однозначная связь сокращения ледовитости с ростом приповерхностной температуры воздуха в Северном полушарии, то в Южном полушарии в последние десятилетия отмечалась противоположная тенденция, хотя и незначимая, с общим ростом протяженности морских льдов в Антарктике, в отличие от ожидаемого по модельным оценкам уменьшения ледовитости Южного океана. Это противоречие рассматривается в [Мохов и Парфенова, 2020]. Общее увеличение в последние десятилетия протяженности морских льдов в Антарктике, контрастировавшее с быстрым уменьшением общей протяженности арктических морских льдов при сильном арктическом потеплении, сменилось резким уменьшением ледовитости в Южном океане с 2016 г. Отмеченное до этого общее увеличение площади морских льдов в Антарктике объясняется тем, что спутниковые данные для протяженности морских льдов доступны только с конца 1970-х гг., когда отмечалось общее понижение, хотя и относительно слабое, температуры океана в антарктических акваториях. Региональное понижение температуры поверхности океана в антарктических широтах для последних четырех десятилетий на фоне общего потепления Южном полушарии объясняется значимым влиянием естественных климатических квазициклических процессов типа Эль-Ниньо, Антарктической осцилляции и декадной тихоокеанской осцилляции. Для более длительных периодов, в частности для последних шести десятков лет, проявляется уже общий рост температуры поверхности океана в антарктических широтах. При продлении ряда спутниковых данных для морских льдов в ближайшие годы на фоне общего потепления соответственно следует ожидать более значимое проявление общей тенденции уменьшения протяженности антарктических морских льдов. Явные признаки этого проявились в 2016 г., а результаты кросс-вейвлетного анализа свидетельствуют, что уже в течение последних двух десятилетий проявляется все более

значимая отрицательная корреляция долгопериодных вариаций общей протяженности антарктических морских льдов с температурным режимом в Антарктике и для Южном полушарии в целом в соответствии с прогностическими модельными оценками [Akperov et al., 2020].

В [Мохов и Парфенова, 2021] получены количественные оценки связи межгодовой изменчивости антарктических и арктических морских льдов с изменениями приповерхностной температуры в Северном и Южном полушариях по спутниковым и наземным данным и данным реанализа для последних четырех десятилетий (1980–2019 гг.). Показано, что отмеченное ранее общее увеличение протяженности антарктических морских льдов до последних лет по спутниковым данным, доступным только с конца 1970-х гг., на фоне глобального потепления и быстрого уменьшения протяженности морских льдов в Арктике связано с общим понижением температуры у поверхности в приантарктических широтах с конца 1970-х гг. Это результат регионального проявления естественных колебаний климата с периодами до нескольких десятилетий на фоне глобального векового потепления с относительно слабым температурным трендом над океаном в Южном полушарии. С 2016 г. отмечено резкое уменьшение площади морских льдов в Южном океане. Результаты корреляционного и кросс-вейвлетного анализа свидетельствуют о значимой когерентности и отрицательной корреляции с приповерхностной температурой протяженности морских льдов в последние десятилетия не только в Арктике, но и в Антарктике.

Изменения снежного покрова и площади морского льда, связанные с изменением температуры в Северном и Южном полушариях за период 1979–2020 гг., проанализированы с использованием среднемесячных спутниковых данных и реанализа [Mokhov and Parfenova, 2022]. Получены количественные оценки связи между антарктическим и арктическим морским льдом и изменением приземной температуры воздуха. Общее увеличение площади морского льда Антарктики связано с региональным проявлением естественных долговременных климатических режимов с периодами до нескольких десятилетий (на фоне глобального потепления и быстрого сокращения площади морского льда в Арктике). Результаты корреляционного и кросс-вейвлетного анализа показывают значительную согласованность и отрицательную корреляцию температуры приземного воздуха как в Арктике, так и в Антарктике с соответствующей протяженностью морского льда в последние десятилетия. Отмечены сезонные и региональные особенности чувствительности снежного покрова к изменению температурного режима в Северном полушарии за последние четыре десятилетия. Представлены особенности изменчивости снежного покрова в Евразии и Северной Америке.

Стабильные изотопологи воды (СИВ) являются полезными индикаторами влажно-диабатических процессов в круговороте воды в атмосфере. Они обеспечивают основу для анализа влажных процессов в различных временных масштабах: от крупномасштабного переноса влаги до образования облаков, осадков и мелкомасштабного турбулентного перемешивания. Лазерные спектрометрические измерения на научно-исследовательских судах позволяют получить временные ряды изменчивости изотопного состава водяного пара в пограничном слое океана с высоким разрешением. В исследовании [Thurnherr et al., 2022] авторы представляют пятимесячный непрерывный временной ряд таких судовых измерений δ^2H и $\delta^{18}O$ в рамках Антарктической кругосветной экспедиции (Antarctic Circumnavigation Expedition – ACE) в Атлантике и Южном океане за период с ноября 2016 г. по апрель 2017 г. Авторы анализируют причины меридиональных изменений СИВ в морском пограничном слое в различных климатических зонах Атлантического и Южного океана с использованием лагранжевой диагностики источников влаги и связывают вертикальные различия СИВ со скоростью приземного ветра и состоянием поверхности океана. Медианные значения $\delta^{18}O$, δ^2H и избытка дейтерия во время ACE непрерывно уменьшаются от низких широт к высоким. Эти меридиональные распределения СИВ отражают климатические условия в месте проведения измерений и местах расположения источников влаги, такие как температура воздуха, удельная влажность и относительная влажность по отношению к температуре поверхности моря. Изменчивость СИВ на данной широте наиболее высока во внетропических и полярных регионах с уменьшением значений к экватору. Такое меридиональное распределение изменчивости СИВ объясняется изменчивостью местоположений источников влаги и связанных с ними условий окружающей среды, а также процессов переноса. Расположенные западнее источники влаги водяного пара во внетропических регионах сильно варьируют по протяженности и широте из-за частого прохождения циклонов и тем самым расширяют диапазон встречающихся значений СИВ в пограничном слое океана. Потеря влаги во время транспортировки также способствует высокой изменчивости СИВ во внетропических регионах. В субтропиках и тропиках устойчивые антициклоны приводят к четко ограниченным узким восточным областям источников влаги, что отражается в слабой изменчивости СИВ в этих регионах. Таким образом, ожидаемая дальность действия сигналов СИВ на данной широте сильно зависит от крупномасштабной циркуляции. Кроме того, временные ряды СИВ, полученные на высотах 8.0 и 13.5 м над поверхностью океана во время ACE, дают оценки вертикальных градиентов СИВ в самом нижнем пограничном слое океана. В сред-

нем, вертикальные градиенты высоты, обнаруженные во время ACE, составляют −0.1‰ для $\delta^{18}O$, −0.5‰ для $\delta^{2}H$ и 0.3‰ $м^{-1}$ для избытка дейтерия. Тщательная калибровка и последующая обработка данных СИВ, а также подробный анализ неопределенностей обеспечивают прочную основу для представленных градиентов. Используя данные концентрации морских брызг и состояние моря, мы показываем, что вертикальные градиенты СИВ особенно велики в условиях высокой скорости ветра с повышенным вкладом испарения морских брызг или в условиях низкой скорости ветра из-за слабого вертикального турбулентного перемешивания. Хотя для подтверждения этих результатов необходимы дальнейшие измерения СИВ с более высоким вертикальным разрешением, одновременные измерения СИВ на нескольких высотах во время ACE показывают потенциал СИВ в качестве индикаторов вертикального перемешивания и испарения морских брызг в самом нижнем пограничном слое океана [Thurnherr et al., 2022].

В [Сибир и др., 2020] представлены результаты анализа данных наблюдений за общим содержанием озона на российских антарктических станциях Мирный, Новолазаревская и Восток за период 1975–2019 гг. и на научно-экспедиционных судах ААНИИ в 2005–2019 гг. До начала 2000-х гг. на антарктических станциях отмечалась устойчивая тенденция уменьшения общего содержания озона антарктической весной, в настоящее время наблюдается тенденция возвращения содержания озона к значениям, характерным для периода, предшествующего проявлению эффекта озоновой дыры.

В [Jonassen et al., 2019] наблюдения приземного слоя и верхних слоев атмосферы в ходе двух рейсов исследовательских судов и ледовой станции в море Уэдделла в 1992 и 1996 годах используются для проверки четырех текущих продуктов атмосферного реанализа: ERA-Interim, CFSR, JRA-55 и MERRA-2. Все четыре реанализа показывают температуру на высоте 2 м выше, чем наблюдения, а отклонения варьируются от +2.0 K в CFSR до +2.8 K в MERRA-2. Все четыре реанализа, как правило, завышают температуру атмосферного пограничного слоя (АПС) с погрешностями до +1.4 K (ERA-Interim). Формы облачности относительно плохо воспроизводятся реанализами: MERRA-2 и JRA-55 имеют самые сильные положительные и отрицательные отклонения примерно +30% и −17% соответственно. Оценки погрешностей показывают, что ERA-Interim в целом выглядит лучше других как в сравнении с наблюдениями за приземным слоем, так и с аэрологическими наблюдениями. CFSR занимает второе место, а JRA-55 и MERRA-2 имеют худшие оценки. Завышение температуры АПС согласуется с предыдущими подобными исследованиями в высоких широтах. Делается вывод о необходимости улучшения систем моделирования, включая ассимиляцию данных, а также совершенствование параметризаций АПС и приземного слоя [Jonassen et al., 2019].

С 2004 г. в рамках Российской антарктической экспедиции ежегодно проводятся измерения физико-химических характеристик аэрозолей на борту научно-исследовательских судов в высоких широтах Южного полушария (34–72° ю.ш.; 45° з.д.–110° в.д.). В работе [Sakerin et al., 2022] авторы обобщают результаты многолетних (2004–2021 гг.) измерений в этом районе аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ), концентраций аэрозоля и эквивалентного черного углерода (ЭЧУ), а также ионного состава аэрозоля. Общей закономерностью было снижение характеристик аэрозоля с увеличением широты вплоть до побережья Антарктики, где содержание аэрозоля соответствовало глобальному фоновому уровню. Между Африкой и Антарктидой АОТ снизилась с 0.07 до 0.024, объем частиц уменьшился с 5.5 до 0.55 $мкм^3/см^3$, EBC снизился с 68.1 до 17.4 $нг/м^3$, а суммарная концентрация ионов снизилась с 24.5 до 2.5 $мкг/м^3$. Полученное пространственное распределение характеристик аэрозоля качественно удовлетворительно соответствовало данным реанализа MERRA-2, но имело количественные различия: модельные значения АОТ были завышены (в среднем на 0.015); при этом концентрации ЭЧУ были занижены (на 21.7 $нг/м^3$). Интересная особенность была обнаружена в пространственном распределении аэрозолей в районе антарктических островов: на расстоянии 300 км от островов концентрации ЭЧУ снижались в среднем на 29%, а содержание аэрозоля увеличивалось в 2.5 раза [Sakerin et al., 2022].

Аэрозольно-оптическая толщина атмосферы, получаемая по результатам прямых спектральных солнечных фотометрических измерений, и интегральная оптическая толщина, определяемая по данным стандартных актинометрических наблюдений за прямой солнечной радиацией, являются показателями оптического состояния атмосферы. В [Sakerin et al., 2022] приводятся количественные оценки величин интегральной прозрачности и аэрозольной оптической толщины атмосферы в Антарктиде, исследуется их многолетняя изменчивость за всю историю проведения наблюдений, а также представлены результаты сопоставления полученных данных с российскими и зарубежными данными, накопленными в других природных регионах и условиях. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в периоды без влияния вулканических извержений уровни аэрозольного замутнения атмосферы в Антарктиде на протяжении последних десятилетий являются минимальными на планете и могут рассматриваться в качестве глобальных фоновых характеристик.

С учетом ощутимых изменений климата на планете в целом, особую роль приобретают базы и архивы данных основных климатообразующих ха-

рактеристик атмосферы, собранных за длительные периоды времени в различных районах земного шара и, в частности, в полярных областях. Суммарная солнечная радиация входит в число важнейших параметров, влияющих на энергетический баланс системы Земля–атмосфера. В [Сибир и др., 2021] приведено описание созданной базы данных часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских антарктических станциях. База данных предназначена для исследования радиационного режима Антарктики с начала актинометрических наблюдений и до настоящего времени. На основе содержащейся в ней информации были получены оценки характеристик изменчивости суточных, месячных и годовых сумм суммарной радиации на станциях Беллинсгаузен, Восток, Мирный, Новолазаревская и Прогресс за весь период наблюдений по 2019 г. Результаты их анализа свидетельствуют об отсутствии существенных изменений в поступлении суммарной солнечной радиации на антарктическую поверхность за более чем шестидесятилетний период актинометрических наблюдений.

В [Екайкин и др., 2020] показано, что снегомерные реечные наблюдения в Центральной Антарктиде систематически занижают величину прироста высоты снежного покрова. Для учета этого занижения разработаны два метода для расчета соответствующей поправки в данные снегомерных наблюдений на полигоне станции Восток. Первый метод основан на применении “закона Зорге”, рассмотрены также два независимых метода для оценки скорости снегонакопления в районе станции Восток – геодезические данные о скорости погружения слоев снега и гляциологические данные по снежным шурфам. Наиболее достоверная оценка скорости снегонакопления в данном районе составила 2.26 ± 0.10 г/см^2 за год, что на $(8 \pm 4)\%$ больше, чем по нескорректированным результатам снегомерных наблюдений.

Изучение изотопного состава ледяных кернов дает нам ценную информацию о климате прошлого. Для правильной интерпретации данных, полученных из ледяных кернов, необходимо понимать процесс формирования изотопного сигнала в атмосферных осадках. В [Тебенькова и др., 2021] исследована зависимость изотопного состава трех основных для Центральной Антарктиды типов осадков – ледяных игл, изморози и снега – от приземной температуры воздуха. Использованы образцы, отобранные в районе российской внутриконтинентальной станции Восток в период с 1998 по 2020 г. Коэффициенты линейной регрессии между концентрацией дейтерия (δD) и температурой различаются статистически незначимо для всех типов осадков в пределах года: $2.93 \pm 0.51‰$ °C^{-1} для ледяных игл, $2.32 \pm$ $\pm 1.34‰$ °C^{-1}для снега и $2.52 \pm 0.35‰$ °C^{-1}для изморози. Сделан анализ сезонной изменчивости изотопно-температурной зависимости для ледяных игл. Для зимнего периода связь между изотопным составом и температурой воздуха не обнаружена. Летом наблюдается наибольший наклон изотопно-температурной зависимости, равный $5.34 \pm 3.11‰$ °C^{-1}, наклон для осеннего периода равен $2.1 \pm 1.3‰$ °C^{-1}, тогда как для весеннего периода нет достаточного количества данных для анализа. В исследовании не использовались осадки, отобранные во время метелей, поскольку было установлено, что метель привносит в отобранную пробу снег с другим изотопным составом.

В [Екайкин и др., 2022] представлены данные о плотности снежно-фирновой толщи в интервале глубины 0–70 м в районе станции Восток (Антарктида). Охарактеризованы основные стадии уплотнения (быстрый рост плотности в пределах верхних 0.3 м, переход от снега к фирну на глубине 22.5 м). Выполнены тесты с помощью полуэмпирической и нестационарной физической моделей с целью изучения гляциоклиматических условий, при которых происходил. В первом приближении распределение плотности можно объяснить исходной плотностью снега 0.35 г/см^3, температурой поверхности ледника –57°C и скоростью снегонакопления 1.8–2.1 г см$^{-2}$/год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акперов М.Г., Елисеев А.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Парфенова М.Р., Кёниг Т. Потенциал ветровой энергетики в арктических и субарктических широтах и его изменения в XXI веке по расчетам с использованием региональной климатической модели // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 18–29.

Акперов М.Г., Мохов И.И., Дембицкая М.А., Парфенова М.Р., Ринке А. Особенности температурной стратификции и ее изменений в тропосфере арктических широт по данным реанализа и модельным расчетам // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 19–27.

Акперов М.Г., Семенов В.А., Мохов И.И., Парфенова М.Р., Дембицкая М.А., Бокучава Д.Д., Ринке А., Дорн В. Влияние океанического притока тепла в Баренцево море на региональные изменения ледовитости и статической устойчивости атмосферы // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 4. С. 529–538.

Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Изосимова О.Н., Зенкова П.Н., Почуфаров А.О., Хуриганова О.И., Онищук Н.А., Маринайте И.И., Полькин В.В., Радионов В.Ф., Сакерин С.М., Лисицин А.П., Шевченко В.П. Химический состав атмосферного аэрозоля в арктическом районе по маршрутам морских экспедиций 2018–2019 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2020а. Т. 33. № 6. С. 421–429.

Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Чернов Д.Г., Сидорова О.Р., Хуриганова О.И., Онищук Н.А., Жученко Н.А., Маринайте И.И. Химический состав приземного атмосферного аэрозоля в Баренцбурге (архипелаг Шпицберген) по результатам многолетних исследований. // Лед и Снег. 2020б. Т. 60. № 1. С. 85–97.

Демчев Д.М., Кулаков М.Ю., Макштас А.П., Махотина И.А., Фильчук К.В., Фролов И.Е., Верификация данных о приповерхностной температуре воз-

духа реанализов ERA-Interim и Era-5 в Арктике // Метеорология и гидрология 2020. № 11. С. 36–45.

Екайкин А.А., Тебенькова Н.А., Липенков В.Я., Чихачев К.Б., Верес А.Н., Рихтер А. Недооценка скорости снегонакопления в Центральной части Антарктиды (станция Восток) по данным реечных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 114–125.

Екайкин А.А., Чихачев К.Б., Верес А.Н., Липенков В.Я., Тебенькова Н.А., Туркеев А.В. Профиль плотности снежно-фирновой толщи в районе станции Восток, Центральная Антарктида // Лед и Снег. 2022. Т. 62. № 4. С. 504–511.

Климат Арктики: процессы и изменения / Под ред. И.И. Мохова, В.А. Семенова. М.: Физматкнига, 2022. 360 с.

Макштас А.П., Ильин Г.Н., Быков В.Ю., Миллер Е.А., Троицкий А.В., Кустов В.Ю., Большакова И.И., Ризе Д.Д. Опыт дистанционного температурно-влажностного зондирования атмосферы в период дрейфа НЭС “Академик Трешников” // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 3. С. 349–363.

Махотина И.А., Чечин Д.Г., Макштас А.П. Радиационное воздействие облаков на морской лед в Арктике во время полярной ночи по данным дрейфующих станций “Северный полюс” –37, –39 и –40. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 451–460.

Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты. / Под ред. В.Г. Бондура, И.И. Мохова, А.А. Макоско. М.: РАН. 2022. 388 С.

Мохов И.И. Аналитические условия формирования Арктического усиления в Земной климатической системе // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 505. № 1. С. 103–108.

Мохов И.И. Особенности современных изменений в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 446–462.

Мохов И.И., Малахова В.В., Аржанов М.М. Модельные оценки внутри- и межвековой деградации “вечной мерзлоты” в регионе полуострова Ямал при потеплении // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 219–226.

Мохов И.И., Парфенова М.Р. Изменения протяженности снежного покрова в Северном полушарии по спутниковым данным в связи с температурными изменениями // Метеорология и гидрология. 2022а. № 2. С. 32–44.

Мохов И.И., Парфенова М.Р. Особенности изменчивости антарктических и арктических морских льдов в последние десятилетия на фоне глобальных и региональных климатических изменений // Вопросы географии. 2020. Сб. 150. С. 304–319.

Мохов И.И., Парфенова М.Р. Связь площади снежного покрова и морских льдов с температурными изменениями в Северном полушарии по данным последних десятилетий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022б. Т. 58. № 4. С. 411–423.

Мохов И.И., Парфенова М.Р. Связь протяженности антарктических и арктических морских льдов с температурными изменениями в 1979–2020 гг. // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 71–77.

Мохов И.И., Погарский Ф.А. Изменения режимов морского волнения в арктическом бассейне по ансамблевым модельным расчетам для 21 века // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 2. С. 189–193.

Парфенова М.Р., Елисеев А.В., Мохов И.И. Изменения периода навигации на Северном морском пути в 21 веке: Байесовы оценки по расчетам с ансамблем климатических моделей // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 118–125.

Радионов В.Ф., Русина Е.Н., Сибир Е.Е. Многолетние изменения интегральной и спектральной прозрачности атмосферы по данным наблюдений в обсерватории Мирный (Антарктида). // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 35–44.

Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Козлов В.С., Круглинский И.А., Макаров В.И., Макштас А.П., Попова С.А., Радионов В.Ф., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И., Чанкина О.В., Чернов Д.Г. Результаты измерений физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова” в 2018 г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 421–429.

Священников П.Н., Прохорова У.В., Иванов Б.В. Сравнение атмосферной циркуляции в районе архипелага Шпицберген во время потепления 1920–1950 гг. и в современный период // Метеорология и гидрология. 2020. № 1. С. 36–44.

Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Русина Е.Н. Результаты многолетних наблюдений за общим содержанием озона в Антарктиде и над акваториями Атлантического и Южного океанов // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 33–43.

Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Русина Е.Н. База данных часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских антарктических станциях: анализ изменения суммарной радиации за весь период наблюдений в Антарктиде // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 249–260.

Скакун А.А., Чихачев К.Б., Екайкин А.А., Козачек А.В., Владимирова Д.О., Верес А.Н., Веркулич С.Р., Сидорова О.Р., Демидов Н.Э. Изотопный состав атмосферных осадков и природных вод в районе Баренцбурга (Шпицберген) // Лед и снег. 2020. Т. 60. № 3. С. 379–394.

Тебенькова Н.А., Екайкин А.А., Лэппле Т., Нотц Д., Козачек А.В., Верес А.Н. Связь изотопного состава разных типов осадков в Центральной Антарктиде с температурой воздуха // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 4. С. 368–381.

Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I., Semenov V.A., Parfenova M.R., Matthes H., Adakudlu M., Boberg F., Christensen J.H., Dembitskaya M.A., Dethloff K., Fettweis X., Gutjahr O., Heinemann G., Koenigk T., Koldunov N.V., Laprise R., Mottram R., Nikiéma O., Sein D., Sobolowski S., Winger K., Zhang W. Future projections of cyclone activity in the Arctic for the 21st century from regional climate models (Arctic-CORDEX). // Glob. Planet. Change. 2019. V. 182, P. 103005.

Akperov M., Semenov V.A., Mokhov I.I., Dorn W., Rinke A. Impact of Atlantic water inflow on winter cyclone activity in the Barents Sea: insights from coupled regional climate model simulations // Environ. Res. Lett. 2020. V. 15. № 2. P. 024009.

Akperov M., Zhang W., Miller P.A., Mokhov I.I., Semenov V.A., Matthes H., Smith B., Rinke A. Responses of Arctic cyclones to biogeophysical feedbacks under future warm-

ing scenarios in a regional Earth system model. // Environ. Res., Lett. 2021, V. 16. № 6. P. 064076.

Arzhanov M.M., Malakhova V.V., Mokhov I.I. Modeling thermal regime and evolution of the methane hydrates stability zone of the Yamal Peninsula permafrost. // Permafrost and Periglacial Processes. 2020. V. 31. № 4. P. 487–496.

Chechin, D., Makhotina, I., Lüpkes, C., Makshtas, A. Effect of Wind Speed and Leads on Clear-Sky Cooling over Arctic Sea Ice during Polar Night. // Journal of the Atmospheric Sciences. 2019. V. 76. № 8. P. 2481–2503.

Dahlke S., Hughes N.E., Wagner P.M., Gerland S., Wawrzyniak T., Ivanov B.V., Maturilli M. The observed recent surface air temperature development across Svalbard and concurring footprints in local sea ice cover. // Int. J. Climatol. 2020. V. 40. P. 5246–5265.

Heinemann G., Drüe C., Makshtas A.A. Three-Year Climatology of the Wind Field Structure at Cape Baranova (Severnaya Zemlya, Siberia) from SODAR Observations and High-Resolution Regional Climate Model Simulations during YOPP // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 957.

Heinemann G., Drüe C., Schwarz P.; Makshtas A. Observations of Wintertime Low-Level Jets in the Coastal Region of the Laptev Sea in the Siberian Arctic Using SODAR/RASS // Remote Sens. 2021b. V. 13. P. 1421.

Heinemann G., Willmes S., Schefczyk L., Makshtas A., Kustov V., Makhotina I. Observations and Simulations of Meteorological Conditions over Arctic Thick Sea Ice in Late Winter during the Transarktika 2019 Expedition // Atmosphere. 2021a. V. 12. P. 174.

Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B. et al. Exceptional warming over the Barents area // Sci. Rep. 2022. V. 12. P. 9371.

Ivanov B., Karandasheva T., Demin V., Revina A., Sviashchennikov P., Isaksen K., Førland E.J., Nordli Ø., Gjelten H.M. Assessment of long-term changes surface air temperature from the High Arctic archipelago Franz Joseph Land from 1929 to the present (2017) // Czech Polar Report. 2021a. V. 11. № 1. P. 114–133.

Ivanov B., Prokhorova Y., Sviashchennikov P. Analysis of continentality and anomality of Svalbard climate according to observations of surface air temperature in the second half of the XX century // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2021b. V. 606. № 012021.

Ivanov B.V. Comparing the "earlier" and the "modern" warming in West Arctic on example of Svalbard. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. № 012023.

Jonassen M.O., Valisuo I., Vihma T., Uotila P., Makshtas A.P., Launiainen J. Assessment of Atmospheric Reanalyses With Independent Observations in the Weddell Sea, the Antarctic. // JGR Atmospheres. 2019. V. 124. № 23. P. 12468–12484.

Juutinen S., Aurela M., Tuovinen J.-P., Ivakhov V., Linkosalmi M., Räsänen A., Virtanen T., Mikola J., Nyman J., Vähä E., Loskutova M., Makshtas A., and Laurila T. Variation in CO_2 and CH_4 fluxes among land cover types in heterogeneous Arctic tundra in northeastern Siberia. // Biogeosciences. 2022. V. 19. P. 3151–3167.

Makhotina I.A., Makshtas A.P., Kustov V.Yu. Sea ice – Atmosphere heat exchange during expedition "Transarctica-2019" // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 606. № 012032.

Mokhov I.I. and Parfenova M.R. Changes of the sea ice and snow cover extent associated with temperature changes in the Northern and Southern Hemispheres in recent decades // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022. V. 1040. № 012016.

Prokhorova U.V. and Urazgildeeva A.V. Effect from polynyas in the Siberian Arctic seas to atmospheric transport of heat and moisture // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 606. № 012047.

Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Kozlov V.S., Pol'kin V.V., Radionov V.F. and Chernov D G. Comparison of Average Aerosol Characteristics in Neighboring Arctic Regions // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. V. 32. № 1. P. 33–40.

Sakerin S.M., Kabanov D.M., Makarov V.I., Pol'kin V.V., Popova S.A., Chankina O.V., Pochufarov A.O., Radionov V.F., Rize D.D. Spatial distribution of atmospheric aerosol physicochemical characteristics in the Russian sector of the Arctic Ocean // Atmosphere. 2020. V.11. № 11. P. 1170.

Sakerin S.M.; Golobokova L.P.; Kabanov D.M.; Khuriganowa O.I.; Pol'kin V.V.; Radionov V.F.; Sidorova O.R.; Turchinovich Y.S. Spatial distribution of aerosol characteristics over the South Atlantic and Southern Ocean using multiyear (2004–2021) measurements from Russian Antarctic Expeditions // Atmosphere. 2022. V. 13. № 3. P. 427.

Soldatenko S.A., Alekseev G.V. Managing climate risks associated with socio-economic development of the Russian Arctic. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 606. № 012060.

Thurnherr I., Kozachek A., Graf P., Weng Y., Bolshiyanov D., Landwehr S., Pfahl S., Schmale J., Sodemann H., Steen-Larsen H.C., Toffoli A., Wernli H., and Aemisegger, F. Meridional and vertical variations of the water vapour isotopic composition in the marine boundary layer over the Atlantic and Southern Ocean // Atmos. Chem. Phys. 2020. V. 20. P. 5811–5835.

Russian Research in 2019–2022 of Polar Meteorology

A. V. Klepikov*

Arctic and Antarctic Research Institute, ul. Beringa 38, Saint-Petersburg, 199397 Russia

**e-mail: klep@aari.ru*

This publication is an overview of the results of Russian polar research in 2019–2022, based on paper prepared by the Commission on Polar Meteorology of the National Geophysical Committee for the National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences to the XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Berlin, Germany, July 11–20 2023).

Keywords: Arctic, Antarctic, climate change, meteorology, natural variability, warming

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2023, том 59, № 7, с. 930–954

УДК 551.590.21;551.510.4;551.510.534;550.388.2

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. А. А. Криволуцкий[a, *], С. В. Веретененко[b]

[a]Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Первомайская ул., 3, Долгопрудный, 141701 Россия
[b]Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021 Россия
*e-mail: krivolutsky@mail.ru

Поступила в редакцию 30.08.2023 г.
После доработки 07.11.2023 г.
Принята к публикации 15.11.2023 г.

Представлен обзор результатов российских исследований средней атмосферы в 2019–2022 гг., подготовленный Комиссией по средней атмосфере Секции метеорологии и атмосферных наук Национального геофизического комитета для Национального отчета по метеорологии и атмосферным наукам к XXVIII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (Германия, 2023 г.)*.

Ключевые слова: средняя атмосфера, температура, химический состав, циркуляция, солнечная активность, модели атмосферы

DOI: 10.31857/S0002351523070064, **EDN:** HQNVZS

ВВЕДЕНИЕ

Средняя атмосфера – область, расположенная выше тропосферы, между тропопаузой (приблизительно 10 км, эта высота зависит от широты, увеличиваясь к низким широтам и уменьшаясь с увеличением широты) и турбопаузой (приблизительно 100 км). Эта область, в отличие от более низких высот земной атмосферы, характеризуется тем, что находится под воздействием ультрафиолетовой радиации (УФ) Солнца, которое практически не проникает ниже и определяет как термическую структуру и динамический режим этой области, так и химический состав, инициируя процессы диссоциации и ионизации. В результате этих процессов возникает озоносфера и нижняя ионосфера, а также формируется глобальная циркуляция и температурный режим.

Состав средней атмосферы известен хорошо благодаря многочисленным измерениям разными методами, включая спутники и ракеты. Большинство малых составлющих (включая озон) возникают при фотодиссоциации основных составлящих и благодаря множеству дальнейших химических превращений. В современные фотохимические модели включают в настоящее время сотни реакций. Нужно сказать, что основа фотохимии озона была заложена в 1930 г. в работе С. Чепмена, в которой было использовано всего несколько реакций кислородного цикла, приводящих к образованию озона. В то же время этот цикл является стержнем фотохимических расчетов и в настоящее время. В дальнейшем, по мере накопления данных измерений, выяснилось, что предложенная схема завышает озон и нужно включать реакции с участием окислов водорода, азота и другие малые составляющие, чтобы добиться лучшего согласования с наблюдениями.

Атомы и молекулы могут также ионизоваться либо коротковолновым солнечным излучением (УФ и рентгеновским), либо энергичными корпускулами в высоких широтах, при этом возникает ионосфера, которую принято делить на несколько слоев, основываясь на среднем высотном профиле электронной концентрации. Самая нижняя и сложная область ионосферы, область D, расположена на высотах 60–95 км, являясь, таким образом, важной частью средней атмосферы. В этой области ионизация главным образом обусловлена фотоионизацией молекул NO излучением в линии Лайман-альфа (121.6 нм). Ниже 70 км в ионизацию O_2 и N_2 вносят вклад высокоэнергичные космические лучи. Выше расположена область E, верхняя граница которой расположена на высоте 130 км. В слоях D и E электронная концентрация максимальна при наибольшей высоте Солнца над горизонтом. Ночью электроны практически полностью исчезают в области D, а их концентрация в E-области уменьшается в 100 раз. Следует сказать, что в области нижней ионосферы происходит существенное поглощение радиоволн, кото-

* Russian National Report. Meteorology and Atmospheric Sciences. 2019–2022. Edited by I.I. Mokhov and A.A. Krivolutsky. National Geophysical Committee RAS. Moscow: MAKS Press. 2023.

рое резко увеличивается в периоды протонных вспышек на Солнце.

Важную роль в этой области играют также атмосферные волны разных масштабов и периодов. Физическая природа этих волн различна. Гироскопическая устойчивость атмосферы приводит к формрованию глобальных планетарных волн (волн Россби), которые в нижних слоях определяют погодные процессы. По мере распространения этих волн в более высокие слои эти волны оказывают воздействие на среднее движение и температуру.

Еще одним фактором воздействия на среднюю атмосферу являются внутренние гравитационные волны (ВГВ), длина волны которых составляет примерно 100 км, по контрасту с очень большими планетарными волнами (длина волны порядка 10000 км). Предполагается, что ВГВ образуются в тропосфере за счет различных механизмов, включая взаимодействие воздушных потоков с подстилающей поверхностью. Их амплитуда растет с высотой по мере уменьшения плотности воздуха. На некоторой высоте амплитуда ВГВ может вырасти до таких размеров, что обусловленное ею возмущение температуры вызовет сверхадиабатический градиент, волна станет неустойчивой и разрушается. Выше этого уровня разрушение волны вызывает сильную турбулентность, которая предотвращает дальнейший рост волны. Разработанные параметризации этого процесса дают разумные значения коэффициента турбулентной диффузии на этих высотах.

Взаимодействие крупномасштабных тропосферных волн, в соответствии с теоретическими представлениями, поздней зимой и весной приводит к стратосферным потеплениям, сильному увеличению температуры стратосферы, которое сопровождается охлаждением мезосферы. В этих случаях стратопауза может опускаться до 35 км, полярный перенос ослабевает и может даже поменять направление. Стратосферные потепления влияют также на годовое изменение озона и других химических составляющих.

Таким образом, средняя атмосфера охватывает широкий круг интересных явлений, которые начали относительно недавно (по сравнению с метеорологией) интенсивно изучаться мировым научным сообществом. Здесь нужно вспомнить организацию крупного международного проекта в области планетарной геофизики – Международной программы средней атмосферы MAP (Middle Atmosphere Program), в которой участвовали более 40 стран (включая СССР). К настоящему времени изменились как средства измерений, так и методы исследований, включая наблюдения со спутников, в тоже время актуальность этой, по существу продолжающейся программы, не вызывает сомнений.

В данный обзор включены работы российских авторов (иногда в соавторстве с зарубежными коллегами), посвященные результатам исследований средней атмосферы, полученным в период 2019–2022 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Температура

В работе [Данилов и Константинова, 2020] дан обзор основных публикаций последних восьми лет, посвященных выделению долговременных трендов параметров средней атмосферы, термосферы и ионосферы. Показано, что в средней атмосфере отрицательные тренды температуры надежно установлены на основании наблюдений различными методами. В термосфере имеются результаты анализа орбит спутников, дающие отрицательные тренды плотности на высотах ~400 км. Неожиданно высокие отрицательные тренды ионной температуры *Ti* получены методом некогерентного рассеяния выше ~220 км. На высотах слоя *F*1 те же измерения дают высокие положительные тренды *Ti*. Есть расхождения в оценках абсолютной величины отрицательных трендов критической частоты и высоты слоя *F*2, но по мнению авторов эти тренды достаточно высоки.

В работе [Данилов и Бербенева, 2021] показано, что в настоящее время наблюдаются тренды параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы, которые уже приводят или могут в обозримом будущем привести к изменениям в этих сферах. Указаны тренды этих параметров, которые, на взгляд авторов, уже сейчас имеют выход на прикладные задачи. В средней атмосфере это – увеличение количества паров воды, которое может повлиять на судьбу озонового слоя. Оно объясняет также рост явлений полярных мезосферных летних эхо, беспокоящих оборонные ведомства. Там же происходит изменение системы ветров и усиление проникновения внутренних волн в ионосферу. Это должно приводить к существенному усилению “метеорологического контроля” ионосферы. Тренды плотности на спутниковых высотах уже сейчас приводят к увеличению времени жизни объектов “космического мусора” и повышению вероятности их столкновения с космическими аппаратами. Отрицательный тренд количества атомного кислорода в термосфере указывает, скорее всего, на усиление турбулентной диффузии. Видимо, это потребует корректировки термосферных моделей, используемых для многих прикладных задач. Отрицательные тренды температуры ионов в ионосфере могут уже сейчас влиять на работы систем глобального позиционирования. Тренды полного содержания электронов и приведенной толщины ионосферы связаны с корректировкой систем позиционирования и других подобных систем. Обнаружено, что про-

исходит "опускание" уровней постоянных величин *Ne* в области *D*. Это должно учитываться в системах, использующих распространение радиоволн СДВ- и ДВ-диапазонов. Тренды критической частоты слоя *F*2 могут уже в ближайшее время привести к изменениям *foF*2, которые, как показывают расчеты, значительно влияют на параметры радиотрасс КВ-диапазона.

В работе [Jakovlev et al., 2021] на основе данных реанализа MERRA2, ERA5, Met Office и численного моделирования с помощью химико-климатической модели (ХКМ) нижней и средней атмосферы за 1980–2019 гг. изучено влияние температуры поверхности моря (SST) на температуру нижней тропосферы и нижней стратосферы в тропических, средних и полярных широтах. Изменчивость температуры поверхности моря анализируется по данным Met Office и ERA5, а изменчивость температуры атмосферы – по данным MERRA2 и ERA5. Анализ трендов температуры поверхности моря по данным реанализа показал, что на земном шаре наблюдается значительный положительный тренд SST, составляющий около 0.1 градуса за десятилетие. В средних широтах северного полушария этот тренд (около 0.2 градуса за десятилетие) в 2 раза превышает среднемировой и в 5 раз – тренд в Южном полушарии (около 0.04 градуса за десятилетие). В полярных широтах наблюдаются противоположные тренды SST в Арктике (положительный) и Антарктике (отрицательный). Обсуждается влияние явления Южного колебания Эль-Ниньо на температуру нижней и средней атмосферы в средних и полярных широтах северного и южного полушарий. Для оценки относительного влияния изменчивости SST, CO_2 и других парниковых газов на температуру нижней тропосферы и нижней стратосферы были проведены численные расчеты с использованием ХКМ для нескольких сценариев учета изменчивости SST и углекислого газа. Результаты численных экспериментов с ХКМ показали, что в тропосфере преобладает влияние SST, а для стратосферы наиболее важную роль играет увеличение содержания CO_2.

В работе [Переведенцев и др., 2019] рассмотрены характеристики пространственно-временной изменчивости температуры воздуха и массовой доли озона на 26 изобарических поверхностях от уровня земли до высоты 64 км с использованием данных реанализа ERA-Interim за 1979–2016 гг. Выявлены различия в распределении трендов температуры воздуха между сезонами и широтными зонами, Атлантико-Европейским, Азиатско-Тихоокеанским и Американским секторами умеренной зоны Северного полушария, между термическим режимом над сушей и океаном; дана оценка взаимосвязей между слоями, атмосферных циркуляционных мод в разные сезоны.

В работе [Куминов и др., 2021] приведено краткое описание технических характеристик метеорологических ракет, используемых на станциях Росгидромета, включая описание новой метеорологической ракеты МЕРА с высотой подъема до 100 км, метеорологического ракетного зонда МРЗ 100, бортовой измерительной и служебной аппаратуры. Рассмотрены методика измерений атмосферных параметров и результаты исследований долговременной изменчивости температуры и ветра в стратосфере и мезосфере по многолетним (1969–1995 гг.) данным метеорологического ракетного зондирования на станции Волгоград. Показано, что в интервале высот от 25 до 75 км тренды температуры и скорости ветра над станцией ракетного зондирования атмосферы Волгоград в 1969–1995 гг. являются нелинейными и на большинстве высот немонотонными. Обнаружено увеличение значений размаха трендовых вариаций анализируемых параметров в обозреваемом периоде с высотой: температуры – до 15–19 K в нижней и средней мезосфере, зонального компонента скорости ветра – до 15 м/с в стратопаузе, меридионального компонента – до 10 м/с в нижней мезосфере.

В работе [Merzlyakov et al., 2021] авторы оценили температуру по данным метеорных радиолокационных измерений с использованием градиентного метода и метода полной ширины на половине максимума (FWHM) над Казанью (56° N, 49° E) и Колмом (51° N, 13° E). Временные ряды охватывают период 2016–2019 гг. Модель температурного градиента построена по данным температурных наблюдений прибора SABER. Авторы показывают, что среднегодовые значения, амплитуды и фазы годовых и полугодовых колебаний радарных температур близки к соответствующим характеристикам для температур MLS и SABER. Среднегодовые температуры над Казанью и Колмом отличаются незначительно. Сезонная изменчивость радиолокационной температуры в основном связана с годовым циклом, который имеет тенденцию к увеличению с широтой. Градиентный метод дает температуры, которые лучше согласуются с температурами SABER, чем с температурами MLS. Гармоники годовых колебаний с периодами от 73 дней до периодов около 40 дней являются наиболее значимыми суточными колебаниями температуры и имеют зональное волновое число, равное нулю. Их периоды и фазы хорошо согласуются с периодами и фазами приборов MLS и SABER. Авторы также приводят некоторые результаты, показывающие, что на 56°N метод FWHM не столь надежен, как градиентный метод.

В работе [Popov et al., 2020] для анализа данных спектральных наблюдений вращательной температуры и интенсивности эмиссии колебательно возбужденного гидроксила (OH*) на высотах 85–90 км на обсерваториях Звенигород (56°N, 37°E) за 2004–2016 гг. и Торы (52°N, 103°E) за 2012–2017 гг. использовались цифровые разностные фильтры. Получены среднемесячные значения и стандарт-

ные отклонения мезомасштабных возмущений характеристик эмиссии OH* с периодами 0.8–11 ч. Эти мезомасштабные возмущения могут отражать внутренние гравитационные волны (ВГВ) в области мезопаузы. Для фильтрации мезомасштабных возмущений были получены разности между последовательными значениями характеристик эмиссии OH*, усредненные по интервалам длительностью от 0.5 до 2 ч. Среднемесячные вариации мезомасштабных возмущений вращательной температуры OH*, полученные в Торы, больше, чем в Звенигороде. Среднесезонные изменения относительных мезомасштабных вариаций демонстрируют максимумы зимой и летом, причем летний максимум смещен ближе к весенним месяцам для станции Торы. Причинами различий могут быть разные орография и струйные течения в нижней и средней атмосфере, а также разные спектры горизонтальных длин волн ВГВ, обусловленные разной геометрией наблюдений в Торы и Звенигороде.

Когерентные во времени мезомасштабные возмущения вращательной температуры возбужденного гидроксила (OH*) часто используются как индикатор волновых процессов в мезосфере и нижней термосфере. Для определения мезомасштабной составляющей с периодами в диапазоне 0.8–11 ч в исследовании [Попов и др., 2022] применяются цифровые фильтры, использующие разности измеряемых значений, сдвинутых по времени на фиксированные интервалы, меняющиеся в пределах от 10 мин до 2 ч. Среднемесячная интенсивность мезомасштабных вариаций пропорциональна дисперсии указанных разностей, регистрируемых в течение каждого календарного месяца измерений. Эти дисперсии содержат не только информацию о когерентных мезомасштабных процессах, но также некогерентный во времени шум инструментальной и турбулентной природы. Разработан и применен статистический метод анализа структурных функций анализируемых характеристик ночных свечений для оценки дисперсии некогерентного случайного шума. Эти оценки вычитаются из измеряемой среднемесячной дисперсии мезомасштабных разностей в целях получения информации об интенсивности когерентных мезомасштабных процессов вблизи мезопаузы. Вычитание дисперсии некогерентного шума не меняет характера сезонных вариаций во всех спектральных интервалах, но уменьшает значения мезомасштабных стандартных отклонений на 10–20%. Предлагаемая коррекция позволяет лучше выявить особенности сезонных и межгодовых изменений когерентных мезомасштабных возмущений в различных диапазонах частотного спектра.

В работе [Medvedeva et al., 2019] представлены результаты исследования поведения температуры и концентрации атомарного кислорода в области мезопаузы во время мажорного внезапного стратосферного потепления (ВСП) в январе 2013 года. Анализировались данные по интенсивности эмиссии на длине волны 834.0 нм и вращательной температуре молекулы гидроксила OH(6–2). Эти данные получены в результате спектрометрических измерений в Геофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (51.8°N, 103.1°E, Торы) и на станции Звенигород Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (55.7°N, 36.8°E). Используя данные измерений эмиссии OH, авторы рассчитали концентрацию атомарного кислорода и ее вариации. Выявлено, что отклик характеристик мезопаузы для двух разнесенных по долготе среднеширотных областей существенно различается. Так, по данным станции Торы максимальное увеличение интенсивности эмиссии OH (в ~2 раза) и концентрации [O] (в ~3 раза) произошло в процессе развития внезапного стратосферного потепления (ВСП), тогда как по данным станции Звенигород, увеличение интенсивности эмиссии OH (в ~3 раза) и концентрации [O] (в ~3.5 раза) наблюдалось на этапе восстановления ВСП. В результате численного моделирования с использованием модели средней и верхней атмосферы (MUAM) было показано, что причиной выявленного эффекта могут быть долготные различия в суточной вариации вертикального ветра на высотах мезопаузы над указанными станциями во время ВСП. Эти различия можно объяснить генерацией немигрирующих приливов в результате нелинейного взаимодействия усиленной стационарной планетарной волны 1 (СПВ1) с мигрирующими приливами и формирования набора высокочастотных ПВ на стратосферных высотах. Все эти волны способны распространяться в область MLT и вызывать наблюдаемые изменения интенсивности эмиссии OH, температуры и концентрации атомарного кислорода над станциями Торы и Звенигород.

Летняя область мезопаузы (высоты 82–92 км), самое холодное место в земной атмосфере, подвержена влиянию внешних воздействий, включая лунные. В работе [Перцев и др., 2021] гармоники лунных приливов выделяются из рядов температуры излучающего слоя гидроксила (OH*), полученных из спектрофотометрических измерений на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН в летние сезоны 2000–2016 гг. Температуры OH* являются средневзвешенными в слое толщиной ~9 км, имеющего максимум на высоте ~87 км. Анализ позволил выделить лунные колебания, среди которых две гармоники идентифицируются впервые в температуре области мезопаузы. Данные колебания распознаются как вторая гармоника аномалистического прилива (средний период ~13.78 сут), а также лунный прилив с периодом в 8 ч 17 мин или в альтернативной интерпретации –

третья гармоника лунного синодического месяца (~9.84 сут).

В работе [Яковлев и Смышляев, 2019] представлено описание взаимосвязи атмосферы и океана. Проанализированы данные реанализа MERRA, JRA, ERA-Interim и ERA20 Century, а также результаты расчетов с помощью химико-климатической модели ХКМ по среднемесячным значениям температуры воздуха и отношения смеси для озона на изобарических поверхностях 925 и 20 гПа за период с 1980 по 2015 г. Проведено сравнение с данными о температуре поверхности океана. Результаты моделирования хорошо согласуются с данными реанализа для приземного слоя атмосферы, тогда как для стратосферы имеются существенные различия, которые требуют более детального анализа. По результатам моделирования наблюдается повышение температуры в приземном слое и уменьшение температуры и отношения смеси для озона в стратосфере. Данные реанализа не противоречат результатам моделирования в тропосфере, но в стратосфере значительно расходятся.

В работе [Варгин и др., 2021] по результатам пяти 50-летних расчетов с 5-й версией совместной климатической модели ИВМ РАН показано, что зимние сезоны с явлением Эль-Ниньо характеризуются более высокой температурой арктической стратосферы по сравнению с сезонами с Ла-Нинья. Зимним сезонам с положительными аномалиями температуры поверхности в северной части Тихого океана соответствует более низкая температура стратосферы в арктических районах по сравнению с сезонами с отрицательными аномалиями температуры воды.

В работе [Belyaev, 2019] моделируются тепловые изменения в фоновой атмосфере под воздействием “горизонтально движущегося” турбулентного пятна. Автор разделяет процесс взаимной перестройки турбулентного пятна и фоновой атмосферы на две стадии: (i) Быстрый переход от высокого к низкому уровню устойчивости атмосферы в пределах турбулентного пятна, вызванный сильным адиабатическим перемешиванием в “движущемся” турбулентном пятне. (ii) Медленная перестройка фоновой атмосферы к квазистабилизированной, близкой к адиабатической термической стратификации внутри турбулентного пятна. В рамках первого этапа, предполагающего существование фонового нисходящего теплового потока, автор разработал краевую задачу для неоднородного уравнения теплопроводности, учитывающего турбулентный диссипативный нагрев и перемешивание. Эта двухточечная краевая задача была решена аналитически с применением метода Фурье (разделение переменных) для толщины турбулентного пятна. Полученное решение стремится к равновесию по мере увеличения расстояния от передней границы “движущегося” турбулентного пятна. В рамках второго этапа автором была решена задача о тепловой связи двух теплообменных доменов, один из которых характеризуется высоким коэффициентом теплоотдачи. Решение этой задачи легло в основу предположения о том, что тепловая структура турбулентного пятна не изменяется под воздействием внешней атмосферы, а внешняя атмосфера медленно охлаждается над турбулентным пятном и медленно нагревается под ним. В результате показано, что модельные температурные профили имеют те же особенности, что и наблюдаемые в мезосферных инверсионных слоях (МИС): инверсии температуры и почти адиабатический вертикальный градиент температуры между ними.

В статье [Bakhmetieva and Grigoriev, 2022] представлен краткий обзор исследований ионосферы Земли на высотах мезосферы и нижней термосферы методом, основанным на создании искусственных периодических неоднородностей (ИПН) ионосферной плазмы высокочастотным излучением от мощных тепловых установок. ИПН создаются стоячей волной в результате интерференции распространяющихся вверх радиоволн с отраженными от ионосферы. Исследования ИПН в ионосфере основаны на брэгговском рассеянии зондирующих импульсных сигналов от искусственной периодической структуры. Метод позволяет измерять параметры нейтральной и ионизированной составляющих атмосферы Земли. Отметим, что несмотря на то, что метод ИПН предполагает искусственное возмущение ионосферной плазмы, параметры мезосферы и нижней термосферы определяются на стадии релаксации неоднородности и характеризуют невозмущенную среду. К настоящему времени периодические неоднородности наблюдались на установках для нагрева ионосферы Зименки и Сура (SURA, Васильсурск, Россия), Гиссар (Таджикистан), Аресибо (Пуэрто-Рико, США), HIPAS (High Power Auroral Stimulation) и HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program, Гакона, Аляска, США), EISCAT (European Incoherent Scatter, Тромсе, Норвегия). Большинство исследований ионосферы с помощью ИПН проводилось на среднеширотной нагревательной установке SURA (56.1° N; 46.1° E). В обзоре представлены основные результаты определения параметров ионосферы и нейтральной атмосферы на высотах 60–120 км, а также исследования атмосферы во время восходов и заходов Солнца и солнечных затмений. На самом деле обзор далеко не полностью иллюстрирует возможности использования метода ИПН для изучения мезосферы и нижней термосферы.

2. Состав средней атмосферы

В работе [Yankovsky et al., 2019] представлены методы определения высотных профилей концентраций атомарного кислорода [$O(^3P)$], озона [O_3] и углекислого газа [CO_2] в дневной мезосфе-

ре и нижней термосфере (MLT) в рамках модели электронно-колебательной кинетики кислорода YM2011. В качестве косвенных индикаторов $[O(^3P)]$, $[O_3]$ и $[CO_2]$ используются эмиссии синглетных молекул кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+, v \le 2)$, $O_2(a^1\Delta_g, v = 0)$ и атома $O(^1D)$. Для всех предложенных методик авторы сравнивают значения неопределенности найденных $[O(^3P)]$, $[O_3]$ и $[CO_2]$, полученные методом Монте-Карло, с оценками, полученными методом анализа чувствительности в более ранних работах. Для всех описанных выше методов получения профилей $[O(^3P)]$, $[O_3]$ и $[CO_2]$ авторы получили аналитические выражения, включающие концентрации возбужденных веществ, рассматриваемых в качестве прокси. Кроме того, по результатам численных экспериментов методом Монте-Карло были определены оптимальные диапазоны высот для использования этих методов дистанционного зондирования.

В работе [Куликов и др., 2022] приведены результаты одновременного микроволнового мониторинга содержания озона в средней атмосфере в Апатитах (67° N, 33° E) и Петергофе (60° N, 30° E) в течение зимы и весны 2021/22 г. Для измерения содержания озона использованы идентичные мобильные микроволновые спектрометры с рабочей частотой 110.8 ГГц. Методики наблюдений и оценки вертикальных профилей O_3 в интервале высот 22–60 км для данных приборов одинаковые. Основное внимание уделено изменениям содержания озона (суточному ходу) в мезосфере во время полярной ночи и динамических возмущений. Для интерпретации изменений концентрации озона на высоте 60 км использованы бортовые спутниковые данные MLS/“Aura” о распределении температуры по высоте в средней атмосфере над Апатитами.

В работе [Kulikov et al., 2022] на основе данных наблюдений прибора SABER (Sounding of the Atmosphere using Broad band Emission Radiometry) на борту спутника TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) в 2003–2015 гг. получено распределение атомарного кислорода и атомарного водорода в области мезопаузы (~77–100 км) для дневных условий с учетом реакции озона с атомарным водородом в уравнении баланса озона (УБО). Затем были рассчитаны дневные распределения OH, HO_2 и соответствующая суммарная скорость химического нагрева (СХН) от семи экзотермических химических реакций. Новизна подхода заключается в том, что для процедуры извлечения авторы впервые учитывают реакцию $H + O_3 \rightarrow O_2 + OH$ в дневном УБО. Показано, что пренебрежение этой реакцией мало влияет на распределение H, но приводит к занижению значений O и СХН (до ~35–40%) и завышению значений HO_2 и OH (до ~50–85%).

В работе [Bakhmetieva et al., 2020] представлены результаты экспериментов по исследованию нижней ионосферы Земли на мезосферных высотах путем создания искусственных периодических неоднородностей (ИПН) ионосферной плазмы и одновременного измерения спектра излучения атмосферы в линии озона методом наземной микроволновой радиометрии при возмущении ионосферы мощным высокочастотным радиоизлучением от среднеширотной нагревательной установки SURA (56.15° N; 46.11° E). Диагностика ионосферы проводилась на основе измерения амплитуд и фаз сигналов, рассеянных периодическими неоднородностями в диапазоне высот 50–130 км. Для каждого сеанса нагрева продолжительностью 30 мин измерялись два спектра озона. Эти спектры сравнивались со спектрами, измеренными в периоды, когда нагрев был выключен. Во время сеанса нагрева ионосферы наблюдалось уменьшение интенсивности микроволнового излучения атмосферы в линии озона. Нижняя ионосфера характеризовалась интенсивной динамикой. Наблюдались быстрые вариации амплитуды рассеянного сигнала и времени релаксации искусственных периодических неоднородностей. Скорость регулярного вертикального движения в D-области ионосферы постоянно меняла направление со среднеминутными значениями до 4–5 м/с. Предположено, что уменьшение спектра эмиссии озона на высоте 60 км можно объяснить увеличением коэффициента присоединения электронов к молекулам кислорода во время сеансов нагрева. Нижняя граница области, обогащенной атомарным кислородом, была оценена по высотному профилю времени релаксации ИПН.

В работе [Куликов и др., 2020] изложены результаты исследования методом микроволновой радиометрии динамики содержания озона в средней атмосфере над Петергофом во время стратосферных потеплений для двух зим 2015–2016 и 2016–2017 гг. В наземных наблюдениях был использован мобильный микроволновый озонометр (рабочая частота 110.8 ГГц). Выполнены оценки вертикального распределения озона в области высот 22–60 км. Эти результаты были сопоставлены как с бортовыми данными об общем содержании озона и высотными профилями озона и температуры в средней атмосфере, так и с данными озонозондов. В средней атмосфере над Петергофом были отмечены значительные (в несколько раз) вариации содержания озона на высотах 40–60 км, которые были вызваны стратосферным потеплением минорного типа.

В работе [Тимофеев и др., 2021] отмечается, что важность контролирования общего содержания озона (ОСО) и ультрафиолетовой освещенности поверхностей является причиной постоянного мониторинга озоносферы с помощью различных наземных и спутниковых методов и

приборов. Глобальный мониторинг ОСО с 2015 г. осуществляется российским прибором ИКФС-2 на спутнике "Метеор-М" № 2. Эти измерения проводят в течение полных суток и в условиях полярной ночи. Разработанный алгоритм, основанный на использовании искусственных нейронных сетей и спутниковых измерений прибора OMI, периодически уточняется и позволяет в среднем определять ОСО с суммарной погрешностью 3–5%. Данные измерений ИКФС-2 можно использовать для анализа пространственных и временных (сезонных, межгодовых) вариаций озона, долговременных трендов его содержания, проверки современных численных моделей стратосферы, изучения аномалий содержания озона и т.д. Приведены примеры анализа ОСО в осенние и зимне-весенние периоды и аномалий ОСО зимой и весной 2020 г., наглядно показывающие преимущества спутниковых измерений ОСО методом теплового излучения.

В работе [Никитенко и др., 2022] проведено сопоставление измерений содержания CO_2 в нижней стратосфере (слой 12–18 км) по данным наземных измерений ИК Фурье-спектрометром Bruker 125 HR и спутниковых измерений прибором ACE в период 2009–2019 гг. Анализ двух типов измерений показал, что между ними наблюдается хорошее согласие. В среднем данные наземных измерений CO_2 превышают спутниковые на 2.8 ppm (менее 1%), стандартные отклонения составляют ~5.0 ppm. Коэффициент корреляции между результатами измерений двумя методами 0.77. Наземные и спутниковые данные демонстрируют слабые сезонные вариации, которые противоположны сезонным вариациям CO_2 в тропосфере: в нижней стратосфере максимальные значения содержания CO_2 наблюдаются летом, а минимальные – зимой.

В работе [Никифорова и др., 2019] по данным отечественной сети фильтровых озонометров М-124 и результатам спутникового мониторинга исследована изменчивость общего содержания озона в Арктике в зимний сезон 2015/2016 г. Проанализировано развитие в конце января 2016 г. первой за всю историю наблюдений озоновой мини-дыры, возникшей в первом полугодии. Представлен анализ причин наблюдавшейся изменчивости общего содержания озона над территорией России в первом квартале 2016 г., проведено сопоставление со значительными озоновыми аномалиями в Арктике в 1996/1997 и 2010/2011 гг.

В работе [Варгин и др., 2020б] проведено исследование изменчивости параметров антарктической озоновой аномалии с использованием данных спутникового мониторинга озонового слоя TOMS/OMI, реанализа MERRA-2 и баллонного зондирования вертикального распределения озона и температуры на Южном полюсе. Анализируются динамические процессы в стратосфере Антарктики, определяющие условия для сильного разрушения озонового слоя, которое за последние 8 лет, несмотря на уменьшение концентраций озоноразрушающих веществ, наблюдалось в Антарктике в 2011 и 2015 гг.

В работе [Кропоткина и др., 2019] представлены результаты наземных микроволновых измерений профилей стратосферного озона над Москвой в холодные полугодия 2014–2015 и 2015–2016 гг., рассмотрены причины наблюдавшихся изменений озона в верхней стратосфере. Зимой 2014–2015 гг. отмечались повышенная активность планетарных волн, большие перепады температуры в начале зимы и пониженные температуры с января по март. Полярный вихрь был неглубоким и долгоживущим, в феврале–марте холодный воздух вихря находился над Москвой. Это привело к сильной отрицательной корреляции измеренного содержания озона с температурой. Наибольшее содержание озона на уровне 2 мбар наблюдалось в середине марта. Напротив, в ноябре–декабре 2015 г. при меньшей активности планетарных волн возник интенсивный полярный вихрь, который был полностью разрушен мажорным финальным потеплением в начале марта 2016 г. Вариации озона в верхней стратосфере над Москвой в декабре 2015 г. и январе 2016 г. были связаны с чередованием воздушных масс вихря и областей вне вихря. В начале 2016 г. более высокие температуры (по сравнению с началом 2015 г.) привели к пониженному содержанию озона. Межгодовое различие содержания озона в первой половине марта превысило 40% от среднемесячного.

Зимой–весной 2019–2020 гг. наблюдалась самая значительная озоновая аномалия в Арктике за всю историю наблюдений. Она была обусловлена необычайно сильным и продолжительным полярным вихрем, повлекшим беспрецедентное химическое разрушение озона. В работе [Баженов, 2021] анализ данных Aura OMI/MLS показал, что общее содержание озона неуклонно сокращалось и составило 230 е.Д. 18 марта в пункте Алерт, 222 е.Д. 18 марта в Эврике, 229 е.Д. 20 марта в Туле и 226 е.Д. 18 марта в Резольют. Минимальная температура была на 9-10% ниже нормы с декабря по апрель в стратосфере над Томском и Арктикой. Концентрация озона уменьшалась до 4 и 6% от многолетней средней на высоте 20 км 27 марта в пункте Эврика и на высоте 19 км 16 апреля в пункте Ню-Олесунн, соответственно. Такое явление вписывается в контекст климатических изменений, ведущих к охлаждению стратосферы. До тех пор, пока уровень озоноразрушающих веществ в стратосфере Арктики не снизится до значений, ожидаемых от реализации Монреальского протокола, будет сохраняться опасность повторения подобных явлений в будущем. Исключительная изоляция вихря в 2020 г. значительно уменьшила его влияние на средние широты.

Зимой–весной 2010/2011 и 2019/2020 гг. наблюдались сильнейшие аномалии озонового слоя в стратосфере Арктики за всю историю спутниковых наблюдений. Они были вызваны чрезвычайно сильным и продолжительным стратосферным полярным вихрем, повлекшим беспрецедентное химическое разрушение озона. В работе [Баженов, 2022] анализ данных TEMIS показывает, что относительное отклонение общего содержания озона (ОСО) от многолетнего (2003–2019 гг., за исключением 2011 г.) среднего составило 37–44% в 2011 г. и 45–55% в 2020 г. на станциях наблюдения, расположенных в арктических широтах, и 27–36% в 2011 г. и 27–32% в 2020 г.– в субарктических. По данным Aura MLS, минимальные температуры над Арктикой были на 8–12% ниже нормы в 2011 г. и на 8–13% ниже нормы в 2020 г. Концентрация озона для ст. Алерт падала до 23% от многолетнего среднего на высоте 20 км 22 марта 2011 г. и до 6% на высоте ~ 19 км 15 апреля 2020 г. Детальный корреляционный анализ показал, что отклонения концентраций водяного пара и озона, водяного пара и температуры, озона и температуры от многолетних средних значений сильнее коррелируют в 2020, чем в 2011 г. Корреляции убывают к периферии вихря вследствие обмена воздушными массами между арктическими и средними широтами, а за пределами Северного полярного круга становятся малозначимы.

В наш ядерный век существуют опасения о судьбе озонового слоя Земли: считается, что как крупномасштабный, так и локальный конфликт с применением ядерного оружия способен на годы разрушить озоновый слой. 22 сентября 1979 г. официально не установленное государство скрытно выполнило ночные ядерные испытания в пустынном районе мирового океана. Это событие принято называть “Инцидент Вела”. В работе [Кашкин и др., 2022] использованы данные об озоне, полученные спутником НАСА Nimbus-7 через 16 мин 44 с после взрыва. Показано, что ударная волна оставляет “след” на озоновом слое. Уменьшения количества озона не замечено, по “следу” определены координаты места взрыва.

Динамические процессы и изменения озонового слоя в арктической стратосфере зимой 2019–2020 гг. анализировались в работе [Smyshlyaev et al., 2021] с использованием численных экспериментов с химико-транспортной моделью (ХТМ) и данных реанализа. Результаты численных расчетов с использованием ХТМ с динамическими параметрами, заданными по данным реанализа MERRA-2 (Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2), проведенных для нескольких сценариев учета химического разрушения озона, продемонстрировали, что в изменения озона над выбранными станциями сети Всемирного центра данных по озону и ультрафиолетовому излучению (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) как в восточном, так и в западном полушариях, существенный вклад вносят как динамические, так и химические процессы. На основе численных экспериментов с ХТМ для конкретных динамических условий зимы-весны 2019–2020 гг. зафиксировано уменьшение озона до 100 единиц Добсона (DU) в восточном полушарии и более 150 DU в западном полушарии. При этом фотохимическое разрушение озона как в западном, так и в восточном полушарии в максимуме составляло около 50 DU с пиками в апреле в восточном полушарии и в марте-апреле в западном полушарии. Гетерогенная активация галогенных газов на поверхности полярных стратосферных облаков, с одной стороны, привела к резкому увеличению разрушения озона в хлорном и бромном каталитических циклах, а с другой – к уменьшению его разрушения в азотном каталитическом цикле. Анализ волновой активности с использованием 3D потоков Пламба показал, что усиление распространения восходящей волновой активности в середине марта над заливом Аляска наблюдалось на стадии развития минорного внезапного стратосферного потепления (ВСП), которое привело к смещению стратосферного полярного вихря к северу от Канады и уменьшению объема полярных стратосферных облаков.

В работе [Gabis, 2020] исследована межгодовая изменчивость общего содержания озона (ОСО) в экваториальной области (5° S–5° N) по спутниковым суточным и месячным данным за 1978–2018 гг. Связь изменений экваториального ОСО с квазидвухлетними осцилляциями (КДО) зонального ветра в экваториальной стратосфере известна давно. Однако детальный анализ ежедневных десезонированных данных ОСО на протяжении 15 полных циклов КДО ветра убедительно показал некоторые новые важные особенности КДО озона (ΔОСО). Ключевые точки экваториальных вариаций ΔОСО четко связаны с определенными моментами времени при распространении вниз от ~10 до ~70 гПа восточного и западного режимов КДО ветра. Экваториальный ΔОСО заметно максимизируется, когда западный режим достигает ~70 гПа, а восточный режим появляется на ~10 гПа, что происходит одновременно. Времена минимумов экваториального ΔОСО менее очевидны, что связано с появлением западного режима на уровне ~10 гПа на фоне незавершенного спуска восточного режима. Кроме того, сезонные закономерности КДО ветра обусловливают сезонную зависимость КДО озона в экваториальной области. Максимумы экваториального ΔОСО определенно наблюдаются вблизи месяцев солнцестояния (июнь или декабрь). Этот результат противоречит общепринятому мнению об отсутствии сезонной синхронизации КДО экваториального озона в отличие от сезонно синхронизированного внетропического озона. Однако совпадение максимумов экваториального ΔОСО с солнцестояниями и, сле-

довательно, их повторяемость каждые 2–2.5 года позволяют прогнозировать экваториальное ОСО, основываясь на долгосрочном прогнозе КДО ветра. Представлен прогноз КДО озона на последующие примерно два года (2019–2021 гг.).

В работе [Габис, 2021] показано, что озоновая дыра, наблюдающаяся в Антарктике ежегодно в весенний период, развивается в результате комплексного воздействия фотохимических и динамических процессов. Повышенное содержание в атмосфере озоноразрушающих веществ является причиной многолетнего отрицательного тренда общего содержания озона, интенсивные межгодовые флуктуации которого, наблюдающиеся на фоне многолетнего тренда и связанные с динамическими атмосферными процессами, не позволяют однозначно оценить направление тренда (рост или спад) в последние годы. Изучение зависимости межгодовых флуктуаций интенсивности озоновой дыры от квазидвухлетних осцилляций зонального ветра в экваториальной стратосфере позволяет выделить естественные причины вариаций и оценить тренд, обусловленный антропогенными факторами. Долгосрочный прогноз квазидвухлетних осцилляций дает возможность прогноза зависящих от них различных явлений.

В работе [Цветкова и др., 2021] приведены оценки химического разрушения озона в зимне-весенние сезоны для стратосферы Арктики на базе многолетних данных наблюдений вертикального распределения озона. Проанализированы особенности и возможные причины необычайно сильного и устойчивого стратосферного полярного вихря в Арктике в зимний сезон 2019/2020 г., приведшего к рекордному за последние годы разрушению озонового слоя, и связанные с этим полярным вихрем динамические процессы. С использованием траекторной модели TRACAO и данных реанализа ERA5 проведен сравнительный анализ разрушения озона в полярном вихре в зимне-весенние сезоны 2010/2011 г. и 2019/2020 гг.

В работе [Смышляев и др., 2020] рассмотрена изменчивость общего содержания озона в Антарктике в период с 1980 по 2018 г. Проведен анализ трендов изменения содержания озона над Антарктикой в течение исследуемого периода, а также физических и химических процессов, влияющих на сезонную изменчивость содержания озона. Основное внимание уделено влиянию динамических процессов на устойчивость антарктического циркумполярного вихря, формированию полярных стратосферных облаков, а также влиянию газофазных и гетерогенных процессов на поверхности полярных стратосферных облаков и сульфатного аэрозоля. Методом исследования является анализ результатов наземных и спутниковых наблюдений и численное моделирование физических и химических процессов над Антарктикой с использованием глобальной модели состава атмосферы с задаваемыми на основании данных реанализа динамическими параметрами.

В работе [Коршунов и др., 2018] приводятся результаты двухволнового лидарного зондирования средней атмосферы в диапазоне высот от 30 до 60 км над г. Обнинском (55.1° N, 36.6° E) в 2012–2017 гг. Усредненные по слоям 40–50 и 50–60 км среднемесячные значения отношения коэффициентов обратного аэрозольного и обратного рэлеевского рассеяний (ОКОАРР) на длине волны 532 нм изменяются от 0 до 0.02, в то время как средние пиковые уровни ОКОАРР в этих слоях варьируют от 0.1 до 0.2. Наблюдаются кратковременные (менее месяца) и долговременные (от полугода и более) вариации обратного рассеяния. Кратковременные вариации соотносятся по времени с прохождением метеорных потоков. Долговременное увеличение обратного рассеяния в слое 50–60 км наблюдалось в 2013 г. после падения Челябинского метеорита, а также в первом полугодии 2016 г. В 2014–2015 гг. среднемесячное ОКОАРР в пределах погрешностей было равно 0 на высотах от 40 до 60 км. Проведен анализ возможности проявления метеорного аэрозоля в обратном рассеянии с учетом потоков метеорного вещества, гравитационного осаждения аэрозоля и влияния вертикального ветра. Показано, что поток видимых метеоров с массой более 6–10 кг и болидов недостаточен для долговременного увеличения обратного рассеяния в слое 50–60 км. Предполагается, что наиболее вероятной причиной увеличения обратного рассеяния является формирование укрупненной фракции частиц метеорной дымки, образующихся при абляции радиометеоров и проникающих в верхнюю стратосферу в области полярного стратосферного вихря. В начале 2016 г. этому способствовали образование необычайно интенсивного полярного стратосферного вихря и его смещение в сторону Евразии.

В работе [Герасимов и др., 2019] пересмотрены результаты лидарного зондирования аэрозоля в стратосфере над Томском за период с 29 июня по 14 июля 1991 г., первоначально интерпретированные как аэрозольные слои после извержения вулкана Пинатубо. С помощью траекторной модели NOAA HYSPLIT показано, что аэрозольные слои, зарегистрированные 29 июня и 11 июля на высотах 12 и 14.2 км соответственно, являлись стратосферным дымовым шлейфом от крупных лесных пожаров, имевших место в июне 1991 г. в провинции Квебек (Канада). Продукты горения достигли стратосферы за счет конвективного подъема внутри пирокумулятивного облака (pyroCb), зарегистрированного 19 июня в 100 км к западу от г. Бэ-Комо (Квебек, Канада). Аэрозольные слои, наблюдаемые 8, 9 и 14 июля на высотах от 11 до 16.5 км, представляли собой суперпозиции дымового шлейфа от квебекского pyroCb и первых следов извержения вулкана Пинатубо.

В работе [Баженов и др., 2020] лидарные измерения на Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы СО РАН в Томске (56.5°N; 85.0°E) показали наличие стратосферных аэрозольных слоев, оседание воздушных масс и дефицита ОСО над городом зимой 2017–2018 гг. Данные Aura OMI/MLS указывали на то, что в декабре 2017 г.–январе 2018 г. общее содержание озона (ОСО) и содержание NO_2 в стратосфере над севером Евразии, а также температура в стратосфере были значительно ниже нормы. Анализ обратных траекторий и интегрального (по профилю) ОСО показал, что динамическое возмущение арктической стратосферы в декабре 2017 г. привело к вытеснению холодных воздушных масс с избыточным содержанием агрессивного хлора (ввиду дефицита NO_2) за пределы полярного круга и их вторжению в стратосферу Томска. По всей видимости, в стратосфере Томска они подверглись воздействию солнечного излучения и, оставаясь пространственно изолированными, перешли в химически возмущенное состояние, сходное с состоянием весенней стратосферы Арктики, в которой озон интенсивно разрушается вплоть до финального потепления.

В работе [Невзоров и др., 2021] представлены подекадно усредненные временные ряды общего содержания озона и интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния над Томском в период 2000–2016 гг., полученные с помощью озонометра М-124 и лидарным методом соответственно. Исследована взаимосвязь между ними. Из временных рядов рассматриваемого периода сформированы годовые ходы в виде подекадных значений (всего 36 точек) исследуемых параметров. Проведен анализ и выявлены отличия и подобия этих временных рядов.

В работе [Черемисин и др., 2021] рассматривается вынос в стратосферу аэрозоля горения от пожаров летом 2019 г., когда были зафиксированы многочисленные лесные пожары на территории Сибири, Канады и Аляски. По результатам лидарных наблюдений, проведенных в Томске в августе 2019 г., в нижней стратосфере были обнаружены явно выраженные слои аэрозольного рассеяния. Анализ результатов расчета обратных траекторий движения воздушных масс с привлечением радиометрической информации со спутников о пожарах в Северном полушарии, а также данных космического лидара со спутника CALIPSO позволяет утверждать, что наблюдаемые аэрозольные слои образовались в результате выноса в стратосферу продуктов горения при пожарах в Сибири.

В работе [Зуев и др., 2022а] показано, что в результате крупных извержений тропических вулканов в стратосферу выбрасывается большое количество вулканогенного аэрозоля, способствующего формированию положительных температурных и отрицательных озоновых аномалий в нижней тропической стратосфере. Крупные извержения с индексом вулканической взрывчатости VEI ≥ 5 способны вызывать глобальную депрессию озоносферы. Вулканогенное повышение температуры нижней тропической стратосферы приводит к увеличению стратосферного меридионального температурного градиента и последующему усилению полярного вихря. В условиях зимне-весеннего усиления вихря формируются полярные озоновые аномалии. Стратосферные аномалии озона вследствие усиления УФ-Б-радиации могут проявляться в деградации хвойных лесов, которые служат биосферным индикатором климатических изменений. Массовое очаговое усыхание темнохвойных лесов наблюдается в горных районах Южной Сибири с середины 1990-х гг. в условиях увеличения приземной УФ-Б-радиации в результате истощения озонового слоя после извержения вулкана Пинатубо.

В работе [Коршунов и Зубачев, 2022а] представлены результаты лидарного зондирования аэрозольной компоненты нижней мезосферы на длинах волн 355 и 532 нм на лидарных станциях Росгидромета с 2012 по 2021 г. С 2018 г. наблюдается заметный рост отношения обратного рассеяния R в высотном диапазоне 50–70 км. Средний уровень R на высоте 70 км в 2019–2020 гг. достигал 1.25. Измерения температуры рэлеевским методом на длине волны 532 нм в этот период дают завышенные значения температуры в мезосфере на величину до +20 K. Использование двухволнового метода измерения температуры компенсирует эту погрешность.

В работе [Черемисин и др., 2019] с помощью построения траекторий лагранжевых частиц проведен анализ переноса вулканического аэрозоля в атмосфере после извержения вулканов Гримсвотн и Набро в 2011 г. После извержения вулкана Гримсвотн не удалось достоверно выделить вулканический аэрозоль по данным лидарных наблюдений над Томском и Владивостоком на фоне существовавшего аэрозольного наполнения, так как в это время происходило сильное горизонтальное перемешивание в атмосфере Северного полушария. Вулканический аэрозоль, возникший после извержения вулкана Набро, отчетливо проявился в виде пиков аэрозольного рассеяния над Владивостоком и Томском. Это подтвердили данные космического лидара CALIPSO и результаты спутниковых измерений содержания диоксида серы прибором GOME-2. Прослежена динамика формирования эруптивного аэрозольного облака над Северным полушарием.

В работе [Маричев и Бочковский, 2021] приведены и проанализированы результаты наблюдений особенностей внутригодовой изменчивости вертикального распределения фонового аэрозоля в стратосфере над Западной Сибирью за 2016–2018 гг. Экспериментальные данные получены на лидар-

ном комплексе ИОА СО РАН с диаметром приемного зеркала 1 м. Исследования выполнены с целью изучения динамики фонового стратосферного аэрозоля, поскольку в данный период не было вулканических извержений, приводящих к заносу эруптивного аэрозоля в стратосферу. По результатам исследований подтвердился устойчивый внутригодовой цикл максимального аэрозольного наполнения стратосферы зимой, убывания весной до минимального, практического отсутствия летом и возрастания осенью. Вместе с тем отмечается изменчивость стратификации и наполнения аэрозоля для разных лет. Установлено, что аэрозоль в течение всего года, за исключением зимнего периода, концентрируется в слое до 30 км. Показано, что стратификация аэрозоля с высотой в значительной степени определяется термическим режимом пограничного слоя тропосфера – стратосфера. Отсутствие выраженной температурной инверсии – тропопаузы – способствует усилению тропосферно-стратосферного обмена и, как следствие, заносу аэрозоля в стратосферу. Указанная ситуация характерна для холодного периода года. Впервые по данным одночастотного лидарного зондирования получены оценки количественного содержания стратосферного аэрозоля - его массовой концентрации.

3. Циркуляция

В работе [Криволуцкий и др., 2021a] представлен обзор работ, выполненных в лаборатории химии и динамики атмосферы Центральной аэрологической обсерватории, по созданию и использованию глобальных численных моделей атмосферы. Модели созданы в рамках плановой тематики Росгидромета.

В работе [Vargin et al., 2022a] анализируются результаты моделирования на базе 5-й версии комбинированной климатической модели Института Вычислительной Математики (ИВМ) для периода с 2015 по 2100 гг. при умеренном (SSP2-4.5) и жестком (SSP5-8.5) сценариях роста парниковых газов для исследования изменений арктического стратосферного полярного вихря, распространения планетарных волн, частоты внезапных стратосферных потеплений, дат финальных потеплений, меридиональной циркуляции. Выявлены усиление распространения волновой активности и стационарной планетарной волны с волновым числом 1 в средней и верхней стратосфере, ускорение меридиональной циркуляции, увеличение среднего за зимний период объема полярных стратосферных облаков (V_{psc}) и усиление межгодовой изменчивости арктической стратосферы после середины XXI века, особенно по жесткому сценарию. Мартовские среднемесячные значения V_{psc} в отдельные зимы могут примерно в два раза превышать наблюдаемые в арктической стратосфере весной 2011 и 2020 гг., что, в свою очередь, может привести к большому разрушению озонового слоя. Композитный анализ показывает, что “теплые” зимы с наименьшими среднезимними значениями V_{psc} характеризуются усилением распространения волновой активности из тропосферы в стратосферу в декабре, но более слабым распространением в январе-феврале по сравнению с зимами, имеющими наибольшие значения V_{psc}.

В статье [Шашкин и др., 2019] описаны работы по созданию версии глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ с высоким пространственным разрешением в стратосфере. Новая версия модели использует вертикальную сетку со 100 уровнями, с шагом 500 м в слое от 100 до 10 гПа и верхней границей на уровне 0.04 гПа. Внедрена параметризация неорографического гравитационно-волнового сопротивления. В блок численного решения уравнений динамики внесен ряд модификаций, повышающих устойчивость модели. Эксперимент по моделированию динамики атмосферы рассчитан на 28 лет. Показано, что модель ПЛАВ воспроизводит основные особенности циркуляции стратосферы, такие как формирование полярных стратосферных вихрей и внезапные стратосферные потепления; воспроизводятся также квазидвухлетние колебания экваториального ветра с реалистичными периодом и амплитудой.

В работе [Korotyshkin et al., 2019a] для изучения долготных структур ветра проанализированы среднеширотные скорости ветра мезосферы и нижней термосферы (MLT), измеренные двумя метеорными радарами (MP) SKiYMET в Колме (51° N, 13° E) и Казани (56° N, 49° E) в течение 2016–2017 гг. Разности между среднемесячными скоростями преобладающего ветра и амплитудами приливов сравнивались с соответствующими разностями, полученными по спутниковым данным ветра TIMED/TIDI и скоростям градиентного ветра по данным прибора AURA/MLS. Показано, что разность ветров MP между двумя пунктами статистически значима. Различие горизонтальных преобладающих ветров можно объяснить суперпозицией фонового зонального потока, который различается на двух широтах, со стационарными планетарными волнами различного происхождения. Существенный вклад в различие полусуточных приливных ветров между двумя точками вносят немигрирующие приливы.

В работе [Korotyshkin et al., 2019b] представлены новые данные по горизонтальному ветру метеорного радара (MP), полученные в 2015–2018 гг. в Казани (56° N, 49° E). Измерения проводились с помощью современного метеорного радара SKiYMET. Среднемесячные вертикальные профили зональной и меридиональной составляющих скорости преобладающего ветра, а также амплитуды и фазы составляющих суточного (DT) и полусуточ-

ного (SDT) приливного ветра, осредненные за исследуемый период., представлены в виде контурных графиков и сравниваются с распределениями этих параметров по данным предыдущих многолетних МР измерений в Казани (1986–2002 гг.) и по последней эмпирической модели HWM07. Анализ показывает, что зональные и меридиональные скорости преобладающего ветра SKiYMET в целом хорошо согласуются с сезонными ветрами, полученными ранее с помощью МР, и имеют те же сезонные особенности. Сравнение с моделью HWM07 не дает благоприятных результатов: согласно модели, ячейки направленных на восток ветров вблизи солнцестояний значительно больше, >30 м/с по сравнению с 15–20 м/с. Кроме того, линии разворота слишком меняются по высоте, а положения моделируемых ячеек (положительных и отрицательных) не похожи ни на полученные МР в Казани, ни на других MLT-радарах. Обе системы МР обеспечивают большие амплитуды SDT, около 30 м/с, и вертикальные длины волн, около 55 км, для обеих компонент в средних широтах в зимний период. Они также показывают хорошо известную сильную сентябрьскую особенность SDT (высоты 85–100 км, вертикальная длина волны ~55–60 км) и слабую летнюю SDT на 80–91 км. HWM07 показывает нереальные амплитуды и фазы выше 90 км по высоте и месяцу: минимальные амплитуды в равноденствия и отсутствие сентябрьской особенности.

Слабые DT средних и высоких широт показывают сходные структуры амплитуды и фазы по обоим МР 1986–2002 гг. и 2015–2017 гг.: наибольшие амплитуды (10–12 или 8–10 м/с) для эванесцентного меридионального прилива летом, с пиком в конце июля; наиболее слабые (0–2, 2–4 м/с) на высотах от 80 до 92–96 км, когда прилив распространяется вертикально (январь, февраль, ноябрь, декабрь) с вертикальной длиной волны около 40 км. HWM07 снова показывает отличающиеся структуры амплитуд и фаз: пики амплитуд приходятся на равноденствия: апрель – 15 м/с на 88 км; октябрь – 21 м/с на 89 км.

Связь параметров ветра МР с параметрами ветра ERA5 изучается для 2016 г. Показано, что преобладающие ветры, амплитуды и фазы DT из обоих наборов данных могут быть просто связаны друг с другом, но амплитуды SDT из ERA5 существенно недооценены на верхних модельных уровнях проекта реанализа ERA5.

Новая возможность оценки уровня турбопаузы представлена в работе [Tolmacheva et al., 2019]. В ее основе лежит метод определения параметров атмосферы по искусственным периодическим неоднородностям ионосферной плазмы (методика ИПН). Полученные данные свидетельствуют о наличии вариаций уровня турбопаузы. Для создания ИПН были проведены эксперименты с использованием нагревательной установки SURA (56.1° N, 46.1° E). Над точкой наблюдения область турбопаузы занимает интервал высот от 94 до 106 км. В течение суток наблюдается изменение уровня турбопаузы: в вечерние часы уровень турбопаузы может понижаться. Наблюдаются временные вариации уровня турбопаузы. Они сопоставляются с вариациями параметров атмосферы на этих высотах.

Авторы статьи [Merzlyakov et al., 2020a] представляют результаты измерений ветра вблизи мезопаузы, выполненных с помощью метеорных радаров (МР) в Колме (51° N, 13° E), Обнинске (55° N, 37° E), Казани (56° N, 49° E), Ангарске (52° N, 104° E) и Анадыре (65° N, 178° E) с 1 октября 2017 по 31 марта 2018 г. МР в Колме и Казани являются радарами SKiYMET с вертикальной передачей и определением высоты радиоэха, остальные радары работают с горизонтальной передачей и без определения высоты. Особое внимание было уделено изменчивости меридионального ветра с периодами 4–6 суток и 9–11 суток. Волны с такими периодами видны как пятна волновой активности в вейвлет-спектрах и включают колебания с разными периодами и разными дискретными зональными волновыми числами. Эти волновые пакеты последовательно распространяются в виде группы волн от одного участка к другому таким образом, что они наблюдаются на одном участке и практически исчезают в предыдущем. Группа волн с периодами 4–6 суток включает колебания планетарного масштаба (отдельные спектральные компоненты), которые имеют фазовые скорости в восточном направлении и преимущественно зональные числа волн 2 и 3, а вертикальная длина волны превышает 70 км в средних широтах. Источником колебаний является неустойчивость полярной струи. Сама группа волн распространяется в западном направлении, а амплитуды колебаний ветра составляют примерно 5–6 м/с, как получено из данных о ветре, осредненных по зоне метеора. Набор волн с периодами 9–11 суток распространяется на запад как группа и состоит в основном из спектральных компонент, имеющих фазовую скорость, направленную на запад, и зональное волновое число 1. Амплитуды этих ветровых возмущений сильно различаются от станции к станции и могут достигать примерно 8 м/с. Вертикальное волновое число составляет 0.014 км$^{-1}$ по данным Казани и 0.05 км$^{-1}$ по данным Колма. Авторы получили глобальное представление о волнах, используя данные геопотенциала AURA MLS. Обнаружено хорошее соответствие между характеристиками волн, полученными по измерениям ветра МР и данным MLS. Подобное распространение планетарной волны в области мезосферы/нижней термосферы (MLT) до сих пор не привлекало особого внимания.

Результаты по временной и долготной модуляции амплитуд полусуточных приливов в мезосфере и ветров нижней термосферы представлены в

работе [Merzlyakov et al., 2020б]. Данные о ветре были получены в октябре–декабре 2017 года при одновременной работе шести метеорных радаров. Сеть радаров охватывает широты от 51° N до 72° N и долготы от 13° E до 178° E. Результаты показывают четкую приливную 8–9-суточную амплитудную модуляцию, которая существенно изменяется с широтой. Доказано, что источником модуляции является нелинейное взаимодействие полусуточного прилива с планетарными волнами, распространяющимися на восток и запад. Модуляция от взаимодействия с распространяющимися на восток волнами с зональным числом волны 1 наблюдается в высоких широтах (65°–72° N). В средних широтах (51°–52° N) на смену приходит модуляция, соответствующая нелинейному взаимодействию с распространяющейся на запад волной с зональным волновым числом 1. Кроме того, обнаружена значимая статистическая связь между колебаниями зональной струи в верхней стратосфере и долготной разницей амплитуд приливов, полученных на среднеширотных станциях Колм и Ангарск. Коэффициенты корреляции составляют около 0.61 и 0.55 для зональных и меридиональных амплитуд, соответственно. Разница между приливными ветрами, взятыми на разных долготах, увеличивается по амплитуде для обеих компонент ветра в средних широтах во время нарастания активности стационарной планетарной волны 1 в декабре. Данные по верхнему мезосферному ветру TIDI указывают на то, что ведущим источником этого эффекта является полусуточный прилив, распространяющийся в западном направлении с волновым числом 3. Разница между приливными ветрами в высоких широтах показывает различное поведение зональной и меридиональной компонент ветра в декабре.

В работе [Koval et al., 2019] проведено численное моделирование преобразования средней меридиональной циркуляции в диапазоне высот 0–100 км на разных фазах моделируемых событий стратосферного потепления (СП) в январе–феврале с учетом и без учета влияния мезомасштабных орографических гравитационных волн (ОГВ). Для получения ансамбля из 12 пар модельных прогонов с параметризацией и без параметризации эффектов ОГВ использовалась численная модель средней и верхней атмосферы (MUAM). Полученные результаты свидетельствуют об ослаблении зонально-осредненной меридиональной циркуляции на высотах до 100 км во время и после моделируемого СП по сравнению с интервалом времени до СП. На высотах менее 50 км наблюдается ослабление (до 15%) средних меридиональных ветров, направленных к югу, до и после моделируемых СП. Эффекты ОГВ могут увеличивать средний ветер, направленный к северу, на высотах более 60 км до 10–15%. Наиболее существенные изменения меридиональной циркуляции в средней атмосфере наблюдаются в средних и высоких широтах северного полушария: меридиональная циркуляция, направленная на юг, увеличивается на высотах выше 40 км и уменьшается ниже 40 км. Таким образом, глобальная средняя меридиональная циркуляция в средней атмосфере может существенно зависеть от различных фаз событий СП в зимний сезон в северном полушарии. Она также весьма чувствительна к динамическим и термическим воздействиям ОГВ.

В работе [Shpynev et al., 2019] рассмотрены физические механизмы, ответственные за формирование плоскослоистых струйных течений в зимней стратосфере. В отличие от традиционного представления о балансе между энергией поглощения солнечного УФ-излучения стратосферным озоном в полосе Хартли и энергией потерь за счет инфракрасного излучения молекул CO_2, O_3, и H_2O, показано, что такой баланс не выполняется. Показано, что наблюдаемый в спутниковых экспериментах дисбаланс этих энергий может быть объяснен динамическим механизмом, увеличивающим гравитационный потенциал воздуха в тропической стратосфере и формирующим бароклинную неустойчивость экватор/зимний полюс, которая порождает струйное течение. Струйные течения переносят энергию и импульс из экваториальной области в полярную и обеспечивают нисходящую ветвь глобальной циркуляции Брюера–Добсона. Высвобождение потенциальной энергии при опускании стратосферного струйного течения составляет $\sim 10^{18}$ Вт/сут; масса воздуха, переносимая струйным течением в область зимней тропопаузы, оценивается в $\sim 10^{14}$ кг/сут. На основе данных реанализа ECMWF ERA-Interim проанализированы временные характеристики движения стратосферного воздуха от области генерации избытка гравитационного потенциала в летней тропической стратосфере до высот полярной зимней тропопаузы, где стратосферный воздух заканчивает свое движение, участвуя в циклогенезе. Продолжительность нисходящей части циркуляции Брюера–Добсона в зимней стратосфере/тропосфере составляет в среднем 50–70 суток.

Арктический стратосферный полярный вихрь обычно формируется осенью, достигает пика интенсивности в середине зимы и затухает весной. Сила и устойчивость полярного вихря в зимне-весенний период играют важную роль в разрушении стратосферного озона с возвращением солнечной радиации в конце зимы. Разрушение полярного вихря в большинстве случаев происходит под воздействием вертикально распространяющихся планетарных волн Россби. Повышенная активность планетарных волн наблюдалась в 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг. и приводила к разрушению полярного вихря в середине зимы, после чего он не наблюдался более месяца. В работе [Zuev and Savelieva, 2019a] потеря арктического морского льда рассматривается как наибо-

лее вероятная причина повышенной активности планетарных волн, приведшей к необычному ослаблению арктического полярного вихря. Осенью 1984, 1998 и 2012 гг. площадь арктического морского льда была рекордно низкой в море Бофорта, на Канадском Арктическом архипелаге и в Центральной Арктике.

Сила стратосферного полярного вихря весной в значительной степени определяет продолжительность и интенсивность разрушения озонового слоя в полярных областях. Размер озоновой дыры в Антарктике обычно достигает максимума в сентябре, а затем снижается в октябре и ноябре. Однако в 1987, 1998, 1999, 2001, 2006, 2011 и особенно в 2015 г. в условиях сильного полярного вихря в октябре и ноябре наблюдалось значительное увеличение площади озоновой дыры по сравнению со средними климатическими значениями. Причем в эти годы оно происходило одновременно с повышением температуры в субтропической нижней стратосфере в южном полушарии. На основе данных реанализа ERA-Interim по температуре и зональному ветру авторы работы [Zuev and Savelieva, 2019b] выявили высокую корреляцию между межгодовыми вариациями субтропической температуры и зонального ветра на 60° S в октябре и ноябре (коэффициенты корреляции Пирсона r равны 0.71 и 0.82 соответственно). Таким образом, повышение температуры в субтропической нижней стратосфере в октябре–ноябре может способствовать усилению антарктического полярного вихря в этот период.

В работе [Shevchuk et al., 2020] описана динамическая (геометрическая) модель яркости серебристых облаков (СО), вызванных активностью гравитационных волн. Представлены зависимости яркости СО от параметров гравитационной волны. Также рассмотрены результаты решения обратной задачи. Показано, что относительные вариации яркости СО в основном зависят от амплитуды гравитационной волны, ее горизонтальной длины волны и невозмущенной толщины слоя СО. Также показано, что модель может быть использована для определения геометрической амплитуды возмущающей волны по распределению относительной яркости (обратная задача) и что неопределенность геометрической амплитуды волны определяется в основном неопределенностью толщины облачного слоя.

В работе [Лукьянов и др., 2021] представлено краткое описание и некоторые результаты применения траекторной и дисперсионной транспортных моделей, разработанных в ЦАО для исследования процессов переноса примесей в стратосфере и тропосфере. Траекторная модель TRACAO применялась для исследования озоноактивных процессов в зимней полярной стратосфере с целью изучения стратосферно-тропосферного обмена в средних широтах, а также для анализа данных баллонных и самолетных (М55 “Геофизика”, Як-42Д “Росгидромет”) наблюдений. Затем на основе траекторной модели была разработана дисперсионная модель GLADIM, которая рассчитывает траектории множества частиц с учетом турбулентной диффузии и позволяет определить концентрацию примеси в ячейках регулярной сетки. Дисперсионная модель была использована для моделирования распространения вулканического пепла и расчета вертикальных профилей диоксида углерода. Валидация модели осуществлялась путем сравнения с результатами другой широко применяемой модели FLEXPART. Модели используют в Региональном информационно-аналитическом центре “Средняя атмосфера”, созданном в Центральной аэрологической обсерватории.

В работе [Medvedev et al., 2019] представлен новый метод определения вектора скорости нейтрального ветра. В основе метода лежит измерение групповых скоростей внутренних гравитационных волн. Используя случай дисперсионного соотношения Буссинеска, авторы продемонстрировали возможность измерения вектора скорости нейтрального ветра по данным групповой скорости и волнового вектора. Предложен алгоритм получения вектора групповой скорости из спектра волнового вектора. Новый метод был протестирован путем сравнения полученной структуры зимнего ветра с данными о ветре из других источников. Тестирование нового метода показало, что он находится в количественном согласии с измерениями ветра с использованием интерферометра Фабри–Перо для зональных и вертикальных скоростей ветра. Здесь же обсуждаются различия в меридиональных скоростях ветра. Особый интерес представляют результаты, связанные с измерением вертикальных скоростей ветра. Авторы продемонстрировали, что два независимых метода показали наличие вертикальных скоростей ветра с амплитудой ~20 м/с. Оценка вклада вертикального ветра в скорость дрейфа плазмы показала важность измерений вертикального ветра и необходимость его учета в физических и эмпирических моделях ионосферы и термосферы.

В работе [Grigoriev et al., 2020] исследуется проблема возбуждения внутренних гравитационных волн (ВГВ) в верхней атмосфере внешним источником с ограниченной длительностью действия. В качестве среды распространения ВГВ была выбрана изотермическая атмосфера при наличии однородного ветра, изменяющегося со временем по гармоническому закону. Для вертикальной компоненты смещения среды решалось уравнение Матье с нулевыми начальными условиями, при этом правая часть моделировала воздействие мощной нагревательной установки на ионосферу. В случае малой амплитуды переменной составляющей ветра получена временная зависимость вертикального смещения в условиях параметрического резонанса с использованием

метода возмущений. Полученная зависимость решения дифференциального уравнения от параметров позволяет провести численный анализ задачи в случае переменного ветра произвольной амплитуды. Для практических оценок полученных величин использованы данные о режимах работы нагревательной установки SURA (56.15° N, 46.11° E) с периодическими (15–30 мин) включениями в течение 2–3 ч для воздействия на ионосферу.

Южное колебание Эль-Ниньо (ENSO) вызывает выброс большого количества тепла и влаги в тропическую атмосферу, что приводит к аномалиям циркуляции. Отклик циркуляции на ENSO распространяется как горизонтально в направлении полюсов, так и вертикально в стратосферу. В работе [Kolennikova and Gushchina, 2022] авторы исследуют удаленный отклик полярной стратосферы на ENSO, используя данные реанализа, а также композитный и регрессионный анализ. В частности, они рассматривают изменчивость, обусловленную двумя типами ENSO (восточно-тихоокеанским (ВТ) и центрально-тихоокеанским (ЦТ) Эль-Ниньо), и различия откликов ENSO между полушариями. В соответствии с предыдущими результатами авторы показывают, что ENSO связано с ослаблением стратосферного полярного вихря, но подчеркивают, что отклик полярной стратосферы сильно зависит от типов ENSO, различается между полушариями и изменяется от нижней к средней стратосфере. Основная асимметрия между полушариями проявляется в отклике на ВТ Эль-Ниньо, который в Южном полушарии незначителен, в то время как события ЦТ связаны с выраженным ослаблением полярного вихря в обоих полушариях. Ослабление стратосферного полярного вихря, возможно, является результатом интенсификации волнового потока из тропосферы в стратосферу и сопровождается усилением переноса тепла. Последний вызывает стратосферное потепление в Арктике и Антарктике и замедляет зональные течения. Реакция циркуляции нижней стратосферы на ENSO примерно противоположна реакции средней стратосферы.

В работе [Коленникова и др., 2021] исследован отклик стратосферы Арктики на климатическое явление Эль-Ниньо с учетом его восточно- и центрально-тихоокеанского типов за период 1950–2005 гг. на основе регрессионного и композитного анализа с использованием расчетов шести совместных климатических моделей проекта CMIP5 и данных реанализа.

Зимний сезон 2021–2022 гг. в арктической стратосфере до начала минорных внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в конце февраля – начале марта и мажорного ВСП 20 марта характеризовался устойчивым холодным стратосферным полярным вихрем с объемом полярных стратосферных облаков (ПСО), близким к максимальным значениям с 1980 г. В работе [Vargin et al., 2022б] анализ динамических процессов арктической стратосферы по данным реанализа показывает, что основными причинами усиления стратосферного полярного вихря в январе-феврале являются минимальное за последние 40 лет распространение планетарной волновой активности из тропосферы в стратосферу и ее отражение в верхней стратосфере-нижней мезосфере во второй половине января. Первое минорное ВСП было ограничено верхней полярной стратосферой, тогда как второе распространилось на среднюю и нижнюю стратосферу и привело к исчезновению ПСО, что предотвратило значительное разрушение озона. Как минорные, так и мажорные ВСП привели к ослаблению остаточной меридиональной циркуляции в верхней арктической стратосфере и ее усилению в средней и нижней стратосфере, что способствовало дополнительному прогреву приполярной области и ослаблению полярного вихря.

Поведение планетарных волн и их влияние на глобальную циркуляцию Северного полушария во время различных типов Эль-Ниньо изучено в работе [Ermakova et al., 2022]. Для каждого типа Эль-Ниньо были выбраны три набора из пяти бореальных зим: Модоки I и II и канонический тип Эль-Ниньо. На основе данных японского 55-летнего реанализа и ретроспективного анализа Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications проведен анализ пространственно-временной структуры планетарных волн и остаточной средней циркуляции. Полученные результаты показывают, что канонический тип Эль-Ниньо характеризуется наиболее слабой волновой активностью в марте. Также показано, что потепление полярной стратосферы, сопровождающееся максимизацией волновой активности и ослаблением зонального ветра, может приводить к более раннему разрушению стратосферного полярного вихря и раннему весеннему переходу в условиях Модоки I. Данное исследование является очередным шагом в понимании так называемых дальних телеконнекций, заключающихся в распространении сигнала от тропического источника Южного колебания Эль-Ниньо в полярную стратосферу.

В работе [Кандиева и др., 2019] для исследования влияния осцилляции Маддена–Джулиана и квазидвухлетнего колебания в экваториальной стратосфере на динамические процессы во внетропической стратосфере использована модель циркуляции средней и верхней атмосферы. Источник нагрева осцилляции Маддена–Джулиана в тропической области задавался в виде модулированного по долготе волнового возмущения с зональным волновым числом $m = 2$ и периодом $T = 45$ сут, перемещающегося на восток с фазовой скоростью ~5 м/с. Ансамблевые расчеты проводились раздельно для западной и восточной фаз квазидвухлетнего колебания. Анализ полученных результатов показал, что оба явления существенно влияют на циркуляцию зимней внетропиче-

ской стратосферы, разрушение полярного вихря и внезапные стратосферные потепления, причем характер влияния зависит от сочетания их фаз. Хорошая согласованность результатов моделирования с данными реанализа подтверждает полученные результаты.

Устойчивость стратосферного полярного вихря в зимне-весенний период является одним из ключевых факторов, определяющих продолжительность и масштабы разрушения стратосферного озона в полярной области. Максимум скорости арктического полярного вихря наблюдается зимой, а антарктический вихрь, как правило, усиливается в начале весны. В результате над Антарктикой ежегодно с августа по ноябрь наблюдается масштабное разрушение озона, а над Арктикой с января по март - лишь небольшие эпизодические аномалии. В работе [Зуев и др., 2020] рассмотрена причина высокой силы и устойчивости антарктического полярного вихря в зимне-весенний период. На основе данных реанализа ERA-Interim показана высокая согласованность между внутригодовыми изменениями температуры нижней субтропической стратосферы и скорости зонального ветра в субполярной и полярной нижней стратосфере в Южном полушарии. Результаты численного моделирования с использованием модели PlaSim-ICMMG-1.0 демонстрируют усиление зонального ветра в субполярной области при повышении температуры субтропической стратосферы. Показано, что зимне-весеннее усиление антарктического полярного вихря происходит благодаря увеличению стратосферного меридионального температурного градиента в результате сезонного повышения температуры нижней субтропической стратосферы в этот период.

В работе [Зуев и др., 2022б] рассмотрены особенности ослабления стратосферного полярного вихря, предшествующие его разрушению. Для анализа аномальной динамики полярных вихрей использовался метод оценки основных параметров вихря при оконтуривании его границ с помощью значений геопотенциала, определенных по максимальному градиенту температуры и максимальной скорости ветра по данным реанализа ERA5. Показано, что критерии аномального ослабления полярного вихря, предшествующего его разрушению, – это сокращение площади вихря до значений <10 млн км^2 и последующее уменьшение средней скорости ветра по границе вихря до значений <30 и 45 м/с в нижней и средней стратосфере соответственно. В этом случае полярный вихрь становится небольшим циклоном (характеризующимся высокими температурами и отсутствием динамического барьера) и разрушается в пределах трех недель.

В работе [Варгин и Кирюшов, 2019] проанализированы динамические процессы в стратосфере над Арктикой в зимний сезон 2017/18 г. с использованием данных реанализа NCEP и результатов измерений с помощью спутниковых приборов SABER и MLS. Выявлены следующие особенности: отражение потоков волновой активности из стратосферы в тропосферу над Канадой в конце декабря 2017 г. и в начале января 2018 г., главное внезапное стратосферное потепление в феврале 2018 г. с изменением направления зонального ветра, с разделением стратосферного полярного вихря, с распространением аномалий циркуляции стратосферы до нижней тропосферы, с похолоданием в мезосфере, с изменением высоты стратопаузы и со снижением температуры нижней стратосферы в тропиках.

В работе [Варгин и др., 2020а] проанализированы основные динамические процессы в стратосфере Арктики в зимний сезон 2018/2019 г. и их влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой с использованием данных реанализа NCEP и спутниковых наблюдений MLS. По результатам расчетов по траекторной модели TRACAO проведен сравнительный анализ эволюции стратосферного полярного вихря в зимние сезоны 2015/2016 и 2018/2019 гг.

В работе [Курдяева и др., 2022] представлены результаты численного исследования процессов распространения в термосферу внутренних гравитационных волн, возбуждаемых тепловыми источниками в тропосфере. Результаты численных экспериментов показали, что термосферные возмущения от таких источников возникают через ~30 мин после начала их действия. Причиной появления быстрой реакции термосферы являются инфразвуковые волны, возбуждаемые при генерации внутренних гравитационных волн. Показано, что термосферный ветер существенно влияет на пространственно-временну́ю структуру волновых возмущений в верхней атмосфере. Это влияние проявляется в повышении амплитуд и уменьшении пространственных масштабов волн, распространяющихся против термосферного ветра. Для волн, распространяющихся в направлении термосферного ветра, отмечается понижение амплитуд и увеличение пространственных масштабов.

В работе [Gavrilov et al., 2022] проведено численное моделирование с высоким разрешением нестационарных нелинейных акустико-гравитационных волн (АГВ), распространяющихся вверх от волнового источника на земной поверхности, для различных временных интервалов относительно времени активации и деактивации волнового воздействия. После включения источников волн на поверхности амплитуды спектральных компонент АГВ достигают квазистационарного состояния. Затем в численной модели происходит отключение поверхностного волнового воздействия, и амплитуды вертикально перемещающихся мод АГВ быстро уменьшаются на всех высотах из-за

прекращения восходящего распространения волновой энергии от источников волн. Однако в дальнейшем стандартное отклонение остаточных и вторичных волновых возмущений испытывает более медленное квазиэкспоненциальное уменьшение. Моделирование с высоким разрешением впервые позволило оценить времена затухания этого волнового шума, создаваемого медленными остаточными, квазистационарными и вторичными спектральными компонентами АГВ, которые в зависимости от высоты и скорости активации и деактивации волновых источников изменяются от 20 до 100 ч. Стандартные отклонения волнового шума больше для случая резкой активации и деактивации волнового форсинга по сравнению с крутыми процессами. Полученные результаты показывают, что переходные волновые источники могут создавать долгоживущие волновые возмущения, которые могут формировать фоновый уровень волнового шума в атмосфере. Это следует учитывать при параметризации атмосферных воздействий АГВ.

Большое количество крупномасштабных динамических явлений в атмосфере Земли связано с процессами распространения и обрушения (опрокидывания) волн Россби. В работе [Гочаков и др., 2021] предлагается новый метод идентификации опрокидываний волн Россби. Метод основан на определении центров опрокидываний на основе исследования геометрии контуров потенциальной завихренности или температуры на квазиматериальных поверхностях – изэнтропических и изэртелических (поверхностях постоянной потенциальной завихренности – PV) и дальнейшей кластеризации центров опрокидываний в крупные регионы. В данной работе метод реализован для уровней PV от 0.3 до 9.8 PVU с шагом 0.5 PVU на поверхности потенциальной температуры 350 K для 12 ч ВСВ. Основой для разработки метода послужили данные реанализа ERA-Interim с 1979 по 2019 г. На основе анализа геометрии вихря для каждого уровня PV для каждого дня определяется тип опрокидывания – циклонический или антициклонический, а также площадь и центр опрокидывания. Для первичных опрокидываний, полученных на данном этапе за каждый месяц, применяется алгоритм кластеризации DBSCAN (Density-based Spatial Clustering of Applications with Noise). В результате сформирован архив графической информации, содержащий сведения об основных областях опрокидывания и их динамике в течение каждого месяца в период 1979–2019 гг. Также рассчитаны повторяемости опрокидываний волн Россби для каждой долготы, учитывающие длительность опрокидываний и число уровней, формирующих каждое опрокидывание, а также аномалии этих величин.

4. Влияние солнечной активности

В работе [Гинзбург и др., 2020] представлены результаты сравнительного анализа потоков и спектров солнечных протонов, измеренных в сентябре 2017 г. на ИСЗ, имеющих разные орбиты, ЭЛЕКТРО-Л № 2, GOES 13 и МЕТЕОР-3 № 2, а также результатов моделирования скорости ионизации в полярной атмосфере на основе данных указанных экспериментов. Установлено, что спектры протонов по данным российских и американского космических аппаратов достаточно близки друг к другу и имеют экспоненциальный характер. Проведенные расчеты скорости ионизации полярной атмосферы по данным трех указанных экспериментов показали близкие результаты, за исключением малых высот

В работе [Кириллов и др., 2021] на основании моделей электронной кинетики триплетных состояний молекулярного азота и синглетных состояний молекулярного кислорода для средней атмосферы Земли проведен расчет профилей интенсивностей полос первой и второй положительных систем N_2, Инфракрасной Атмосферной и Атмосферной систем O_2 в случае высыпания в атмосферу Земли высокоэнергичных протонов во время события GLE № 69 от 20 января 2005 г. Расчеты показали, что практически на всем рассматриваемом интервале высот 20–80 км имеется значительный вклад процессов гашения состояния $B^3\Pi_g$ при молекулярных столкновениях. Кинетика синглетных состояний O_2 на высотах средней атмосферы во время высыпания протонов рассмотрены как с учетом прямого возбуждения высокоэнергичными частицами, так и с учетом межмолекулярных процессов переноса электронного возбуждения. Показано, что процессы гашения состояния $b^1\Sigma_g^+$ во время неупругих молекулярных столкновений приводят к значительному понижению интенсивностей полос Атмосферной системы на высотах средней атмосферы.

В работе [Коршунов и Зубачев, 2022б] для выявления влияния факторов солнечной активности на стратосферный аэрозоль проведен анализ лидарных наблюдений на длинах волн 532 и 355 нм, выполненных в г. Обнинск (55° N) с 2014–2018 гг. в слое 13–23 км. В период 2016–2018 гг. обнаружено уменьшение обратного аэрозольного рассеяния на величину примерно в несколько процентов в интервале от 0 до 2 дней после начала Форбуш-понижений потока галактических космических лучей. В 2014–2017 гг. после солнечно-протонных событий с задержкой в 3–8 дней следует увеличение обратного аэрозольного рассеяния в пределах 20–70%. Показано, что этот эффект наблюдается, преимущественно, при переносе стратосферного воздуха в точку наблюдения из области высоких широт.

Недавние исследования позволили прояснить важную роль стратосферного полярного вихря в

физическом механизме воздействия солнечной активности на циркуляцию нижней атмосферы. Полученные результаты показывают, что временная изменчивость, наблюдаемая в солнечно-атмосферных связях на мультидекадной временной шкале, может быть вызвана вариациями состояния вихря. В работах [Veretenenko and Ogurtsov, 2019a, 2019б; Veretenenko, 2022a] проведено сравнение временного хода коэффициентов корреляции между давлением в нижней атмосфере во внетропических широтах и числами солнечных пятен с эволюцией форм крупномасштабной циркуляции по классификации Вангенгейма-Гирса, а также с изменениями характеристик стратосферного полярного вихря. Обнаружено, что эффекты солнечной активности и потоков галактических космических лучей (СА/ГКЛ) в вариациях давления тропосферы (развитии внетропических барических систем) характеризуются примерно 60-летней периодичностью, которая тесно связана с изменениями режима крупномасштабной циркуляции атмосферы и переходами между различными состояниями полярного вихря. Предположено, что характер эффектов СА/ГКЛ зависит от интенсивности полярного вихря, влияющей на взаимодействие тропосферы и стратосферы посредством планетарных волн. Полученные результаты свидетельствуют о том, что стратосферный полярный вихрь является важным связующим звеном между циркуляцией нижней атмосферы и солнечной активностью, при этом переходы между различными состояниями вихря являются причиной обращения знака корреляции между характеристиками атмосферы (давлением, облачностью) и солнечной активностью на мультидекадной временной шкале. В свою очередь, расположение вихря благоприятно для воздействия изменений скорости ионизации, связанных с вариациями потоков энергичных заряженных частиц (космических лучей, авроральных электронов и электронов радиационного пояса), которые влияют на химический состав и температурный режим полярной атмосферы, а также на ее электрические характеристики и состояние облачности. В работах [Veretenenko and Ogurtsov, 2020; Veretenenko, 2021a, 2021b, 2022b] представлены результаты, свидетельствующие о влиянии солнечной активности на состояние стратосферного полярного вихря на различных временных шкалах.

В январе 2005 г. произошла серия мощных солнечных протонных событий (СПС), обусловленных усилением вспышечной активности на Солнце, что привело к значительному увеличению скорости ионизации в полярной атмосфере. В работах [Veretenenko and Ogurtsov, 2020; Veretenenko, 2021a] исследовалось влияние этих событий на циркуляцию средней атмосферы северного полушария на основе среднесуточных значений скорости зонального ветра на разных уровнях стратосферы, взятых из архива реанализа NCEP-DOE (R-2). В ходе исследуемых СПС выявлено заметное увеличение скорости западного ветра в широтном поясе 60–80° N на всех исследуемых уровнях. Обнаруженные эффекты свидетельствуют об интенсификации стратосферного полярного вихря, играющего важную роль в механизме солнечно-атмосферных связей. Показано, что изменения скорости ионизации, связанные с мощными СПС и, возможно, авроральными явлениями, могут влиять на состояние стратосферного полярного вихря на временных масштабах порядка нескольких суток. Возможной причиной усиления полярного вихря являются вариации температуры, которые могут быть связаны с изменениями химического состава полярной атмосферы, вызванными усилением ионизации, а также с радиационным форсингом изменений состояния облачности.

В работе [Veretenenko, 2021b] обнаружено, что во время мощных СПС в январе 2005 и декабре 2006 г., сопровождавшихся увеличением потока частиц с энергиями более нескольких сотен МэВ, происходило заметное усиление зонального западного потока в области формирования полярного вихря (50°–75° N) на всех уровнях стратосферы северного полушария. Исследование эффектов СПС с энергией частиц >100 МэВ, произошедших в 23-м солнечном цикле (1996–2008 гг.), показало, что интенсификация полярного вихря в ходе этих событий наблюдается преимущественно при западной фазе квазидвухлетних колебаний атмосферы. Показано, что увеличение скорости западного ветра на разных уровнях стратосферы в наибольшей степени коррелирует с изменением скорости ионизации на высотах ~50 км. Полученные результаты позволяют предположить, что обнаруженная интенсификация стратосферного полярного вихря обусловлена изменениями радиационно-теплового баланса полярной атмосферы, которые связаны с изменением ее химического состава.

Влияние СПС января 2005 г. на стратосферную циркуляцию в южном полушарии изучалось в работе [Veretenenko, 2022б] с использованием данных реанализа NCEP-DOE (R-2). Обнаружено, что в ходе рассматриваемых событий в верхней стратосфере (30–10 гПа), где в летний сезон (декабрь-февраль) доминирует восточный перенос воздушных масс, имело место заметное ослабление восточных ветров на средних и высоких широтах (>40° S) и усиление на более низких широтах. В нижней стратосфере (100–50 гПа) ослабление восточных ветров происходило только в полярной области (>60° S). Проведено сравнение эффектов СПС января 2005 г. в циркуляции северного и южного полушарий. Показано, что в северном (зимнем) полушарии эффекты СПС января 2005 г. в вариациях скорости зонального ветра выражены сильнее, чем в южном (летнем) полушарии. Предположено, что

возмущения циркуляции, обнаруженные в обоих полушариях в ходе СПС, могут быть вызваны изменениями температурного режима полярной атмосферы из-за изменения ее химического состава (разрушения озона) в связи со значительным увеличением скорости ионизации.

Результаты работ [Veretenenko and Ogurtsov, 2020; Veretenenko, 2022a] показывают, что, наряду с изменениями скорости ионизации за счет вариаций космических лучей, возможной причиной изменений интенсивности стратосферного полярного вихря на мультидекадной временной шкале является геомагнитная активность и связанные с ней высыпания авроральных электронов. Обнаружено значительное усиление вихря в период повышенной повторяемости магнитных бурь с постепенным началом (~1980–2000 гг.) и ослабление в период снижения повторяемости этих бурь (~1950–1980 гг.). Примерно 60-летняя вариация интенсивности полярного вихря может быть связана также с долговременными изменениями интегральной солнечной радиации (TSI). В работах [Veretenenko and Ogurtsov, 2019a, 2019б] выявлены доминирующие гармоники с периодами ~80 и ~60 лет в вариациях TSI согласно усовершенствованной реконструкции Хойта-Шаттена. Установлено, что при увеличении потоков TSI в периоды ~1920–1950 и ~1980–2000 гг. имело место усиление полярного вихря, что позволяет рассматривать вариации солнечного излучения как один из возможных факторов изменений состояния полярного вихря на мультидекадной временной шкале.

В работах Коваля и соавторов [Коваль, 2019; Koval et al., 2022] исследовалось влияние изменений солнечной активности на амплитуды долгопериодных планетарных волн. В работе [Коваль, 2019] для зимнего периода в северном полушарии с помощью численного моделирования изучается влияние изменений в термосфере, обусловленных уровнем солнечной активности (СА), на амплитуды долгопериодных планетарных волн (ПВ). Используется модель средней и верхней атмосферы (МСВА), позволяющая производить расчеты на высотах 0–300 км. Изменения СА в радиационном блоке МСВА задаются различными значениями потока солнечного излучения на длине волны 10.7 см для высот более 100 км. Для учета влияния заряженных частиц в ионосфере на динамику нейтрального газа в МСВА включены ионосферные проводимости для различных уровней СА. Для повышения статистической достоверности результатов получены два ансамбля расчетов, состоящие из 16 модельных прогонов каждый и соответствующие минимуму и максимуму СА. Проведен расчет статистической значимости средних разностей амплитуд ПВ при высокой и низкой СА. Показано, что полученные результаты достоверны почти во всем диапазоне высот 0–300 км. Моделирование впервые показало, что в средней атмосфере северного полушария статистически достоверные различия амплитуд долгопериодных ПВ могут составлять 10–15% в зависимости от зонального волнового числа ПВ. При этом существенное влияние на распространение ПВ в средней атмосфере оказывает отражение волн на высотах нижней термосферы.

В работе [Koval et al., 2022] проведено численное моделирование общей атмосферной циркуляции для оценки изменения амплитуд перемещающихся в западном направлении планетарных волн (ПВ) на высотах от поверхности Земли до 300 км при различных уровнях солнечной активности (СА). Использовалась трехмерная нелинейная механистическая модель циркуляции средней и верхней атмосферы МСВА. Общая циркуляция атмосферы и амплитуды ПВ рассчитывались на основе ансамблей, содержащих 16 прогонов моделей для условий, соответствующих низкой и высокой СА. Рассматривались ПВ с периодами от 4 до 10 дней. Сравнение с данными цифровых ионозондов показало, что модель МСВА способна воспроизводить рассматриваемые моды ПВ на высотах термосферы. Показано, что в условиях высокой СА амплитуды ПВ значительно больше в термосфере и меньше в средней атмосфере. На наблюдаемые структуры ПВ влияют не только изменения атмосферного показателя преломления и потока Элиассена-Палма, но также и изменение отражения ПВ в нижней термосфере, что может изменить пропорции волновой энергии, передаваемой из нижних слоев атмосферы в верхние слои, и отражаемой вниз.

В работе [Gavrilov et al., 2020] численное моделирование с высоким разрешением нелинейных акустико-гравитационных волн (АГВ), генерируемых на поверхности Земли и распространяющихся в термосфере, показывает, что характеристики волн зависят от изменений средней плотности, температуры, молекулярной диссипации и состава, обусловленных вариациями солнечной активности (СА). Амплитуды температурных волновых возмущений, как правило, больше при высокой СА на высотах более 150 км, что связано с большей средней температурой и меньшей молекулярной теплопроводностью. Увеличение кинематических коэффициентов молекулярной теплопроводности и вязкости приводит к более сильному уменьшению амплитуд АГВ на высотах более 150 км при низкой СА. Диссипирующие АГВ обычно вызывают нагрев на высотах менее 120 км. На больших высотах АГВ, как правило, нагревают термосферу при низкой СА и охлаждают ее при высокой СА. Волновые потоки энтальпии направлены в основном вверх на высотах ниже 120 км и вниз на высотах более 150 км, где они могут иметь направления, противоположные восходящим волновым потокам энергии. Направленные вниз волновые потоки энтальпии соответствуют АГВ-охлаждению верхней атмосферы при высокой СА. Не-

линейные диссипирующие АГВ могут создавать восходящий и нисходящий перенос массы в атмосфере. Эти потоки массы могут производить адиабатические притоки тепла в верхней атмосфере. В основном положительные остаточные потоки массы, наведенные волнами на высотах более 150 км могут способствовать волновому охлаждению верхней атмосферы. Разрушение волн и взаимодействие между волнами и средним потоком в нелинейной модели сильнее при больших амплитудах возбуждения АГВ у земли, что приводит к большим потерям энергии для волн с большой амплитудой. При высоких СА результирующие эффекты в термосфере зависят от баланса между, с одной стороны, увеличением амплитуд волн, вызванным ослаблением молекулярной диссипации и меньшим переходом энергии волн к индуцированным струйным потокам, и, с другой стороны, уменьшением амплитуд из-за большей плотности и большего отражения АГВ. Тепловые эффекты волн в верхней атмосфере могут зависеть от конкуренции между нагреванием из-за диссипации восходящего волнового потока энергии и охлаждением из-за дивергенции нисходящего волнового потока энтропии (или потенциальной энтальпии) нисходящей волны. При высокой СА большие средние температуры и большие возмущения температуры могут увеличивать величины нисходящих потоков энтропии, что может приводить к более частым нисходящим волновым потокам энтальпии и охлаждению волнами верхней атмосферы.

За прошедшие годы, с 2019 по 2022 г., достигнут определенный прогресс в оценке роли воздействия высыпаний энергичных частиц (ВЭЧ) на состояние средней атмосферы. Правильная оценка производства ионов и спектров для расчета скоростей ионизации является важным вопросом для оценки атмосферных и климатических сил. Серия работ Мироновой и соавторов в 2019–2022 гг. была посвящена исследованию спектров и скоростей ионизации, вызванных высыпаниями энергичных электронов (ВЭЭ). В работах [Mironova et al., 2019a, 2019b] изучена изменчивость скорости ионизации над Мурманской областьюв 1961–2019 гг. с помощью аэростатных наблюдений вторичного тормозного излучения, инициированного ВЭЭ. Скорости ионизации в атмосфере, вызванные высыпаниями энергичных электронов в результате наблюдений с аэростата в полярной атмосфере, сравниваются со скоростями ионизации, рекомендованными для Phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Project [Mironova et al., 2019a]. В качестве основных результатов показано, что моделирование с использованием одномерной радиационно-конвективной модели с интерактивными нейтральной и ионной химией демонстрирует различие скоростей ионизации, восстановленных на основе баллонных наблюдений и в рамках форсинга предложенного для Phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Project, что может привести к недооценке NO_x более чем на 100% и привести к потере озона до 25% в мезосфере. В статье [Mironova et al., 2021a] предлагается современный метод расчета скоростей ионизации с использованием новой параметризации образования ионов и новой формы спектра, которые позволяют учитывать диапазон высыпающихся частиц от десятков кэВ до нескольких МэВ. Справочные таблицы с функцией отклика атмосферы на высыпания частиц для изотропно высыпающихся моноэнергетических электронов можно легко использовать для расчета скоростей ионизации, а также их можно использовать в моделях атмосферы и химико-климатических моделей для точной количественной оценки параметров атмосферы во время ВЭЭ.

Существует много исследований, в которых широко изучался вклад энергичных частиц во время солнечных протонных событий в образование радикалов оксида водорода и потерю озона. Однако не было убедительных доказательств того, что уменьшение потоков галактических космических лучей во время магнитной бури, известное как эффект Форбуша, прямо и заметно влияет на химический состав стратосферы полярной ночи. В статье [Mironova et al., 2021b] авторы исследовали влияние снижения потока галактических космических лучей во время Форбуш-понижений на поведение радикалов оксида водорода с использованием трехмерной химико-климатической модели SOCOLv2 (SOlar Climate Ozone Links). Было обнаружено, что радикал оксида водорода способен терять около половины своей концентрации над полярно-бореальной ночной стратосферой из-за снижения скоростей ионизации, вызванных Форбуш-понижениями после солнечных протонных событий. Несмотря на вышеприведенные выводы указано, что устойчивый отклик в озоне не обнаружен.

В работах [Karagodin et al., 2019, 2022] исследовался ионосферный потенциал, а также гипотеза о том, что флуктуация межпланетного магнитного поля (ММП) может модулировать глобальную электрическую цепь атмосферы (ГЭЦ) над полярными регионами и влиять на приземную метеорологию (эта гипотеза была названа эффектом Мансурова). Данный эффект был исследован с помощью химико-климатических моделей. Исследование эффекта Мансурова за период 1999–2002 гг. с использованием ансамблевых экспериментов, смоделировали их с помощью химико-климатической модели SOCOLv3, было проведено в работе [Karagodin et al., 2022]. Используя наблюдаемые вариации B_y компоненты ММП, авторы смоделировалиих влияние на давление и температуру воздуха на уровне земли, чтобы проверить одну из предложенных гипотез ГЭЦ–облака, согласно которой реакция приземной метеорологии на флукту-

ации ММП B_y происходит через J_z-ассоциированное усиление скорости слияния облачных капель. Результаты показали, что аномалии приземного давления и температуры воздуха в контрольном прогоне, где ММП B_y опущены, не сильно отличаются от экспериментов, в которые включена зависимость скорости слияния облачных капель от ММП B_y. Гипотеза, названная эффектом Мансурова, на данный момент, не имеет модельных подтверждений.

Исключительно сильное высыпание высокоэнергичных электронов, со скоростями ионизации, локально сравнимыми с сильными солнечными протонными выбросами, было обнаружено с помощью аэростатных измерений в геомагнитных средних широтах и изучено в работе [Mironova et al., 2022]. Это высыпание электронов, возможно, было вызвано взаимодействиями волн и частиц в щелевой области между внутренним и внешним радиационными поясами, связанными с еще малоизученными природными явлениями в магнитосфере. Спутниковые наблюдения нечетного азота и азотной кислоты согласуются с широко распространенными высыпаниями электронов в средних магнитных широтах, а моделирование с помощью трехмерной химико-климатической модели HAMMONIA указывает на почти полное разрушение озона (до 90%) в верхней мезосфере над регионом, где произошли высыпания высокоэнергичных электронов.

В работе [Pikulina et al., 2022] авторы изучали реакцию средней атмосферы на повышенное излучение от нескольких мощных солнечных вспышек X-класса в сентябре 2017 г. Обе вспышки вызвали увеличение солнечной радиации в экстремальной ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областях спектра, а также в линии Ly-α. Для получения данных о потоках излучения от солнечных вспышек использовалась эмпирическая модель FISM2. Для анализа влияния радиации на нейтральную атмосферу использовалась химико-климатическая модель HAMMONIA. Показано значительное увеличение концентраций реакционноспособных оксидов азота и водорода в экваториальных широтах и южных высоких широтах. Это увеличение не повлияло на изменение содержания озона в тропической стратосфере, так как разрушение озона оксидами азота в верхней мезосфере неэффективно и отсутствуют устойчивые нисходящие движения, которые могут выносить лишние NO_x вниз в стратосферу. Оксиды водорода не оказывают существенного влияния на озон в течение рассматриваемых сезонов, однако в южном полушарии моделируется некоторое небольшое истощение озона, коррелированное с увеличением HO_x.

В статье [Grankin et al., 2023] авторы оценили разрушение озона во время событий ВЭЭ с использованием одномерных фотохимических радиационно-конвективных моделей, принимая во внимание как параметризацию, так и ионную химию, а также предоставили оценку электронной плотности в эти периоды. Показано, что во время геомагнитных возмущений, характеризуемых индексом Kp ~ 4, происходит увеличение концентрации реактивных оксидов азота и водорода, относительно спокойных условий, достигая значительных значений для интенсивных событий ВЭЭ. Увеличение концентрации радикалов приводит к разрушению озона на высотах мезосферы в течение суток с максимальным разрушением около 14–25% на высоте около 75 км для интенсивных явлений. Эффекты, полученные для событий средней интенсивности, зависят от метода учета ионной химии.

Увеличение концентрации оксида азота в атмосфере на высотах 64–90 км во время ВЭЭ в период 2002–2012 гг. оценено в работе [Махмутов и др., 2021] из измерений спектрометром SCIAMACHY, установленным на борту европейского спутника ENVISAT.

В монографии [Криволуцкий и др., 2021б], наряду с описанием трехмерной глобальной численной фотохимической модели ЦАО CHARM, приводятся результаты модельных расчетов, иллюстрирующих воздействие протонных вспышек на Солнце на состав средней атмосферы в 23-м цикле активности Солнца.

ВЫВОДЫ

Обзор публикаций по исследованиям средней атмосферы российскими учеными в 2019–2022 гг. показал широкий диапазон направлений, которые привели к достаточно важным результатам в разных областях изучения средней атмосферы. Основные результаты вошли в Национальный отчет по метеорологии и атмосферным наукам, который был представлен на XXVIII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (Берлин, Германия, 2023 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баженов О.Е. Озоновая аномалия зимой-весной 2019–2020 гг. в Арктике и над севером Евразии по данным спутниковых (AuraMLS/OMI) наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 7. С. 524–529. https://doi.org/10.15372/AOO20210706

Баженов О.Е. Озоновые аномалии в стратосфере Арктики и Северной Евразии: сравнение явлений 2011 и 2020 гг. по данным TEMIS и AuraMLS // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 5. С. 390–396. https://doi.org/10.15372/AOO20220507

Баженов О.Е., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Долгий С.И., Макеев А.П. Возмущение стратосферы над Томском зимой 2017/2018 гг. по данным лидарных и спутниковых (AuraMLS/OMI) наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 7.

С. 509–515.
https://doi.org/10.15372/AOO20200702

Варгин П.Н., Кирюшов Б.М. Внезапное стратосферное потепление в Арктике в феврале 2018 г. и его влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 41–56.

Варгин П.Н., Коленникова М.А., Кострыкин С.В., Володин Е.М. Влияние аномалий температуры поверхности экваториальной и северной частей Тихого океана на стратосферу над Арктикой по расчетам климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 5–16.

*Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М.*Динамические процессы в стратосфере Арктики в зимний сезон 2018/19 г // Метеорология и гидрология. 2020а. № 6. С. 5–18.

Варгин П.Н., Никифорова М.П., Звягинцев А.М. Изменчивость антарктической озоновой аномалии в 2011–2018 гг. // Метеорология и гидрология. 2020б. № 2. С. 20–34.

Габис И.П. Квазидвухлетние осцилляции зонального ветра в экваториальной стратосфере и их влияние на межгодовые изменения мощности озоновой дыры в Антарктике // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 5–15.

Герасимов В.В., Зуев В.В., Савельева Е.С. Следы канадских пирокумулятивных облаков в стратосфере над Томском в июне–июле 1991 г // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 3. № 1. С. 39–46.
https://doi.org/10.15372/AOO20190106

Гинзбург Е.А., Криволуцкий А.А., Куколева А.А., Мягкова И.Н. Расчет скорости ионизации в атмосфере в полярной области во время солнечных протонных событий // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 5. С. 600–607.

Гочаков А.В., Антохина О.Ю., Крупчатников В.Н., Мартынова Ю.В. Метод идентификации и объединения в кластеры событий обрушения волн Россби в Северном полушарии // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 17–28.

Данилов А.Д., Бербенева Н.А. Некоторые прикладные аспекты изучения трендов в верхней и средней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61. № 4. С. 520–531.

Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 4. С. 411–435.

Зуев В.В., Боровко И.В., Крупчатников В.Н., Савельева Е.С. Влияние температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 5. С. 415–418.
https://doi.org/10.15372/AOO20200512

Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С., Короткова Е.М., Павлинский А.В. Роль крупных вулканических извержений в разрушении стратосферного озона и деградации хвойных лесов // Оптика атмосферы и океана. 2022а. Т. 35. № 2. С. 150–154.
https://doi.org/10.15372/AOO20220210

Зуев В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В. Особенности ослабления стратосферного полярного вихря, предшествующие его разрушению // Оптика атмосферы и океана. 2022б. Т. 35. № 1. С. 81–83.
https://doi.org/10.15372/AOO20220112

Кандиева К.К., Анискина О.Г., Погорельцев А.И., Зоркальцева О.С., Мордвинов В.И. Влияние осцилляции Маддена–Джулиана и квазидвухлетнего колебания на динамику внетропической стратосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 1. С. 114–124.
https://doi.org/10.1134/S0016794018060068

Кашкин В.Б., Одинцов Р.В., Рублева Т.В. О влиянии ядерного взрыва на стратосферный озон // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 3. С. 212–216.
https://doi.org/10.15372/AOO20220306

Кириллов А.С., Белаховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Свечение молекулярного азота и молекулярного кислорода в средней атмосфере Земли во время высыпания высокоэнергичных протонов // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 60. № 6. С.769–776.

Коваль А.В. Статистически значимые оценки влияния солнечной активности на планетарные волны в средней атмосфере северного полушария по данным модели МСВА// Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 4. С. 64–72.

Коленникова М.А., Варгин П.Н., Гущина Д.Ю. Влияние Эль-Ниньо на стратосферу Арктики по данным моделей CMIP5 и реанализа // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 5–23.
https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-6-5-23

Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Увеличение обратного аэрозольного рассеяния в нижней мезосфере в 2019–2021 гг. и его влияние на измерения температуры рэлеевским методом // Оптика атмосферы и океана. 2022а. Т. 35. № 1. С. 32–36.
https://doi.org/10.15372/AOO20220105

Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Проявление эффектов солнечной активности в лидарных наблюдениях стратосферного аэрозоля // Геомагнетизм и аэрономия. 2022б. Т. 62. № 1. С. 67–74.

Коршунов В.А., Мерзляков Е.Г., Юдаков А.А. Наблюдения метеорного аэрозоля в верхней стратосфере – нижней мезосфере методом двухволнового лидарного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 10. С. 805–814.
https://doi.org/10.15372/AOO20181006

Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Банин М.В., Репнев А.И., Куколева А.А. Численные глобальные модели ионосферы, озоносферы, температурного режима и циркуляции для высот 0–130 км. Результаты и перспективы // Метеорология и гидрология. 2021а. № 9. С. 56–69.

Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Банин М.В. Глобальная трехмерная численная фотохимическая модель CHARM. М.: ГЕОС, 2021б. 134 с.

Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Лукин А.Н., Игнатьев А.Н., Соломонов С.В. Особенности изменений содержания озона в верхней стратосфере над Москвой в холодные полугодия 2014–2015 и 2015–2016 гг // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 2. С. 227–235.
https://doi.org/10.1134/S0016794019010097

Куликов Ю.Ю., Кириллов А.С., Поберовский А.В., Имхасин Х.Х. Микроволновый мониторинг содержания озона в средней атмосфере в Апатитах и Петергофе зимой 2021/22 г // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 99–107.

Куликов Ю.Ю., Поберовский А.В., Рыскин В.Г., Юшков В.А. Обнаружение больших флуктуаций в содержании озона средней атмосферы во время внезапных стратосферных потеплений в приполярных широтах Арктики // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 2. С. 261–269. https://doi.org/10.31857/S0016794020020091

Куминов А.А., Юшков В.А., Гвоздев Ю.Н., Штырков О.В., Лыков А.Д., Балугин Н.В. Метеорологическое ракетное зондирование для атмосферных исследований и мониторинга геофизической обстановки // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 21–31.

Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П., Борчевкина О.П., Карпов М.И. Ветровые эффекты в термосфере при распространении атмосферных волн, генерируемых тепловым тропосферным источником // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62. № 4. С. 537–544. https://doi.org/10.31857/S0016794022040113

Лукьянов А.Н., Ганьшин А.В., Юшков В.А., Вязанкин А.С. Траекторное моделирование средней атмосферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 95–104. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-9-95-104

Маричев В.Н., Бочковский Д.А. Мониторинг изменчивости стратосферного слоя аэрозоля над Томском в 2016–2018 гг. по данным лидарного зондирования // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 61–72.

Махмутов В.С., Базилевская Г.А., Миронова И.А., Синнхубер М., Розанов Е., Суходолов Т., Гвоздевский Б.Б., Свиржевский Н.С. Атмосферные эффекты во время высыпаний энергичных электронов // Изв. РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 11. С.1650–1653.

Невзоров А.В., Баженов О.Е., Ельников А.В., Логинов В.А. Сравнение временных рядов интегрального содержания аэрозоля в стратосфере и общего содержания озона // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 5. С. 358–363. https://doi.org/10.15372/AOO20210507

Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Неробелов Г.М., Поберовский А.В. Сравнения измерений стратосферного содержания CO_2 наземным и спутниковым методами // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 3. С. 191–194. https://doi.org/10.15372/AOO20220303

Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М. Аномалии содержания озона над территорией России в зимне-весенний период 2015/16 г. // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 36–49.

Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Васильев А.А., Гурьянов В.В. Термический режим в тропосфере, стратосфере и нижней мезосфере Северного полушария в 1979–2016 гг. // Метеорология и гидрология. 2019. № 8. С. 5–20.

Перцев Н.Н., Далин П.А., Перминов В.И. Лунные приливы в области мезопаузы по данным о летней температуре излучающего гидроксила // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61. № 2. С. 259–266.

Попов А.А., Гаврилов Н.М., Перминов В.И., Перцев Н.Н. Статистическая коррекция мезомасштабных дисперсий температуры верхней атмосферы по наблюдениям ночной эмиссии гидроксила в Звенигороде // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62. № 1. С. 130–136.

Смышляев С.П., Блакитная П.А., Моцаков М.А. Численное моделирование влияния физических и химических факторов на межгодовую изменчивость содержания озона в Антарктике // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 21–32.

Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поляков А.В., Виролайнен Я.А. Спутниковый мониторинг озоносферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 71–79. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-12-71-79

Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хаттатов В.У. Исследование химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019/20 г // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 70–83. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-9-70-83

Черемисин А.А., Маричев В.Н., Бочковский Д.А., Новиков П.В., Романченко И.И. Стратосферный аэрозоль сибирских лесных пожаров по данным лидарных наблюдений в Томске в августе 2019 г // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 898–905. https://doi.org/10.15372/AOO20211110

Черемисин А.А., Маричев В.Н., Новиков П.В., Павлов А.Н., Шмирко К.А., Бочковский Д.А. Оценка переноса вулканического аэрозоля в стратосфере над Томском и Владивостоком в 2011 г. по данным лидарных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2019. № 5. С. 50–62.

Шашкин В.В., Толстых М.А., Володин Е.М. Моделирование циркуляции стратосферы с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 5–21.

Яковлев А.Р., Смышляев С.П. Численное моделирование воздействия Мирового океана на температуру и содержание озона в нижней и средней атмосфере // Метеорология и гидрология. 2019. № 9. С. 25–37.

Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I. Study of the Mesosphere and Lower Thermosphere by the Method of Creating Artificial Periodic Irregularities of the Ionospheric Plasma // Atmosphere. 2022. V. 13. № 9. 1346. https://doi.org/10.3390/atmos13091346

Bakhmetieva N.V., Kulikov Y.Y., Zhemyakov I.N. Mesosphere Ozone and the Lower Ionosphere under Plasma Disturbance by Powerful High-Frequency Radio Emission // Atmosphere. 2020. V. 11. № 11. 1154. https://doi.org/10.3390/atmos11111154

Belyaev A.N. Local temperature changes in the mesosphere due to a “horizontally propagating” turbulent patch // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. V. 190. P. 62–73. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.05.006

Ermakova T.S., Koval A.V., Smyshlyaev S.P., Didenko K.A., Aniskina O.G., Savenkova E.N., Vinokurova E.V. Manifestations of Different El Niño Types in the Dynamics of the Extratropical Stratosphere // Atmosphere. 2022. V. 13 № 12. 2111. https://doi.org/10.3390/atmos13122111

Gabis I.P. Quasi-biennial oscillation of the equatorial total ozone: A seasonal dependence and forecast for 2019–2021 // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2020. V. 207. 105353. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105353

Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P., Koval A.V. Thermal effects of nonlinear acoustic-gravity waves propagating at thermospheric temperatures matching high and low solar activity // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2020. V. 208. 105381. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105381

Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P., Koval A.V. Decay time of atmospheric acoustic-gravity waves after deactivation of wave forcing // Atmos.Chem. Phys. 2022. V. 22. № 20. P. 13713–13724. https://doi.org/10.5194/acp-22-13713-2022

Grankin D., Mironova I., Bazilevskaya G., Rozanov E., Egorova T. Atmospheric Response to EEP during Geomagnetic Disturbances // Atmosphere. 2023. V. 14. № 2. 273. https://doi.org/10.3390/atmos14020273

Grigoriev G.I., Lapin V.G., Kalinina E.E. Generation of Internal Waves in the Thermosphere during Operation of the SURA Facility under Parametric Resonance Conditions // Atmosphere. 2020. V. 11. № 11. 1169. https://doi.org/10.3390/atmos11111169

Jakovlev A.R., Smyshlyaev S.P., Galin V.Y. Interannual Variability and Trends in Sea Surface Temperature, Lower and Middle Atmosphere Temperature at Different Latitudes for 1980–2019 // Atmosphere. 2021. V. 12. № 4. 454. https://doi.org/10.3390/atmos12040454

Karagodin A., Rozanov E., Mareev E., Mironova I., Volodin E., Golubenko K. The representation of ionospheric potential in the global chemistry-climate model SOCOL // Sci. Total. Environ. 2019. V. 697. 134172.

Karagodin A., Rozanov E., Mironova I. On the Possibility of Modeling the IMF B_y-Weather Coupling through GEC-Related Effects on Cloud Droplet Coalescence Rate // Atmosphere. 2022. V. 13. № 6. 881. https://doi.org/10.3390/atmos13060881

Kolennikova M., Gushchina D. Revisiting the Contrasting Response of Polar Stratosphere to the Eastern and Central Pacific El Niños // Atmosphere. 2022. V. 13. № 5. 682. https://doi.org/10.3390/atmos13050682

Korotyshkin D., Merzlyakov E., Jacobi C., Lilienthal F., Wu Q. Longitudinal MLT wind structure at higher mid-latitudes as seen by meteor radars at central and Eastern Europe (13° E/49° E) // Adv. Space Res. 2019a. V. 63. № 10. P. 3154–3166. https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.036

Korotyshkin D., Merzlyakov E., Sherstyukov O., Valiullin F. Mesosphere/lower thermosphere wind regime parameters using a newly installed SKiYMET meteor radar at Kazan (56°N, 49°E) // Adv. Space Res. 2019b. V. 64. № 7. P. 2132–2143. https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.12.032

Koval A.V., Gavrilov N.M., Didenko K.A., Ermakova T.S., Savenkova E.N. Sensitivity of the 4–10-Day Planetary Wave Structures in the Middle Atmosphere to the Solar Activity Effects in the Thermosphere // Atmosphere. 2022. V. 13. № 8. 1325. https://doi.org/10.3390/atmos13081325

Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Drobashevskaya E.A. Numerical simulation of the mean meridional circulation in the middle atmosphere at different phases of stratospheric warmings and mountain wave scenarios // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. V. 183. P. 11–18. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.12.012

Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Feigin A.M. Retrieving daytime distributions of O, H, OH, HO_2, and chemical heating rate in the mesopause region from satellite observations of ozone and OH* volume emission: The evaluation of the importance of the reaction $H + O_3 \rightarrow O_2 + OH$ in the ozone balance // Adv. Space Res. 2022. V. 69. № 9. P. 3362–3373. https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.02.011

Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Vasilyev R.V., Artamonov M.F. Method for Determining Neutral Wind Velocity Vectors Using Measurements of Internal Gravity Wave Group and Phase Velocities // Atmosphere. 2019. V.10. № 9. 546. https://doi.org/10.3390/atmos10090546

Medvedeva I.V., Semenov A.I., Pogoreltsev A.I., Tatarnikov A.V. Influence of sudden stratospheric warming on the mesosphere/lower thermosphere from the hydroxyl emission observations and numerical simulations // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. V. 187. P. 22–32.

Merzlyakov E., Korotyshkin D., Jacobi Ch., Lilienthal F. Long-period meteor radar temperature variations over Collm (51° N, 13° E) and Kazan (56° N, 49° E) // Adv. Space Res. 2021. V. 67. № 10. P. 3250–3259.

Merzlyakov E., Solovyova T., Yudakov A., Korotyshkin D., Jacobi Ch., Lilienthal F. Some features of the day-to-day MLT wind variability in winter 2017–2018 as seen with a European/Siberian meteor radar network // Adv. Space Res. 2020a. V.65. № 6. P. 1529–1543. https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.12.018

Merzlyakov E., Solovyova T., Yudakov A., Korotyshkin D., Jacobi Ch., Lilienthal F. Amplitude modulation of the semidiurnal tide based on MLT wind measurements with a European/Siberian meteor radar network in October–December 2017 // Adv. Space Res. 2020b. V. 66. № 3. P. 631–645. https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.036

Mironova I.A., Artamonov A.A., Bazilevskaya G.A., Rozanov E.V., Kovaltsov G.A., Makhmutov V.S., Mishev A., Karagodin A.V. Ionization of the polar atmosphere by energetic electron precipitation retrieved from balloon measurements // Geophys. Res. Lett. 2019a. V. 46. P. 990–996. https://doi.org/10.1029/2018GL079421

Mironova I.A., Bazilevskaya G.A., Kovaltsov G.A., Artamonov A.A., Rozanov E.V., Mishev A., Makhmutov V.S., Karagodin A.V., Golubenko K.S. Spectra of high energy electron precipitation and atmospheric ionization rates retrieval from balloon measurements // Sci. Total Environ. 2019b. V. 693. P. 133–242.

Mironova I., Kovaltsov G., Mishev, A., Artamonov A. Ionization in the Earth's Atmosphere Due to Isotropic Energetic Electron Precipitation: Ion Production and Primary Electron Spectra// Remote Sens. 2021a. V. 13. 4161. https://doi.org/10.3390/rs13204161

Mironova I., Karagodin-Doyennel A., Rozanov E. The Effect of Forbush Decreases on the Polar-Night HO_x Concentration Affecting Stratospheric Ozone // Front. Earth Sci. 2021b. 8:618583. https://doi.org/10.3389/feart.2020.618583

Mironova I., Sinnhuber M., Bazilevskaya G., Clilverd M., Funke B., Makhmutov V., Rozanov E., Santee M.L., Sukhodolov T., Ulich T. Exceptional middle latitude electron precipitation detected by balloon observations: implications for atmospheric composition // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22. P. 6703–6716. https://doi.org/10.5194/acp-22-6703-2022

Pikulina P., Mironova I., Rozanov E., Karagodin A. September 2017 Solar Flares Effect on the Middle Atmosphere // Remote Sens. 2022. V. 14. 2560. https://doi.org/10.3390/rs14112560

Popov A.A., Gavrilov N.M., Perminov V.I., Pertsev N.N., Medvedeva I.V. Multi-year observations of mesoscale variances of hydroxyl nightglow near the mesopause at Tory and Zvenigorod // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2020. V. 205. 105311. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105311

Shevchuk N., Pertsev N., Dalin P., Perminov V. Wave-induced variations in noctilucent cloud brightness: model and experimental studies // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2020. V. 203. 105257. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105257

Shpynev B.G., Khabituev D.S., Chernigovskaya M.A., Zorkal'tseva O.S. Role of winter jet stream in the middle atmosphere energy balance // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. V. 188. P. 1–10. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.03.008

Smyshlyaev S.P., Vargin P.N., Motsakov M.A. Numerical Modeling of Ozone Loss in the Exceptional Arctic Stratosphere Winter–Spring of 2020 // Atmosphere. 2021. V. 12. № 11. 1470. https://doi.org/10.3390/atmos12111470

Tolmacheva A.V., Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I., Egerev M.N. Turbopause range measured by the method of the artificial periodic irregularities // Adv. Space Res. 2019. V. 64. № 10. P. 1968–1974. https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.05.002

Vargin P.N., Kostrykin S.V., Volodin E.M., Pogoreltsev A.I., Wei K. Arctic Stratosphere Circulation Changes in the 21st Century in Simulations of INM CM5 // Atmosphere. 2022a. V. 13. № 1. 25. https://doi.org/10.3390/atmos13010025

Vargin P.N., Koval A.V., Guryanov V.V. Arctic Stratosphere Dynamical Processes in the Winter 2021–2022 // Atmosphere. 2022b. V. 13. № 10. 1550. https://doi.org/10.3390/atmos13101550

Veretenenko S. Effects of Solar Proton Events of January 2005 on the middle atmosphere dynamics in the Northern hemisphere // Adv. Space Res. 2021a. V. 68. № 4. P. 1814–1824. https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.005

Veretenenko S.V. Effects of Energetic Solar Proton Events of Solar Cycle 23 on Intensity of the Stratospheric Polar Vortex // Geomagn. Aeron. 2021b. V. 61. № 7. P. 985–992. https://doi.org/10.1134/S0016793221070227

Veretenenko S. Stratospheric Polar Vortex as an Important Link between the Lower Atmosphere Circulation and Solar Activity // Atmosphere. 2022a. V. 13. № 7. 1132. https://doi.org/10.3390/atmos13071132

Veretenenko S.V. Effects of Solar Proton Events of January 2005 on the Middle Atmosphere Circulation in the Southern Hemisphere // Geomagn. Aeron. 2022b. V. 62. № 7. P. 924–931. https://doi.org/10.1134/S0016793222070180

Veretenenko S., Ogurtsov M. Manifestation and possible reasons of ~60-year oscillations in solar-atmospheric links // Adv. Space Res. 2019a. V. 64. № 1. P. 104–116. https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.022

Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. 60-Year Cycle in the Earth's Climate and Dynamics of Correlation Links between Solar Activity and Circulation of the Lower Atmosphere: New Data // Geomagn. Aeron. 2019b. V. 59. № 7. P. 908–917. https://doi.org/10.1134/S0016793219070260

Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. Influence of Solar-Geophysical Factors on the State of the Stratospheric Polar Vortex // Geomagn. Aeron. 2020. V. 60. № 7. P. 974–981. https://doi.org/10.1134/S0016793220070282

Yankovsky V., Vorobeva E., Manuilova R. New techniques for retrieving the $[O(^3P)]$, $[O_3]$ and $[CO_2]$ altitude profiles from dayglow oxygen emissions: Uncertainty analysis by the Monte Carlo method // Adv. Space Res. 2019. V. 64. № 10. P. 1948–1967. https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.07.020

Zuev V.V., Savelieva E. Arctic polar vortex splitting in early January: The role of Arctic Sea ice loss // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019a. V. 195. 105137. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105137

Zuev V.V., Savelieva E. The cause of the strengthening of the Antarctic polar vortex during October–November periods // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019b. V. 190. P. 1–5. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.04.016

Russian Studies of the Middle Atmosphere in 2019–2022

A. A. Krivolutsky[1, *] and S. V. Veretenenko[2]

[1]*Central Aerological Observatory, Roshydromet, Pervomayskya st., 3, Dolgoprudny, 141701 Russia*

[2]*Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, Politekhnicheskaya st., 26, St. Petersburg, 194021 Russia*

**e-mail: krivolutsky@mail.ru*

A review of the results of Russian studies of the middle atmosphere in 2019–2022 prepared by the Commission of the Middle Atmosphere of the Meteorology and Atmospheric Sciences Section (MASS) of the Russian National Geophysical Committee for the National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences to the XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Germany, 2023)* is presented.

Keywords: middle atmosphere, temperature, chemical composition, circulation, solar activity, atmospheric models

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2023, том 59, № 7, с. 955–975

УДК 523.4535.338;551.51

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНЕТНЫХ АТМОСФЕР В 2019–2022 гг.

© 2023 г. О. И. Кораблев*

Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Профсоюзная 84/32, Москва, 117997 Россия

**e-mail: korab@cosmos.ru*

Поступила в редакцию 31.08.2023 г.
После доработки 08.11.2023 г.
Принята к публикации 15.11.2023 г.

Представлен обзор исследований атмосфер планет Солнечной системы, выполненных российскими учеными за 2019–2022 гг., подготовленный в Комиссии по атмосферам планет Национального геофизического комитета для Национального доклада по метеорологии и атмосферным наукам на 28-й Генеральной Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (IUGG-2023) в Берлине.

Ключевые слова: атмосфера, метеорология, планета, состав атмосферы, циркуляция атмосферы, суперротация, перенасыщение, атмосферные потери, метан, озон, малые составляющие атмосферы, пыль, облака, Венера, Марс, Сатурн, Титан, Плутон, спектроскопия

DOI: 10.31857/S0002351523070052, **EDN:** LGFVOZ

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящий обзор основан на материалах, подготовленных Комиссией по атмосферам планет Национального геофизического комитета для Национального доклада по метеорологии и наукам об атмосфере для XXXVIII Генеральной ассамблеи Международного союза геодезии и геофизики (IUGG) в Берлине, Германия, июль 11–20, 2023 [Национальный отчет России, 2023]. Он включает исследования атмосфер планет, выполненные в 2019–2022 гг. Четырехлетний период, дольше обычного, отмечен массовой публикацией результатов работ по данным проекта ESA – Роскосмоса ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO). Этот спутник достиг Марса и завершил кампанию по формированию орбиты с аэродинамическим торможением в марте 2018 г. С тех пор он выполняет регулярные измерения состава атмосферы и ведет мониторинг климата Марса с помощью российского прибора Atmospheric Chemistry Suite (ACS). [Korablev et al., 2018]. Недавно в Journal of Geophysical Research (Planets) опубликован соответствующий сборник статей (Topical collection) [ExoMars Trace Gas Orbiter, 2023]. Как и прежде [Korablev, 2016; Кораблев, 2020], многие результаты получены по данным космических аппаратов ЕКА Mars Express и Venus Express, в состав которых входили приборы с российским участием. Mars Express работает уже более 19 лет; космический аппарат Venus Express эксплуатировался в 2006–2014 гг., и его длинные ряды данных продолжают вдохновлять на новые публикации.

Обзор основан на работах, касающихся нейтральных планетных атмосфер и планетных климатов, авторами или соавторами которых являются ученые, работающие в российских научных учреждениях, и опубликованные в рецензируемой литературе. Части обзора разделены по планетам и включает краткое описание спектроскопии, связанной с атмосферой планет. Последние достижения в области внесолнечных планет, понимании их природы и атмосфер часто соприкасаются с моделированием атмосфер тел Солнечной системы, которые служат хорошо изученным эталоном [напр., Forget et al., 2021]. Это новая, быстро развивающаяся область наук об атмосферах. Тем не менее, на данный момент мы решили оставить эти исследования за рамками обзора.

Исследования, связанные с атмосферной циркуляцией и химией мезосферы Венеры, рассмотрены в разделе 2; разноплановые исследования атмосферы Марса, включая измерения водяного пара и изотопных отношений и их связь с атмосферными потерями, структура и циркуляция атмосферы, аэрозоли объединены в разделе 3; несколько результатов по циркуляции и составу атмосфер Сатурна, Титана и Плутона представлены в разделе 4. Некоторые результаты из области молекулярной спектроскопии, связанные с атмосферами планет или инициированные измерениями планетных атмосфер сведены в разделе 5.

2. ВЕНЕРА

2.1. Циркуляция атмосферы

Ретроградная суперротация наблюдается как вращение всего толстого облачного слоя Венеры в западном направлении со скоростью около 100 м/с на высотах 65–70 км (верхний уровень облаков) [напр., Imamura et al., 2020]. Был продолжен анализ ветров на разных высотах методом отслеживания облачных деталей, перемещающихся от снимка к снимку. Khatuntsev et al., [2022b] проанализировали ≥250 000 векторов ветра, полученных из видимых (VIS; 513 нм) изображений камеры наблюдения Венеры (VMC) на борту Venus Express. Этот спектральный диапазон соответствует уровню высоты 60 ± 3 км, находящемуся между рассмотренными ими ранее даннымиVMC ультрафиолетового (УФ) (365 нм; 70 ± 2 км) и ближнего инфракрасного (NIR; 965 нм; 55 ± 2 км) диапазонов [Khatuntsev et al., 2013, 2017]. На высоте 60 км, в среднем и нижнем облачном слое зональный ветер уменьшался с 76.5 до 61.5 м/с на 30°–65° ю.ш. Направление меридионального ветра было противоположно полученному из УФ-наблюдений в верхней части облаков, до 7 м/с в сторону экватора.

Анализ изображений VMC в УФ-диапазоне (365 нм) был дополнен аналогичным набором данных со спутника Akatsuki JAXA. Их совместный анализ [Khatuntsev et al., 2022a] позволил охарактеризовать циркуляцию на уровне верхней границы облаков за период 2006–2021 гг. с разрывом в ~2.5 года между миссиями Venus Express и Akatsuki в 2014–2016 гг. Над экваториальными широтами (0–20° ю.ш.) среднегодовой зональный ветер −98.6 ± 1.3 м/с менялся с периодом 12.5 ± 0.5 лет и амплитудой ~10м/с. Средняя меридиональная скорость ветра −2.3 ± 0.2 м/с (в направлении полюса) также варьировалась с амплитудой ~3 м/с. В качестве причин наблюдаемой периодичности [Khatuntsev et al., 2022a] предложили коррелированные периодические изменения УФ-альбедо и 11-летний солнечный цикл. Оба фактора могут влиять на радиационный баланс, а солнечный цикл – также на химию мезосферы.

Наблюдения теплового излучения (ближнего ИК-диапазона) от горячей подоблачной атмосферы и поверхности на ночной стороне позволяет наблюдать самые нижние слои облаков. По перемещению облачных деталей в спектральном окне 1.74 мкм по данным прибора VIRTIS-M (Venus Express) [Gorinov et al., 2021] определили ветер на высотах 44–48 км. На 0–60° ю.ш. наблюдалась суперротация со средней скоростью 60–63 м/с в западном направлении. Меридиональная составляющая ветра была значительно слабее: 0–2 м/с к экватору на ≥20° ю.ш. и, немного больше, к полюсу на 0–20° ю.ш.

[Губенко и др., 2021] проанализировали мелкомасштабные (~1 км по вертикали) флуктуации сигнала нескольких радиозатменных профилей космических аппаратов “Венера-15” и “Венера-16”. Выше 61.5 км спектр этих возмущений позволил отождествить вертикально распространяющиеся внутренние гравитационные волны (или волны плавучести) (ГВ). Были определены их собственные частоты, (3.5–9.5) × 10^{-4} рад/с и отношение горизонтальной длины волны к вертикальной (21–57).

Подводя итог, изображения облаков в разных диапазонах дали данные на четырех уровнях в облачном слое Венеры, примерно 48 (1.74 мкм), 55 (NIR), 60 (VIS) и 70 км (УФ). Высота между слоями VIS и NIR менялась за время работы Venus Express, от ≤1 км в начале миссии (минимум солнечного цикла) до 8.5 км с ростом солнечной активности. Движение наблюдаемых деталей облаков можно связать с динамикой атмосферы на этих высотах. Зональный поток (скорость суперротации) зависит от местного солнечного времени и широты, а также от крупномасштабной топографии [Bertaux et al., 2016; Patsaeva et al., 2019; Khatuntsev et al., 2022a]. Влияние поверхности наиболее заметно в УФ и NIR данных. В самом нижнем слое существенной корреляции с топографией поверхности не наблюдалось. Меридиональное направление и скорость ветра могут указывать на конфигурацию циркуляции Хэдли на уровне облаков, однако для формального описания данных еще недостаточно. В Южном полушарии полярная (прямая) ветвь ячейки Хэдли в основном облачном слое наблюдалась на высоте 70 км. Обратная ветвь (в сторону экватора) была около нижней границы облачности (55 км). Возможно, в низких широтах на 1.74 мкм мог наблюдаться фрагмент нижней ветви ячейки Хэдли, обращенной к полюсу.

2.2. Состав и химия мезосферы

Вслед за первым обнаружением озона (O_3) на высотах 90–100 км ночной стороны Венеры [Montmessin et al., 2011], [Marcq et al., 2019], на основе анализа всех надирных наблюдений SPICAV-UV/Venus Express, сообщили об еще одном, постоянном озоновом слое. Озон обнаружен в высоких широтах (≥50° в обоих полушариях) на верхнем уровне облаков (70 км). Относительное содержание O_3 достигало 10–20 ppbv, что сравнимо с атмосферой Марса. Моделирование с использованием 3D-фотохимической модели LMD [Lebonnois et al., 2010] (называемой с 2022 г. PCM, Planetary Climate Model) показало, что наблюдаемый озон мог образоваться в результате меридионального переноса O_2 над полюсами.

Тот же набор данных SPICAV-UV был обработан повторно с целью получить содержание SO_2 в верхнем облачном слое (70 км) в течение всей

миссии Venus Express (2006–2014 гг.) [Marcq et al., 2020]. Это исследование подтвердило и расширило предыдущий анализ [Marcq et al., 2013]. Наблюдались сильные долговременные изменения содержания SO_2в низких широтах, от ~100 ppbv (2007, 2009) до ≤10 ppbv (2014) (см. также рис. 2 в [Кораблев, 2016]). Содержание диоксида серы уменьшалось к полюсу и около подсолнечной точки, отражая конкурирующие процессы адвекции и фотохимического разрушения. Было отмечено увеличение SO_2 и УФ-излучения над Землей Афродиты, подтверждая механизм поступления SO_2 через орографические гравитационные волны [Bertaux et al., 2016]. Однако наблюдаемую корреляцию с поверхностью можно спутать с долговременной изменчивостью из-за наблюдательной селекции, связанной с орбитой спутника.

На основе новых калибровок звездных затмений SPICAV-UV [Evdokimova et al., 2020], [Evdokimova et al., 2021] получили вертикальные профили ночного озона и SO_2 на протяжении всей миссии. После открытия озонового слоя в мезосфере [Montmessin et al., 2011], за 8-летний период наблюдений было зарегистрировано 132 новых обнаружения. В редких обнаружениях пиковое содержание O_3 составляло от 10^7 до 10^8 молек $см^{-3}$ на 85–110 км. Средний профиль озона менялся с 10–30 ppbv на 85–90 км до ~100 ppbv на 100 км. Эта работа продолжила и расширила предыдущее исследование профилей диоксида серы в мезосфере [Belyaev et al., 2017]. В среднем содержание SO_2 составляло 135 ± 21 ppbv между 85 и 100 км. Широкий разброс измеренных профилей не позволил судить о каких-либо временных или пространственных особенностях распределения SO_2.

Фотохимическое моделирование [Pinto et al., 2021] направлено на изучение распространенности димеров SO $(SO)_2$ в верхних слоях атмосферы Венеры как потенциальной составляющей неизвестного ультрафиолетового поглотителя. Форма спектрального поглощения $(SO)_2$ соответствовала неизвестному поглотителю, однако их содержание оказалось незначительным. Были рассмотрены продукты фотолиза и/или реакции димеров, такие как S_2O, разновидности S_nO более высокого порядка и аллотропы серы, S_n. Все эти соединения в аэрозольной или газовой фазе поглощают в нужном диапазоне. Обсуждались также перспективы идентификации ультрафиолетового поглотителя различными методами на будущих спускаемых аппаратах.

3. МАРС

3.1. Водяной пар и потери водорода

Судьба воды – ключевой вопрос в истории Марса. Ее потери в результате фотодиссоциации и последующей диссипации водорода зависят от интенсивности солнечного излучения сверху и подъема воды снизу. Чем выше молекула воды поднимается в атмосфере, тем легче она покидает атмосферу. Солнечно-затменные наблюдения марсианской атмосферы российскими приборами SPICAM-IR и ACS на борту космических аппаратов Mars Express и Exo Mars TGO, охватывающие восемь марсианских лет и две глобальные пылевые бури (ГПБ), позволили изучить распределение воды до высот 100–120 км [Fedorova et al., 2020; 2021; 2023; Belyaev et al., 2021].

Данные SPICAM (2005 г.–март 2019 г.) охватывают восемь марсианских лет (MY), с 27 по 35 MY. Летом в южном полушарии водяной пар достигал высот 70–90 км (Ls = 240–300°; сезон перигелия). В этом сезоне в годы без ГПБ наблюдался повышенный уровень воды, примерно 100 ppmv в южном полушарии. Реакция водяного пара на два наблюдаемых пылевых события в 28 и 34 MY существенно отличалась. Буря 28 MY, совпавшая с южным летним солнцестоянием, вызвала больший подъем воды в обоих полушариях на высоты >80 км [Fedorova et al., 2021].

Данные ACS были проанализированы за два марсианских года, от Ls = 163° 34 MY до Ls = 170° 36 MY. Одновременно были восстановлены профили водяного пара, температурные профили атмосферы, пыли и облаков. Используя температуру, полученную из плотности CO_2 в гидростатическом равновесии, [Fedorova et al., 2020, 2023] обнаружили повсеместное и глубокое перенасыщение водяного пара над слоями аэрозоля, часто наблюдаемое одновременно с облаками (см. рис. 1). В афелии относительное содержание водяного пара на высоте выше 40 км было меньше 3 ppmv, при этом он наблюдался в состоянии перенасыщения. В перигелии вода в количестве 30–50 ppmv была перенасыщена выше 60 км. Между вечерними и утренними терминаторами насыщение менялось в ответ на термические приливы. Данные ACS показали, что перенасыщение наблюдается практически повсеместно, особенно в период сезона с повышенным содержанием пыли в атмосфере, что увеличивает среднегодовую диссипации воды.

Измерения методом солнечных затмений проходят на терминаторе, где на состояние насыщения могут влиять особые температурные условия. Чтобы лучше понять перенасыщение и потери воды, глобальное распределение воды было исследовано с помощью ассимиляционного анализа, объединяющего данные о воде, температуре и пыли полученные приборами на нескольких космических аппаратах, включая два прибора TGO, ACS и NOMAD [Aoki et al., 2021]. Анализ был проведен за 34 MY с использованием модели общей циркуляции [Holmes et al., 2022]. Во время

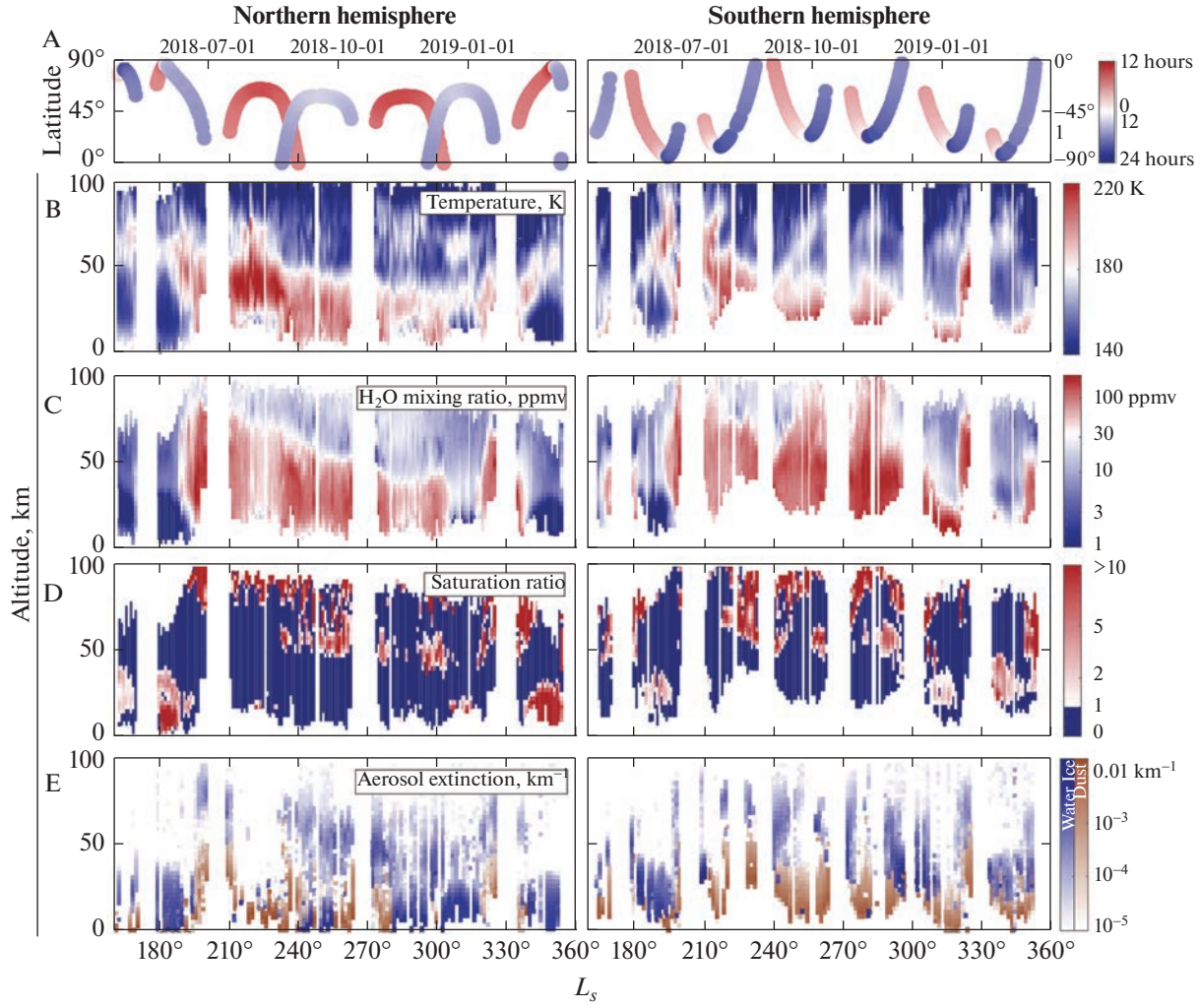

Рис. 1. Профили свойств атмосферы (температура, относительное содержание водяного пара, коэффициент насыщения, поглощение за счет пыли и облаков), полученные в перигелии 34 MY на основе данных затмений ACS/TGO. На верхней панели показаны широты и местное время затмений. Рисунок из [Fedorova et al., 2020].

пыльного сезона 34 MY модель показала существенное перенасыщение выше 60 км на всех широтах. Ниже наблюдались более выраженные суточные колебания, приводивших к образованию дискретных слоев перенасыщения. [Holmes et al., 2022] также обнаружили свидетельства проникновения перенасыщенного водяного пара в северный зимний полярный вихрь. Во время ГПБ MY34 и региональной бури южным летом того же года водяной пар на всех широтах был перенасыщен до высот 60–90 км, откуда легче всего идет диссипация.

Эффективность диссоциации водяного пара на этих высотах была впервые подтверждена одновременными наблюдениями водородной короны с космического аппарата MAVEN во время регионального пылевого события 34 MY [Chaffin et al., 2021]. Отсутствие затмений, наблюдаемых с TGO, совпало с пиком этого пылевого события. Пробел был заполнен с использованием модели общей циркуляции с ассимиляцией [Holmes et al., 2021]. Вслед за первыми наблюдениями сезонной переменности свечения H-Лайман-альфа при помощи SPICAM UV и HST [Chaffin et al., 2014], наборы данных MAVEN и TGO подтвердили новую парадигму потерь водорода с Марса. В традиционной схеме предполагалось, что водяной пар не проникает выше холодной мезопаузы и поступление H в верхние слои атмосферы регулируется медленной диффузией H_2. В новой схеме сезонные или региональные изменения содержания пыли, повышая температуры и разгоняя циркуляцию, позволяют воде подниматься выше, где она диссоциирует напрямую, увеличивая потери.

Обсуждаемые наблюдения линии H-Лайман-альфа и повышенного водяного пара дали толчок многочисленным попыткам моделирования. Краснопольский [Krasnopolsky, 2019] использовал одно-

мерную фотохимическую модель нейтрального и ионного состава на 80–300 км при различной солнечной активности. В перигелии скорость выхода водорода с высоты 250 км составила ≈1.9 × × 10^8 cm^{-2} s^{-1}. Среднесуточное содержание воды, соответствующее наблюдаемой в перигелии увеличенной скорости потерь водорода (10^9 cm^{-2} s^{-1}), составляло ≤60 частей на миллион по объему (ppmv) на высоте 80 км, в согласии с наблюдениями SPICAM и ACS. Фотолиз H_2O наиболее эффективен при 160–180 нм и слабо зависит от солнечной активности. Этот процесс идет на высоте около 100 км, откуда может диссипировать лишь небольшая часть образующегося водорода. Поток водорода с высоты 250 км можно аппроксимировать как Φ_H (cm^{-2} s^{-1}) = $1.6 \times 10^8 + 1.4 \times 10^7$ f_{H_2O} (ppmv), где f_{H_2O} – относительное содержание H_2O на высоте 80 км.

Монтмессин [Monmessin et al., 2021] построили упрощенную одномерную модель с аппроксимацией вертикального переноса, чтобы показать, что помимо образования атомарного водорода в результате фотолиза воды выше 80 км, основная часть экзосферного водорода образуется на высотах ~60 км и затем напрямую переносится в верхние слои атмосферы. Сравнивая подачу воды во время глобальной пыльной бури, периодов перигелия и региональной бури, зафиксированную наблюдениями ACS/TGO [Belyaev et al., 2021], они пришли к выводу, что на длительном масштабе времени основную роль играет сезонный эффект, южная весна/лето наиболее эффективна в производстве H и его подъеме в верхние слои атмосферы.

В [Шапошников и др., 2022] использовали модель MAOAM GCM (известную также как Mars GCM Института Макса Планка) для моделирования гидрологического цикла Марса во время сезонов пылевых бурь 28 и 34 MY. Рассматривая фотодиссоциацию воды на длине волны Лайман-альфа, они отметили влияние пыльных бурь как на общее содержание водяного пара, так и на его вертикальное распределение. Поступление водяного пара в верхние слои атмосферы во время пыльных бурь приводит к интенсивной фотодиссоциации (до 6.5 т/с для всей атмосферы). Фотодиссоциация достигла максимума на высоте 50–80 км во время бури 34 MY и 70–80 км в 28 MY. Результаты моделирования сравнивались с профилями воды ACS/TGO.

Шапошников [Shaposhnikov et al., 2019, 2021] также использовали MAOAM, чтобы исследовать, как динамика средних и верхних слоев атмосферы влияет на подъем водяного пара. В статье 2019 г. они ввели эффект сезонного водяного “насоса”. В результатах моделирования особенно сильна восходящая ветвь меридиональной циркуляции, расположенная в перигелии выше 60° ю.ш. Там сочетание среднего вертикального потока и возмущений солнечных приливов позволило воде проникнуть через минимум мезопаузы на высоте примерно 60 км. Затем меридиональная циркуляция переносит воду на север. Интенсивность циркуляции зависит от количества пыли, и содержание воды в верхних слоях атмосферы сильно увеличивалось во время пылевых явлений. Шапошников [Shaposhnikov et al., 2022] более подробно рассмотрели работу водяного “насоса” под воздействием гравитационных волн. Было найдено, что молекулярная диффузия играет сравнительно слабую роль в переносе воды в средней атмосфере и через мезопаузу, и изучено влияние гравитационных волн во время ГПБ и период равноденствий.

Новые исследования попадания водяного пара на большие высоты и ее последующей диссипации позволяют сделать вывод, что наблюдения Mars Express и TGO в течение нескольких марсианских лет подтвердили эффективность пыльных бурь в подъеме воды. Показано, что в южном полушарии атмосферная вода достигает больших высот в течение всего сезона перигелия. Изолирующий эффект тропопаузы, препятствующая попаданию воды в верхние слои атмосферы на Земле, почти не работает на Марсе, и вода покидает планету намного легче, чем считалось ранее.

Еще в одной работе, посвященной исследованию водяного пара в атмосфере Марса, использованы надирные данные Mars Express, полученные в ближней ИК (1.38 мкм) и тепловой ИК (20–40 мкм) областях спектра [Knutsen et al., 2022]. Поглощение водяным паром на этих длинах волн формируется на разных уровнях атмосферы, и их совместный анализ позволяет не только выяснить число молекул в атмосферном столбе, но и наложить ограничения на вертикальное распределение. Синергия позволяет различать приповерхностное содержание, ниже 5 км, и остальную часть столба. В среднем, найдено что вода сильно прижата к поверхности и неравномерно перемешана в планетном пограничном слое. Полученное распределение отличается от базы данных климата Марса (MCD) LMD, особенно в низких и средних широтах, где синергия показала большую концентрацию вблизи поверхности. Современные представления о распределении воды в самом нижнем слое атмосферы опираются на предсказания моделей, и значительные расхождения между MCD и измерениями показывают, что механизмы, формирующие вертикальное распределение, понятны не до конца.

3.2. Отношения изотопов и атмосферные потери

Отношения изотопов накладывают важные ограничения на стабильность и эволюцию планетных атмосфер: в долгосрочной перспективе

они могут указывать на полные потери летучих из атмосферы или других резервуаров, обменивающихся с атмосферой. С другой стороны, на измеренные изотопные отношения влияют физические и химические процессы в современной атмосфере (фракционирование за счет диффузии, конденсации или фотолиза). Отношение дейтерия к водороду (D/H) широко используется для оценки запаса воды на Марсе в прошлом и ее эволюции, однако механизмы, контролирующие современное поведение HDO, плохо изучены. Содержание изотопов в марсианской атмосфере в основном известно из наземной спектроскопии и сравнительно редких измерений на поверхности. Спектрометры ExoMars TGO, наблюдающие за затмениями Солнца в атмосфере с высоким спектральным разрешением, позволили впервые получить профили изотопологов воды и CO_2 в зависимости от высоты, чтобы выяснить процессы фракционирования на разных уровнях атмосферы.

В первой публикации по данным TGO, посвященной профилю отношения HDO/H_2O [Vandaele et al., 2019] описаны измерения пыли, воды и полутяжелой воды (HDO) в начале ГПБ 34 MY с помощью приборов NOMAD и ACS. Вертикальное распределение отношения HDO/H_2O (D/H) получено от планетного пограничного слоя до ~80 км. Это было одним из первых свидетельств резкого увеличение содержания H_2O и HDO на высотах 40–80 км в результате более высоких температур во время ГПБ (см. раздел 3.1). Анализируя более полный ряд измерений ACS, от начала научных наблюдений TGO (Ls = 174° 34 MY) до конца 35 MY, [Alday et al., 2021a] восстановили профили HDO и H_2O в диапазоне высот 0–80 и 0–100 км соответственно (рис. 2). Сравнивая измеренные профили с ожидаемыми скоростями фотолиза, было установлено, что атомы H и D на высотах диссипации образуются преимущественно в сезон перигелия. Хотя фракционирование, вызванное конденсацией, является основным фактором изменения D/H в водяном паре, на изотопное содержание продуктов диссоциации D и H больше влияют различия в скорости фотолиза HDO и H_2O. Результаты позволяют уточнить оценки общей потери воды с Марса на основе отношения дейтерия к водороду.

При помощи инструмента CSHELL на НАСА IRTF, [Krasnopolsky, 2021] наблюдали широтные изменения отношения HDO/H_2O в Северном полушарии Марса в середине лета. По данные семи наблюдений построена карта сезонно-широтных вариаций HDO/H_2O. Отмечена корреляция между отношением HDO/H_2O и средней температурой в самой нижней шкале высоты, что можно объяснить температурно-зависимым фракционированием изотопов. Однако количественно оценить эту связь трудно, и авторы пришли к выводу, что изменчивость HDO/H_2O по диску Марса сложнее, чем дает описание лишь с помощью энергии активации.

Измерения соотношений изотопов кислорода в H_2O еще сложнее, учитывая слабость соответствующих спектральных линий и высокое спектральное разрешение, необходимое для их разделения в плотной полосе поглощения H_2O. Отношения определяются несколькими процессами фракционирования, от диссипации атмосферы до взаимодействия с поверхностью и позволяют ограничить параметры эволюции системы летучих компонентов Марса. В спектрах канала MIR ACS/TGO можно выделить несколько линий поглощения $H_2^{16}O$, $H_2^{18}O$, и $H_2^{17}O$, что позволило впервые измерить вертикальные профили отношений $^{18}O/^{16}O$ и $^{17}O/^{16}O$ в водяном паре [Alday et al., 2019]. Наблюдалось обогащение до $\delta^{18}O = 200 \pm \pm 80‰$ и $\delta^{17}O = 230 \pm 110‰$ по отношению к Венскому стандарту средней океанской воды (VSMOW). Вертикальные профили отношений не показали каких-либо особенностей.

По данным солнечных затмений MIR ACS/TGO также проведен мониторинг изотопного состава кислорода и углерода в CO_2 на высотах от 70 до 130 км в течение более половины марсианского года [Alday et al., 2021b]. Вертикальные тренды изотопных отношений в целом соответствовали диффузионному разделению изотопологов выше гомопаузы ($\delta^{13}C = -3 \pm 37‰$; $\delta^{18}O = = -29 \pm 38‰$; and $\delta^{17}O = -11 \pm 41‰$). Ниже этого уровня отношения соответствовали земным. Авторы предложили нижний предел диссипации первичного углерода на Марсе ≥20–40%. Общие потери углерода из атмосферы из-за образования карбонатов или других стоков, безусловно, были больше. Кроме того, для объяснения более сильного наблюдаемого обогащение $^{18}O/^{16}O$ в водяном паре по отношению к CO_2, они предложили фотохимический перенос легкого O от H_2O к CO_2.

Обсуждаемые наблюдения, в частности получение первых разрешенных по высоте профилей D/H, инициировали усилия по совершенствованию климатических моделей. Значительные колебания отношения D/H, более низкие отношения HDO/H_2O в холодных регионах, связанные с конденсационным фракционированием, были впервые предсказаны на основе трехмерной климатической модели [Montmessin et al., 2005] и были подтверждены наземными наблюдениями [напр., Krasnopolsky, 2021]. По данным TGO была обновлена модель MGCM LMD (или PCM), в которой были усовершенствованы блоки, отвечающие за формирование облаков из водяного льда и конденсационное фракционирование [Vals et al., 2022]. Сравнение с наблюдениями ACS/TGO [Rossi et al., 2022] показало, что модель хорошо вос-

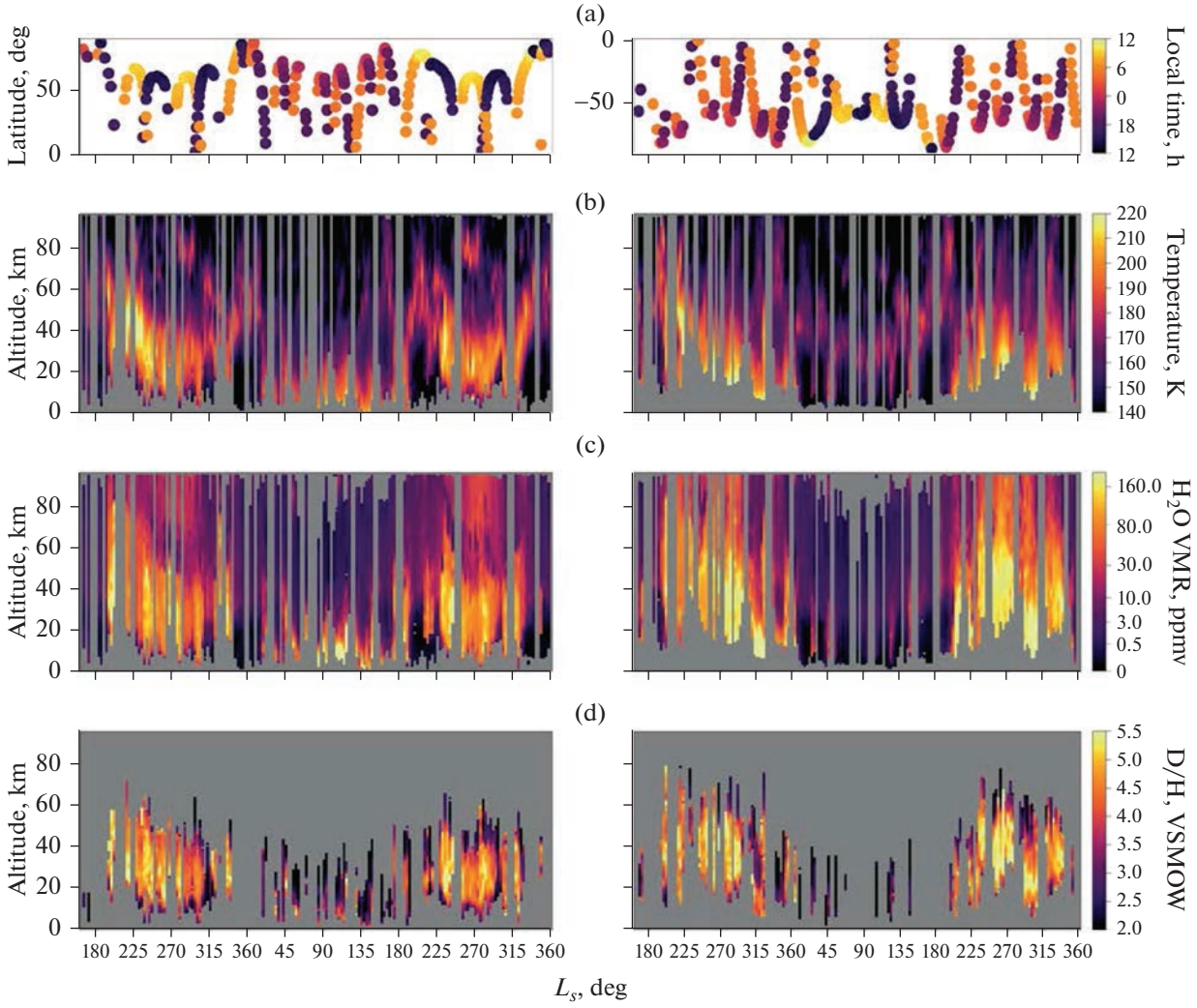

Рис. 2. Вертикальные профили, полученные по данным ACS/TGO, в зависимости от высоты и солнечной долготы для Северного (левые панели) и Южного (правые панели) полушарий Марса: (a) широты и местное время наблюдений солнечного затмения; (b) температура воздуха; (c) объемное соотношение водяного пара (VMR); (d) отношение D/H в водяном паре по Венскому стандарту средней океанской воды (VSMOW) с погрешностями меньше 1. Рисунок из [Alday et al., 2021a].

производит температуру, поля водяного пара и HDO [Fedorova et al., 2020; Alday et al., 2021a], давая хорошую основу описания цикла D/H. Сравнение также подчеркнуло важность учета перенасыщения (см. раздел 3.1), возникающего в результате микрофизических процессов в облаках водяного льда, для правильного моделирования водяного пара и отношения D/H. [Rossi et al., 2021] использовали эту модель для изучения влияния ГПБ 34 MY на HDO. В их результатах содержание HDO на высоте 100 км во время пыльной бури было в среднем на 40% больше, чем обычно в это время года, что позволяет уточнить оценки общих потерь воды.

Следующий блок исследований связан с переходной областью атмосферы из термосферы в экзосферу и потерями кислорода. Шематович [Шематович, 2021] рассмотрел процессы образования, кинетики и транспорта надтепловых атомов кислорода во время протонных сияний на Марсе. Такие спорадические события, вызванные выпадением энергичных атомов водорода, наблюдались приборами MAVEN. Для определения источников надтеплового кислорода они учли проникновение протонов в дневную атмосферу за счет перезарядки в водородной короне. Столкновения как дополнительный источник горячих атомов кислорода учитывались и в работах [Шематович и др., 2019, 2021; Шематович и Калиничева, 2020]. Оценки потери атомарного кислорода во время протонных сияний были в пределах $(3.5–5.8) \times 10^7$ см$^{-2}$ с$^{-1}$, что сравнимо с потерями кислорода за счет фотохимических реакций. Сле-

довательно, поток выходящих горячих атомов кислорода, вызванный выпадением протонов, может стать доминирующим во время экстремальных солнечных явлений, солнечных вспышек или корональных выбросов, и способствовать потерям атмосферы в долгосрочном масштабе.

3.3. Структура и циркуляция атмосферы

Прибор ACS на борту ExoMars TGO способен также измерять температуру и плотность атмосферы Марса различных участках инфракрасного спектра. Тепловой инфракрасный канал ACS названный в честь проф. В.И. Мороза (ACS TIRVIM) измерял спектры в надир в спектральном диапазоне 7.7–16.7 мкм (600–1300 $см^{-1}$) с марта 2018 г. по декабрь 2019 г., охватив практически полный марсианский год. Преимуществом орбиты TGO является возможность наблюдать суточный цикл за сравнительно короткий период 54 солов (сол – марсианский день). Из измеренных спектров можно восстановить вертикальные профили температуры от поверхности до 60 км (по полосе CO_2 15 мкм), температуры поверхности и оптические толщины столба аэрозоля (пыль поглощает в диапазоне ~9 мкм и водяной лед ~12 мкм). Власов [Vlasov et al., 2022] сообщили о термической структуре атмосферы и запыленности столба во время ГПБ 34 MY, мониторинг которой осуществлялся при Ls = = 182–212°. Они зафиксировали эволюцию ГПБ и реакцию атмосферы на изменение содержания пыли. Шторм вызвал асимметричный нагрев атмосферы, преимущественно в южном полушарии, и изменил суточный контраст термической структуры. Также на пике ГПБ было отмечено снижение суточного контраста поверхностной температуры.

Авторы [Guelret et al., 2021] описали альтернативный алгоритм восстановления параметров атмосферы из спектров ACS TIRVIM. Аналогичным образом они получили вертикальный профиль температуры атмосферы на высотах до 50 км, температуру поверхности и общую оптическую толщину пыли и водяного льда. Отмечена неоднозначность оценок атмосферных параметров в зависимости от времени суток: 54-соловый цикл наблюдений смешивал суточный сигнал с сезонными изменениями. Алгоритм восстановления был протестирован на предмет его надежности и различных ошибок, в частности, связанных с содержанием аэрозолей. Была проведена перекрестная проверка данных о температуре атмосферы и оптической толщине пыли с тысячами совмещенных профилей Mars Climate Sounder (MCS/MRO). Небольшие расхождения между температурами TIRVIM и MCS могут объясняться разницей вертикального разрешения двух методов измерения. Днем оптическая толщина пыли, измеренная с помощью TIRVIM и MCS совпадала хорошо, в то время как над холодной поверхностью (при низком температурном контрасте между поверхностью и атмосферой), верную оптическую толщину из данных TIRVIM восстановить не удается.

В [Fan et al., 2022] использовали профили атмосферы, разрешенные относительно местного времени из [Guerlet et al., 2021], для изучения тепловых приливов. Были отобраны данные вблизи северного летнего солнцестояния при Ls = 75°–105° 35 MY. Разложение суточных аномалий температуры на моды показало выраженный суточный прилив, заметный полусуточный прилив и суточную волну Кельвина с амплитудами 5, 3 и 2.5 K, соответственно, в диапазоне давлений от десятков до сотен Па. Результаты в целом согласуются с PCM, но с заметными более ранними фазами суточных (~1 ч) и полусуточных (~3 ч) приливов.

В [Young et al., 2022] использовали надирные данные ACS TIRVIM для ассимиляции в PCM. Период ассимиляции составил Ls = 182°–211° MY 34, начало и пик ГПБ 2018 г. Сначала они ассимилировали температурные профили TIRVIM для обновления профилей температуры и пыли, а затем оптические толщины пыли для обновления общего содержания пыли в столбе. В пределах выборки ассимиляция показала разумное согласие с наблюдениями TIRVIM, профилями температуры и пыли MCS, а также с суточным циклом приземного давления, измеренным Curiosity. Ассимиляция позволила реалистично восстановить ветры. В пик шторма усилилась меридиональная циркуляция, в среднеширотных зональных струях развилась асимметрия 125 м/с, суточный прилив ослаб на экваторе и усилился до 10–15 K в средних широтах, повсеместно усилился полусуточный прилив.

Спектроскопия солнечных затмений в инфракрасных полосах поглощения CO_2 так же позволяет восстанавливать профили давления и температуры. Один из способов получения профиля состоит в том, чтобы из концентрации молекул CO_2 получить гидростатическую аппроксимацию профиля атмосферы, как это было сделано [Alday et al., 2021a] со спектрами ACS/TGO в диапазоне 2.7 мкм. Более точную оценку профиля использовали [Fedorova et al., 2020, 2023] по данным в диапазоне 1.43 мкм и [Belyaev et al., 2021, 2022] – на 2.7 мкм. В этих работах вначале был получен профиль плотности на основе поглощения, одновременно температура оценивалась на основе вращательной структуры полос CO_2. Из этих данных строился профиль атмосферного давления и затем давление, определенное на уровне с наименьшими погрешностями, использовалось для построения профиля в предположении гидростатического равновесия. Средняя молекулярная масса атмосферы была взята из MCD 5.3.

Используя сильную полосу поглощения CO_2 в диапазоне 2.7 мкм, измеренную с высоким разрешением спектрометром ACS MIR, [Belyaev et al., 2022] получили тепловую структуру атмосферы в беспрецедентном диапазоне высот, от 20 до 180 км, в течение 1.5 MY, с середины 34 MY до конца 35 MY. Они представили широтную и сезонную климатологию структуры атмосферы, изучили сезонный ход минимума мезопаузы (на высотах 70–145 км) и гомопаузы, изменяющийся от 90–100 км в афелии до 120–130 км в перигелии. Высота гомопаузы оценивалась в предположении постоянного вихревого перемешивания 10^7 см^2/с на высоте 35 км.

В [Starichenko et al., 2021] разработали метод извлечения внутренних гравитационных волн (волн плавучести, ГВ) из базы данных температурных профилей ACS MIR. Впервые обнаружены волновые эффекты с характерным затуханием ГВ в области гомопаузы вдоль всего столба атмосферы.

В двух исследованиях рассмотрено влияние ГПБ 34 MY на динамику марсианской атмосферы посредством моделирования MGCM с ассимиляцией температурных полей ACS. В [Streeter et al., 2021] изучали поведение полярных вихрей, мощных западных струй, изолирующих холодную полярную атмосферу от пыли, воды и химических трейсеров. Они ассимилировали температурные профили MCS/MRO и ACS/TGO [Fedorova et al., 2020] в MGCM. Воздействие пыльной бури было асимметричным, с существенно более слабым южным вихрем. Такая конфигурация усиливает перенос в южную полярную область Марса и меняет распределение пыли и химических трейсеров по долготам. Ражендран [Rajendran et al., 2021] моделировали влияние ГПБ MY34 на суперротацию атмосферы Марса. Это явление определяет динамику атмосфер медленно вращающихся планет, таких как Венера или Титан (см. разделы 2.1 и 5), но и марсианская атмосфера также проявлять суперротацию, в частности, соответствующую струю может возбудить вызываемый пылью нагрев. При моделировании MGCM, в том числе с ассимиляцией температурных профилей MCS и ACS, они обнаружили, что в пике ГПБ суперротация увеличилась в два раза по сравнению с тем же периодом в предыдущем MY. Интересно, что усиление циркуляция началось за 40 солов до наступления ГПБ. Подъем пыли в южных средних широтах и тропиках вызвал сильные восточные ветры на высоте выше 60 км за счет переноса импульса тепловыми приливами.

3.4. Состав и химия атмосферы

Метан

Основные результаты ACS/TGO по метану и обнаружению малых составляющих рассмотрены [Korablev, 2021]. Сообщения об обнаружении метана в марсианской атмосфере послужили поводом для многочисленных исследований, направленных на подтверждение или объяснение его присутствия на планете, где этот газ мог бы иметь биогенное или геофизическое происхождение. В целом, обнаружения показывают относительное содержание метана в диапазоне от 0.2 (измерения в кратере Гейла, SAM-TLS/Curiosity [Webster et al., 2018]) до 45 частей на миллиард по объему, ppbv, (наземные наблюдения [Mumma et al., 2009]) и сильно изменчивы. В частности, для Гейла сформировалось понятие о кратере, в котором происходят периодические выбросы, или через который время от времени проходят струи метана, в сочетании с непрерывным выделением газа [напр., Moores et al., 2019]. Однако ни одна из частей этой глобальной картины метана пока не подтверждается измерениями TGO.

Благодаря спектральной разрешающей силе $\lambda/\Delta\lambda \approx 30000$ и отношению сигнал/шум для неослабленных солнечных спектров ≥10 000, канал ACSMIR предлагает уникальные характеристики для обнаружения малых газов. Первые же спектры канала MIRACS в диапазоне длин волн, где должны быть наиболее сильные особенности метана (рис. 3), снизили верхний предел на порядок ниже фоновых значений SAM-TLS. В спектрах видны слабые линии поглощения водяного пара и других компонентов атмосферы (см. ниже), но не соседние детали метана. Первая публикация ACS установила верхний предел в 0.05 ppbv [Korablev et al., 2019]; затем предел 0.06 ppbv был установлен по данным NOMAD/TGO [Knutsen et al., 2021]. Более длинный ряд данных ACS, охватывающий два марсианских года 34–35 MY, привел к улучшению верхнего предела до 0.02 ppbv [Montmessin et al., 2021]. Измерениям TGO в районе кратера Гейла был присвоен наивысший приоритет. К сожалению, на низких широтах аэрозоли (пылевые и конденсационные облака) затрудняют измерения методом солнечных затмений на высотах, где достигается максимальная чувствительность. Наиболее строгие верхние пределы ACS вблизи кратера Гейла, установленные в сезон афелия, когда активность пыли на Марсе минимальна, составили 0.065–0.2 ppbv.

Основная трудность проблемы метана заключается в явном противоречии между “фоновым” уровнем метана, зафиксированным Curiosity, и верхними пределами TGO, на порядок ниже. При времени жизни 100–300 лет метан должен накапливаться в атмосфере, где атмосферное перемешивание за несколько месяцев полностью распределяет его по планете. Полагая кратер Гейла единственным источником, малоправдоподобный сценарий, и только фоновый метан (0.41 ppbv в среднем), [Korablev et al., 2019] оценили время накопления, после которого TGO сможет обнару-

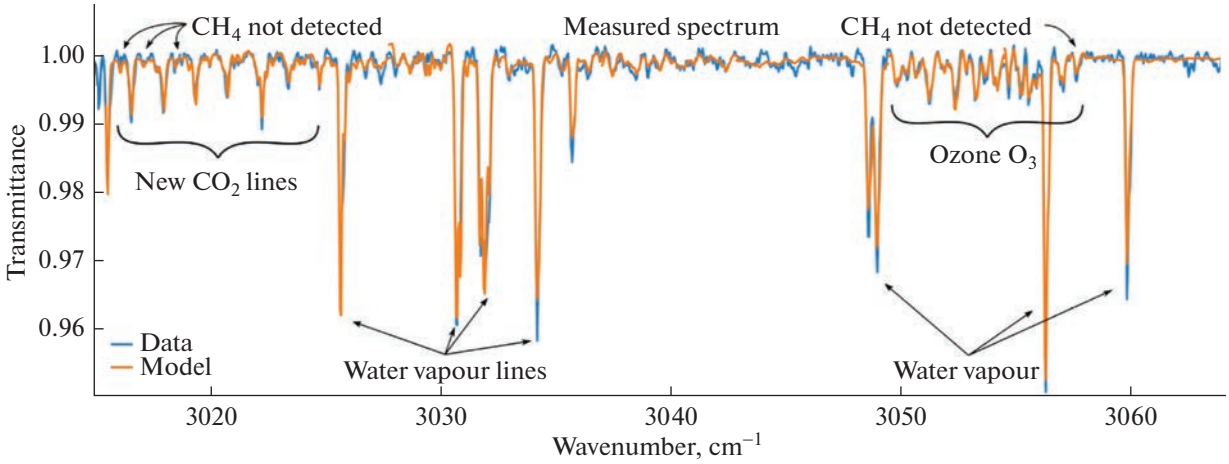

Рис. 3. Спектр ACSMIR/TGO, включающий нескольких порядков дифракции, показывающий отсутствие метана и вновь обнаруженные линии CO_2 и озона. По [Olsen et al., 2020; Trokhimovskiy et al., 2020]. Графика ESA.

жить метан, в 24 года. Принимая во внимание возможность многих источников, выбросы, зафиксированные Curiosity [Webster et al., 2018, 2021], и улучшенный верхний предел TGO [Montmessin et al., 2021], время накопления метана сократится еще больше. Мезомасштабное моделирование процесса разноса метана при условии верхнего предела TGO показало, что не только Гейл должен быть единственным источником на планете, но и этот источник должен занимать в кратере строго определенное место, чтобы удовлетворительно объяснить наблюдаемый фон и выбросы [Webster et al., 2021; Luo et al., 2021]. Другая гипотеза [Moores et al., 2019] объясняет накопление метана в кратере уменьшением высоты планетарного пограничного слоя в ночное время (когда проводились измерения SAM-TLS/Curiosity), что ограничивает перемешивание. Такой сценарий в принципе подтверждают недавние (35 MY) дневные измерения TLS [Webster et al., 2021], показавшие только верхние пределы. На временном масштабе десятков лет это может увеличить время накопления метана или допустимую площадь просачивания. Тем не менее, чтобы соответствовать верхним пределам TGO, необходим до сих пор неясный механизм быстрого разрушения метана, который, в то же время, не влиял бы на химические превращения других активных составляющих марсианской атмосферы (CO, O_3, см. ниже). В целом вопрос о метане на Марсе остается открытым.

Озон и CO

Озон (O_3) является важным индикатором химии марсианской атмосферы. Ранние измерения показали, что в атмосфере наблюдается значительный дефицит продуктов диссоциации CO_2 (CO, O_2, O_3, O), распадающегося под действием солнечного света на длинах волн ≤200 нм. Фотохимическое моделирование показало, что рекомбинация углекислого газа контролируется следовыми количествами воды, различными формами нечетного водорода (H, OH, HO_2). Тем не менее, уравновесить рекомбинацию углекислого газа оказалось непросто, оставляя потенциально важным вклад гетерогенной химии. Современные модели [напр., Daerden et al., 2019; Lefèvre et al., 2021] требуют детальных данных по составу атмосферы, одновременных и совмещенных измерений продуктов диссоциации (O_3, CO) и водяного пара. Такие данные появились в результате работы SPICAM/MarsExpress и ACS/TGO.

Озон образуется в результате фотолиза CO_2 и разрушается радикалами водорода (HOx), выделяющимися в результате фотолиза и окисления водяного пара, предполагая антикорреляцию между озоном и водяным паром. [Lefèvre et al., 2021] сравнили одновременные наблюдения обеих составляющих SPICAM (в надир) в течение четырех MY с результатами PCM. В высоких широтах обнаружена явная антикорреляция содержания O_3 и H_2O в столбе атмосферы, но вблизи экватора такая зависимость исчезала. Модель, учитывающая лишь химию газовой фазы, занижала наблюдаемый озон примерно в 2 раза, и устранить ошибку не помогли ни учет низкотемпературных сечений поглощения CO_2 ни корректировка скоростей реакций. Введение гетерогенных процессов потери HO_x на ледяных облаках существенно улучшило совпадение в высоких северных широтах.

Для изучения вертикального распределения O_3 использованы наблюдения звездных и солнечных затмений УФ-спектрометром SPICAM в течение четырех MY [Määttänen et al., 2022]. Звезд-

ные затмения проводились на ночной стороне, тогда как солнечные затмения относятся к терминатору, что позволяет изучать суточные изменения этого фотохимически-активного компонента атмосферы. Озоновый слой низких и средних широт, формирующийся северной весной, картирован в обоих полушариях, исследована разница между ночными и терминаторными измерениями. Зимой в южном полярном вихре обнаружены следы средневысотного озонового слоя, который уже наблюдался ранее в данных SPICAM. Во время северной полярной весны SPICAM наблюдал верхнюю часть нижнего озонового слоя на высоте ≥10 км.

Эта самая нижняя часть профиля озона систематически изучена по данным спектрометра ACS/TGO MIR, который зарегистрировал инфракрасное поглощение O_3 на длине волны 3.3 мкм (рис. 3; впервые опубликовано [Olsen et al., 2020]). [Olsen et al., 2022] представили климатологию профилей озона, охватывающую вторую половину 34 MY, весь 35 MY и начало 36 MY. В период равноденствия в обоих полушариях и южной зимой содержание O_3 ниже 30 км было 200–500 ppbv. Во время более теплого и влажного южного лета, в перигелии, O_3 не обнаружен. Северным летом уровень водяного пара был ограничен высотой ≤10 км, и O_3 наблюдался выше, на высотах 20–30 км. Сравнение O_3 с профилями водяного пара и температуры подтвердило антикорреляцию H_2O и O_3. Как и в работе [Lefèvre et al., 2021], наблюдаемое содержание O_3 превышает PCM в 2–6 раз, указывая на существенные погрешности в скоростях фотохимических реакций с нечетным водородом. Недостаток озона в модели означает, что каталитическое действие HO_x, переоценено, что перекликается с давней проблемой недооценки CO в фотохимических моделях Марса. Аналогичные трудности возникают при моделировании O_3 и HO_x в верхней стратосфере и мезосфере Земли.

По данным ACS/TGO получены первые профили CO в зависимости от высоты. Угарный газ не конденсируется, и его относительное содержание меняется по мере того, как основная компонента атмосферы (CO_2) сезонно конденсируется на полярных шапки и сублимирует из них. Фотохимическая продукция CO уравновешивается реакцией с OH, в результате которой CO преобразуется в CO_2. Таким образом, CO является чувствительным индикатором катализируемого OH химического процесса, стабилизирующего CO_2-атмосферу. До этого измерялся только вертикально интегрированный столб CO, без информации о верхних слоях атмосферы, где производится CO. Профили CO по данным канала ACS MIR в диапазоне 2.35 мкм на высотах от 10 до 120 км до и во время ГПБ MY 34 показали заметное снижение CO, что объясняется его окислением в более влажных условиях ГПБ, способствующих увеличению содержания OH на больших высотах [Olsen et al., 2021a].

Полная климатология вертикального распределения CO от 0 до 80 км была получена в ближнем ИК-диапазоне по данным ACS NIR в более слабой полосе на 1.6 мкм [Fedorova et al., 2022]. Впервые изучены сезонные и широтные изменения распределения CO по высоте. Были отмечены следующие новые особенности: 1) обогащенный слой CO на высоте 10-20 км в южных полярных районах в конце зимы, указывающий на активный процесс конденсации CO_2; 2) увеличение относительного содержания в 4–5 раз выше 50 км в период равноденствия, свидетельство переноса CO; 3) снижение выбросов CO в период ГПБ 34 MY, связанное с влиянием водяного пара на скорость потерь CO и его преобразование в CO_2. Среднее содержание CO составило ~950 ppmv, выше, чем измерено Curiosity, и ближе к другим результатам дистанционного зондирования.

Открытие хлороводорода (HCl) и другие малые составляющие

Впервые с момента обнаружения метана в атмосфере Марса обнаружено новое химическое соединение. Хлороводород (HCl) уверенно идентифицирован по 12 линиям в спектрах ACS/TGO MIR (рис. 4) [Korablev et al., 2021]. Обнаружение было подтверждено по данным NOMAD/TGO. Относительное содержание HCl достигает 4 ppmv, значительно превышая верхние пределы, установленные ранее средствами наземной и внеатмосферной астрономии (≤0.3 ppmv). Хлороводород появился после ГПБ 34 MY; вне пылевого сезона его содержание оставалось ниже 0.1 ppmv, разрешая кажущееся противоречие.

Хлор обилен на поверхности Марса в форме NaCl или перхлоратов, он был также обнаружен в составе поверхностной пыли. Обе формы могут достигать нижних слоев атмосферы во время пыльной бури, и быть источником Cl. Возможные механизмы образования HCl могут включать 1) процессы окисления на поверхности пылевого аэрозоля при увеличении содержания окислителей, таких как OH и HO_2, в процессе ГПБ; 2) выделение хлора из пыли в результате окисления кислотами, аналогично земным процессам; 3) мобилизация пылевых частиц, ранее не подвергавшихся воздействию УФ, процессами сальтации во время ГПБ; 4) волатилизация хлоридных минералов электрическими разрядами.

Более длительный мониторинг HCl с помощью ACS, охватывающий два сезона перигелия 34–35 MY [Olsen et al., 2021b], показал, что HCl вновь появился в аналогичных количествах в течение следующего марсианского года 35 MY, хотя

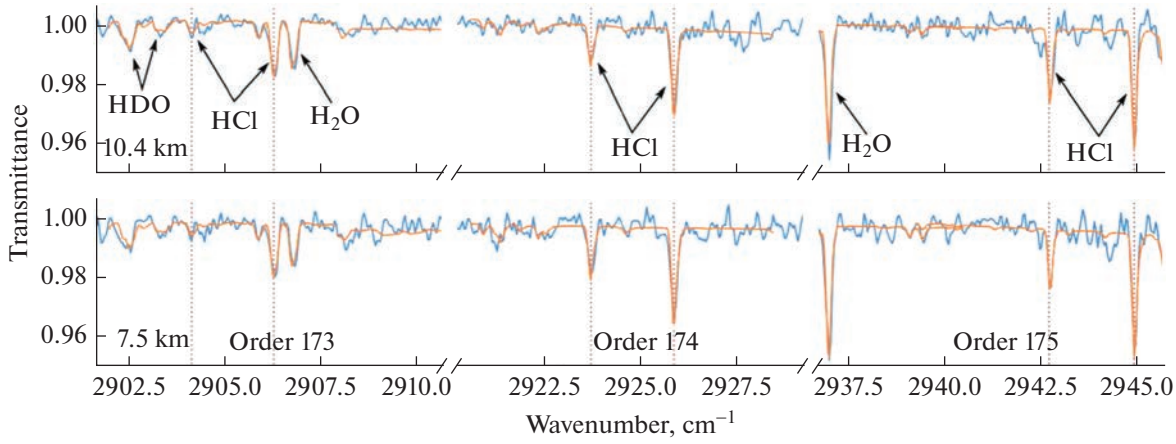

Рис. 4. Спектры ACS/TGO на двух высотах, демонстрирующие обнаружение линий HCl. Адаптировано из [Korablev et al., 2021].

активность пыли была значительно ниже и ГПБ не наблюдалась. Кроме того, несколько достоверных обнаружений в афелии (Ls = 120°, при небольшом количестве пыли) подвергают сомнению корреляцию с пылью и гипотетически могут быть объяснены дегазацией поверхности. Данные NOMAD показали аналогичное сезонное поведение, но не обнаружения в афелии [Aoki et al., 2021]. С точки зрения газовой химии HCl должен быть стабильным резервуаром хлора в нижних слоях атмосферы Марса [Krasnopolsky, 2022]. Наблюдаемая изменчивость предполагает пока необъясненную потерю хлороводорода путем химических или физических процессов. Возможно, это связано с поглощением HCl на поверхности частиц облаков из водяного льда, присутствующих на протяжении всего запыленного периода, когда наблюдалась HCl ([Luginin et al., 2020]; см. раздел 3.5). Пиковые концентрации HCl на Марсе сопоставимы с концентрациями в верхней стратосфере и мезосфере Земли. Цикл разрушения озона, хорошо известный в стратосфере Земли, должен работать и на Марсе. В целом, источники и стоки HCl, а также его роль в химии марсианской атмосферы остаются гипотетическими. Открытие хлороводорода предлагает пересмотр фотохимии Марса, описание новых гетерогенных реакций. Для количественной оценки скорости образования и разрушения HCl необходимы новые лабораторные исследования и моделирование.

Высокое качество измеренных спектров ACS/TGO позволило оценить соотношение изотопологов $H^{37}Cl$ и $H^{35}Cl$ [Trokhimovskiy et al., 2021]. В отличие от других летучих веществ на Марсе, отношение $^{37}Cl/^{35}Cl$ оказалось близко к земному значению. В среднем атмосфера Марса может быть слегка обеднена ^{37}Cl ($-7 \pm 20‰$), как и поверхность Марса. Этот результат поддерживает гипотезу образования HCl из хлорсодержащей пыли, и позволяет предположить, что изотопы хлора не задействованы в долговременных циклах обмена между поверхностью и атмосферой.

Спектры высокого разрешения ACS/TGO MIR в диапазоне 2.2–4.2 мкм были проанализированы с целью поиска новых составляющих атмосферы Марса. Поиски серосодержащих газов, в том числе SO_2, которые могли бы указывать на вулканическую дегазацию в 34–35 MY, дали отрицательный результат [Braude et al., 2021]. Верхние пределы их концентраций по 1σ, установленные для наиболее оптимальных условий чувствительности, составили: $SO_2 \leq 20$ ppbv (диапазон 2481–2492 $см^{-1}$), $H_2S \leq 15$ ppbv (3827–3833 $см^{-1}$) и $OCS \leq 0.4$ ppbv (3460–3500 $см^{-1}$), последний результат заметно улучшает предыдущие попытки обнаружения. Кроме того, установлен верхний предел содержания фосфина на Марсе. Недавнее обнаружение этого газа на Венере привлекло большое внимание и вызвало жаркие споры. Спектральный диапазон ACS захватывает несколько линий поглощения PH_3, интенсивность которых сравнима с линиями CH_4. Особенность PH_3 в диапазоне 2395–2406 $см^{-1}$ не была обнаружена в течение года, верхние пределы составили 0.1–0.6 ppbv [Olsen et al., 2021c].

3.5. Пыль и облака

Глобальная пылевая буря Марса 2018 г (MY 34) наблюдалась шестью орбитальными аппаратами и двумя марсоходами. Ряд исследований, посвященных этой особенности марсианского климата, собраны в специальном выпуске журнала JGR-Planets под редакцией, в числе других, А.А. Федоровой [Guzewich et al., 2020]. Данные ACS/TGO дополняют эти исследования, предоставляя климатологию профилей облаков пыли и водяного льда из наблюдений солнечных затмений всеми кана-

лами (см. рис. 1) [Fedorova et al., 2020; Stcherbinine et al., 2020], свойства пылевых и ледяных частиц [Luginin et al., 2020] и мониторинг развития ГПБ из надирных наблюдений ACS TIRVIM [Vlasov et al., 2022].

Федорова [Fedorova et al, 2020] получили концентрации аэрозолей из данных солнечных затмения ACS TIRVIM с добавлением, где возможно, данных каналов NIR и MIR. Профили экстинкции были получены на 19 длинах волн в спектральном диапазоне 2–6 мкм, вне полос сильного газового поглощения. Характерная 3-микронная спектральная полоса водяного льда позволила разделить конденсационные облака и минеральную пыль или наложить ограничения на промежуточное состояние и определить одномодовое или бимодальное распределение частиц по размерам (в приближении Ми). Во время ГПБ пыль достигала высот более 60 км, а облака наблюдались на высотах до 100 км, перекрывая пыль. В [Stcherbinine et al., 2020] использовали спектры солнечных затмений ACS MIR, включая диапазон 3 мкм, где поглощает водяной лед, до и во время ГПБ MY 34. ACS MIR чувствителен к среднему размеру частиц (≤2 мкм). Отмечено смещение максимальной высоты облаков из водяного льда с ~60 км до ГПБ до ≥90 км во время шторма. На этих экстремальных высотах чаще наблюдались частицы небольшого размера (<0.3 мкм). В целом размер частиц уменьшался с высотой, тогда как во время ГПБ на высотах 50–70 км были обнаружены более крупные частицы водяного льда (≥1.5 мкм). Чтобы ограничить распределение частиц обоих типов аэрозоля по размерам, [Luginin et al., 2020] использовали более широкий спектральный диапазон 0.7–6 мкм, сочетая данные солнечных затмений ото всех трех каналов ACS. Были определены эффективный радиус, эффективная дисперсия, концентрация частиц и их массовая концентрация за период ГПБ. Эффективный радиус частиц пыли и водяного льда был в пределах 0.1–3.5 мкм и 0.1–5.5 мкм соответственно. Самые крупные аэрозольные частицы (>2.5 мкм для пыли и >3.5 мкм для водяного льда) были обнаружены ниже 10 км до начала и во время фазы затухания ГПБ. Во время пика ГПБ пыль достигла 85 км, эффективный радиус составлял 1–2 мкм при концентрации 0.1–1 $см^{-3}$ и эффективной дисперсии 0.1. На высотах 50–100 км часто наблюдались изолированные слои из частиц водяного льда размером 0.1–1 мкм. Ниже 50 км пыль была смешана со льдом. Приведенные выше результаты свидетельствуют о том, что ГПБ существенно меняет процессы формирования и свойства высотных облаков водяного льда, по сравнению с обычной пылевой активностью в перигелии.

Наряду с температурой атмосферы и поверхности (см. раздел 3.3) [Vlasov et al., 2022] картировали содержание пыли в атмосфере по поглощению в полосе силикатов на 9 мкм в надирных спектрах ACS TIRVIM, наблюдая развитие ГПБ (рис. 5). Максимальная оптическая толщина пыли в тепловом диапазоне превысила 3. Шторм распространялся до 60° как на север, так и на юг.

Мониторинг аэрозолей в течение более длительного периода, охватывающего два MY, был продолжен в работах по перенасыщению водяного пара и облакам водяного льда. Щербинин [Stcherbinine et al., 2022] расширили анализ данных ACS MIR на период от начала миссии Ls = = 163° 34 MY до Ls = 180° 36 MY. Типичная высота облаков летом и зимой различается на 20–40 км. Летом в средних широтах они достигли 80 км. Используя быстрый широтный дрейф солнечных затмений в некоторые периоды наблюдений, установлено, что облака в полярных регионах наблюдались как правило на 20–40 км ниже, чем в средних широтах. Сравнение ГПБ 34 MY с тем же сезоном 35 MY показало более высокие облака во время ГПБ и их более равномерное распределение по широте. Сравнение с PCM показало, что модель недооценивает вертикальную протяженность облаков на 10–20 км. Федорова [Fedorova et al., 2023] для поддержки своего исследования перенасыщения водяного пара (см. Раздел 3.1) построили профили оптической толщины пылевых и ледяных облаков в зависимости от широты. Сечения были получены по той же методике, что и в [Fedorova et al., 2020] для 30° бинов Ls от Ls = 180° 34 MY до конца 35 MY.

Ряд исследований касается проблемы пылевых вихрей на Марсе, включая теоретические оценки, интерпретацию данных посадочных аппаратов и статистический анализ. Курганский [Kurgansky, 2019] связали статистику перепадов давления, наблюдаемую метеостанцией на поверхности, с фактической статистикой центральных перепадов давления в конвективных вихрях, чтобы оценить распределение всей популяции вихрей. Применение этой статистики к метеорологическим данным (измерения давления) спускаемого аппарата InSight выявило беспрецедентно высокое количество конвективных вихрей на $км^2$ в районе посадки InSight [Kurgansky, 2021]. [Kurgansky, 2020] рассмотрели радиальную протяженность конвективного вихря/пылевого дьявола на основе записей давления одной станции и построили полное частотно-размерное распределение вихрей, наблюдаемых Curiosity. Теоретически обоснованы экспоненциальные и степенные аналитические представления распределений конвективных вихрей в координатах размер-частота и интенсивность-частота и рассмотрено их применение к Земле и Марсу [Kurgansky, 2022]. Связь диаметра вихря с обуховским масштабом длины в пограничном слое планеты позволила описать всплеск конвективной вихревой активности, наблюдавшийся северной осенью в районе

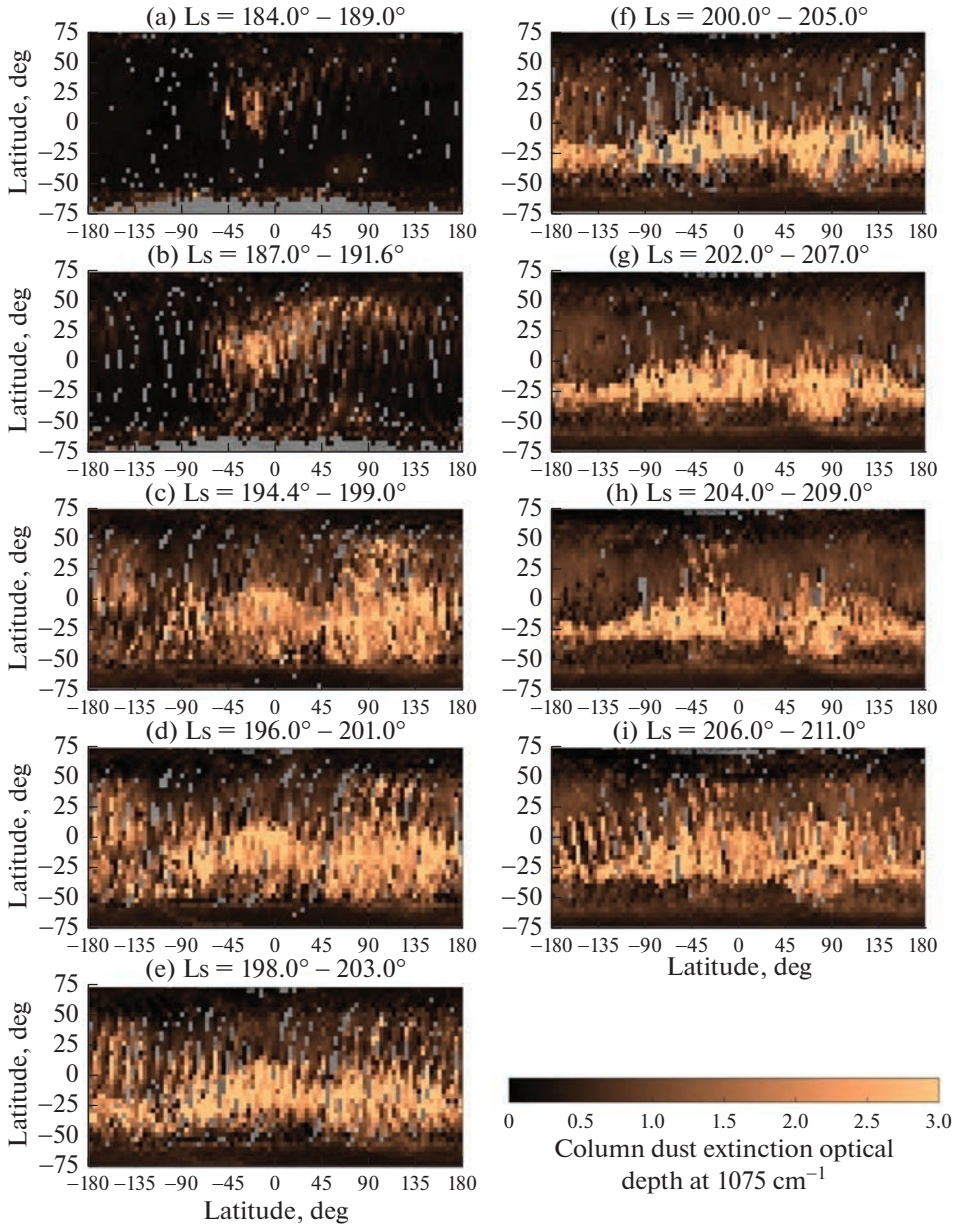

Рис. 5. Развитие ГПБ MY 34 по наблюдениям ACS TIRVIM. Карты оптической толщины пыли на 1075 см$^{-1}$, усредненные за сутки в девяти бинах по 5° Ls. Рисунок из [Vlasov et al., 2022].

посадки InSight. [Извекова и др., 2020] рассмотрели гидродинамическое подобие конвективных вихрей в земной и марсианской атмосферах.

4. ВНЕШНИЕ ПЛАНЕТЫ

Модель общей циркуляции, разработанная ранее для Венеры, была адаптирована для атмосферы Титана [Мингалев и др., 2019]. Модели основана на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики. Скорости нагрева и охлаждения рассчитывались в релаксационном приближении. Пространственное разрешение, в 3–5 раз лучшее, чем в предыдущих моделях атмосферы Титана, позволило изучить детали мезомасштабной циркуляции и различные волновые процессы, в частности, внутренние гравитационные волны (ГВ).

В работе [Brown et al., 2022] внутренние гравитационные волны в атмосфере Сатурна были извлечены методом, описанным для Марса (раздел 3.3), из температурных профилей, полученным по данным УФ-спектрометра Cassini. Наблюдалось распространение пакетов ГВ вверх, их насыщение и распад. Анализ показал, что ГВ увлекают потоки в направлении экватора, способствуя пе-

реносу тепла из авроральных зон и перераспределению энергии по широтам. Результаты помогают объяснить, почему термосфера Сатурна (и других внешних планет) горячее, чем следует из радиационного баланса.

Краснопольский [Krasnopolsky, 2020a] адаптировал модель, разработанную для атмосферы и ионосферы Титана, к Плутону, который наблюдался во время пролета New Horizons. Входными данными были поверхностное давление 11.5 мкбар и средний температурный профиль по данным радио-затмений и солнечных/звездных затмений в УФ-диапазоне. Модель учитывала более 400 реакций и охватывала высоты вплоть до экзобазы на 1600 км. Результаты включают влияние дневной ионосферы на нейтральный состав, оценки потерь водорода и метана, конденсации и полимеризации углеводородов и нитрилов. Обнаружено, что сезонные колебания метана существенно влияют на фотохимию Плутона и Тритона. Следующая работа [Krasnopolsky, 2020b] позволила привести фотохимическую модель в соответствие с обнаружением метилацетилена C_3H_4 и объяснить измеренное отношение $^{14}N/^{15}N$ в HCN, гораздо большее значение которого $HC^{14}N/HC^{15}N > 125$ на Плутоне выглядело странно по сравнению с 60 на Титане. Анализ подтвердил, что основным процессом фракционирования изотопов азота является предиссоциация N_2 на длине волны 80–100 нм. Наблюдаемая двукратная разница может быть обусловлена диффузионным обеднением тяжелого изотопа HCN и предиссоциацией N_2. На Плутоне оба процесса происходят значительно выше гомопаузы на высоте ~100 км, тогда как на Титане $HC^{14}N/HC^{15}N$ наблюдались на высоте 100–500 км, предиссоциация происходит ≤1000 км, и то и другое ниже гомопаузы на высоте 1000 км, и диффузионного обеднения не происходит. [Krasnopolsky, 2020b] также оценили время жизни N_2 в атмосфере Плутона и скорость его современной диссипации, главным образом, за счет фоторазложения. Вычислено фракционирование изотопов во N_2 льде, с учетом образования и конденсации нитрилов, диффузионного разделения и фракционирования при тепловом выходе.

5. СПЕКТРОСКОПИЯ, СВЯЗАННАЯ С ПЛАНЕТАРНЫМИ АТМОСФЕРАМИ

Атмосфера Марса, наблюдаемая с высоким спектральным разрешением, может выступать как гигантская лабораторная кювета, помогающая углубить знания в области CO_2-спектроскопии. В спектральном диапазоне, используемом для поиска метана в спектрах ACS/TGO MIR (2900–3300 $см^{-1}$; см. раздел 3.4) были обнаружены новые поглотители. Особенности, препятствующие обнаружению метана, были отнесены к озону [Olsen et al., 2020] и линиям CO_2, отсутствующим в спектроскопических базах данных [Trokhimovskiy et al., 2020], см. рис. 3.

Частоты 30 наблюдаемых линий совпали с теоретически рассчитанными P-, Q- и R-ветвями магнитодипольной или электроквадрупольной полосы основного изотополога CO_2 [Perevalov et al., 2021]. Эта полоса ν2 + ν3, запрещенная для электрического дипольного поглощения, ранее никогда не наблюдалась и численно не рассчитывалась. Относительная глубина ветвей говорит о магнитно-дипольной природе полосы [Trokhimovskiy et al., 2020]. Открытие запрещенной системы положило начало дальнейшим исследованиям. [Yachmenev et al., 2021] опубликовали дополнительные теоретические предсказания для электроквадрупольной полосы и приписали электроквадрупольным линиям две слабые особенности в спектрах ACSMIR. [Borkov et al., 2021] нашли, что интенсивности линий обнаруженной полосы в лабораторных спектрах в ~2 раза меньшие, чем в марсианских данных. Аналогичные измерения были выполнены группой из Гренобля [Fleurbaey et al., 2021], измеривших в лаборатории интенсивности как магнитодипольной, так и электроквадрупольной систем и обнаруживших хорошее согласие с [Borkov et al., 2021] относительно магнитного диполя. По итогам этих исследований магнитодипольная система ν2 + ν3 включена в последнюю версию HITRAN 2020 [Karlovets et al., 2021; Gordon et al., 2022].

Рассмотрев колебательный магнетизм в симметричной линейной молекуле, [Kazakov, Vigasin, 2021] поставили под сомнение магнитно-дипольную природу полосы, измеренной в атмосфере Марса или в лаборатории, поскольку ее интегральная интенсивность превышала теоретически ожидаемое значение. [Chistikov, 2023] разрешили кажущееся противоречие, приписав избыточную интенсивность электроквадрупольной системе, многие линии которой перекрываются с линиями магнитного диполя.

Отметим также многочисленные улучшения введенные в HITRAN 2020 в отношении атмосфер планет, включая параметры уширения линий в CO_2, H_2 и He, обновление столкновительного поглощения [Karman et al., 2019; см. также Finenko et al., 2022], внесение изменений в списки линий этана, фосфина, SO и других важных для планетных атмосфер молекул, улучшение описания для высоких температур и т. д.

Другие спектроскопические исследования включают [Deichuli et al., 2022], измеривших параметры линий H_2O в ближнем ИК-диапазоне в CO_2, и уже использованных для анализа воды в атмосфере Марса [Fedorova et al., 2023]. [Gamache et al., 2022] представили расчет внутренних колебательных и вращательных статистических сумм, необ-

ходимых для NLTE-анализа девяти молекул, которые часто наблюдаются в условиях нарушения локального термодинамического равновесия в планетных атмосферах: H_2O, CO_2, O_3, N_2O, CO, CH_4, NO, NO_2 и OH.

6. ВЫВОДЫ

Исследования атмосфер планет за период 2019–2022 гг. во многом опирались на результаты космических проектов ExoMars TGO, Mars Express, Venus Express и Акацуки. Ряд из них, под руководством или при решающем вкладе российских ученых, были отмечены как наиболее важные результаты Института космических исследований (ИКИ) РАН или Научного совета по астрономии РАН. Мы приводим эти результаты ниже, цитируя также некоторые последующие исследования:

– Динамика атмосферы Венеры на нескольких уровнях по данным многоволновых наблюдений Venus Express и Акацуки [Patsaeva et al., 2019; Gorinov et al., 2021; Khatuntsev et al., 2022a, 2022b]. Отслеживание облаков позволило получить поля ветра на четырех уровнях внутри облачного слоя Венеры, соответствующих примерно 48, 55, 60 и 70 км. Перепад высот между уровнями менялся в зависимости от широты и за время измерений. Было обнаружено, что скорость суперротации зависит от местного солнечного времени и широты и отражает крупномасштабную топографию. Меридиональное направление и скорость ветра могут указывать на конфигурацию циркуляции Хэдли на уровне облаков, однако для ее формального описания еще недостаточно данных. В южном полушарии на высоте 70 км наблюдалась полярная (прямая) ветвь ячейки Хэдли главного облачного слоя. Обратная ветвь находилась в районе нижней границы облаков (55 км). В низких широтах данные в диапазоне 1.74 мкм (48 км) позволяют различить фрагмент полярной ветви ячейки Хэдли нижнего облачного слоя.

– Низкий верхний предел содержания метана в марсианской атмосфере, установленный по данным наблюдений ExoMars TGO и противоречащий измерениям Curiosity на поверхности [Korablev et al., 2019; Montmessin et al., 2021]. По наблюдениям ACS/TGO верхний предел содержания метана составил 0.02–0.05 частей на миллиард, что на порядок ниже установленных Curiosity фоновых значений (в среднем 0.48 ppbv). Солнечные затмения TGO зондируют высоты выше 3–15 км, а лучшие верхние пределы достигаются в полярных районах, где атмосфера чище. Измерения в районе кратера Гейла (около экватора) затруднены аэрозольным поглощением, там получены лучшие верхние пределы составляли 0.065–0.2 ppbv. Время перемешивания в атмосфере составляет 1–3 месяца, а время жизни метана ≥300 лет, метан накапливается, и в конечном итоге его должен обнаружить TGO. Единственный способ согласовать два источника данных – это пока неясный процесс быстрого разрушения метана, который не затрагивал бы другие химически-активные соединения атмосферы.

– Распределение и перенасыщение атмосферной воды на Марсе по данным наблюдений ExoMars TGO и Mars Express и выводы относительно диссипации воды в истории планеты [Fedorova et al., 2020, 2021, 2023; Belyaev et al., 2021; Montmessin et al., 2022; Shaposhnikov et al., 2019, 2022]. Потеря воды с Марса происходит в результате ее фотодиссоциации с последующей диссипацией водорода. Чем выше поднимается молекула воды, тем эффективнее идет этот процесс. Наблюдения ACS/TGO впервые документировали вертикальное распределение воды до больших высот (≤120 км). Одновременные измерения температуры, пыли и облаков позволили изучить состояние насыщения водяного пара. В южном полушарии вода достигала больших высот в течение всего сезона перигелия, включая глобальную пыльную бурю и региональный шторм. Обнаружено повсеместное перенасыщение водяного пара, часто наблюдаемое одновременно с облаками. Это значит, что холодная область тропопаузы, препятствующая попаданию воды в верхние слои атмосферы на Земле, на Марсе не работает, и диссипация воды с Марса идет легче, чем считалось ранее.

– Обнаружение и исследование хлористого водорода в атмосфере Марса по наблюдениям ExoMars TGO [Korablev et al., 2021; Olsen et al, 2021b; Trokhimovskiy et al., 2021]. В спектрах ACS/TGO уверенно идентифицированы 12 линий хлористого водорода (HCl) – нового газа в атмосфере Марса. HCl зарегистрирован в количестве 1–4 ppbv в течение ГПБ 34 MY и постепенно исчез после ее окончания. Газ вновь появился в следующем, 35 MY, хотя глобальной пыльной бури не было. Вне пыльного сезона верхние пределы были ≤0.1 ppbv, в согласии с прежними верхними пределами по данным наземных и космических обсерваторий. HCl производится ежегодно в пыльный сезон, вероятно, в результате гетерогенных реакций с участием пыли и водяного пара. Не исключены и источники на поверхности. В отличие от других газов, обогащенных тяжелыми изотопами в процессе атмосферных потерь, изотопное соотношение $H^{37}Cl/H^{35}Cl$ на Марсе оказалось близко к земному, что позволяет предположить, что хлор в HCl не участвует в каких-либо длительных процессах атмосфера-поверхность.

– Распределение и химические взаимодействия угарного газа (CO), а также вертикальная структура атмосферы Марса по данным ExoMars TGO [Olsen et al., 2021a; Fedorova et al., 2022; Belyaev et al, 2022; Starichenko et al., 2021]. По измере-

ниям ACS TGO впервые составлена климатология вертикального распределения окиси углерода (CO) в марсианской атмосфере. Относительное содержание CO меняется, по мере того как сезонно конденсируется и сублимируется основной компонент марсианской атмосферы (CO_2). Впервые наблюдались следующие особенности: 1) обогащенный слой CO толщиной 10–20 км в южных полярных районах в конце зимы, указывающий на активную атмосферную конденсацию, 2) увеличение относительного содержания в 4–5 раз выше 50 км в момент равноденствия, свидетельство переноса воздуха, обогащенного CO, 3) уменьшение содержания CO во время ГПБ 34 MY, связанное с увеличением содержания водяного пара, влияющим на скорость потери CO и его преобразования в CO_2. Вертикальное распределение плотности и температуры атмосферы было восстановлено в рекордном диапазоне высот 10–180 км. Получены сезонные изменения высот мезопаузы и гомопаузы. Впервые вдоль всего столба атмосферы исследованы волновые эффекты, в том числе характерное затухание волн плавучести в области гомопаузы.

Сотрудничество ЕКА и Роскосмоса по посадочной платформе и роверу ExoMars 2022 было прекращено в 2022 г. по причинам, далеким от научных или технических вопросов. Это большая потеря для российской космической науки в целом и планетной метеорологии в частности. Судьба российских научных приборов этого проекта еще решается. Положительным моментом является то, что сотрудничество по первой части проекта, ExoMars TGO продолжается, и миссия обещает продлится долго. В июне 2023 г. проект Mars Express отметил 20-летие запуска, и в настоящее время готовится серия статей, обобщающих результаты миссии за эти годы. Операции Mars Express недавно были одобрены до 2026 года с возможным продлением. Помимо этих двух текущих проектов, подтвержденных исследований, имеющих отношение к планетным атмосферам, до 2029–2031 гг. не планируется. В эти сроки возможен запуск амбициозной миссии Роскосмоса “Венера-Д” [Zasova et al., 2020], включающей орбитальный аппарат с научными приборами, спускаемый аппарат с возможностью проведения атмосферных измерений во время спуска на поверхность и аэростатные зонды, ставящие, среди других задач, оценку обитаемости облачного слоя Венеры [Limaye et al., 2021].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Губенко В.Н., Кириллович И.А., Губенко Д.В., Андреев В.Е., Губенко Т.В. Активность мелкомасштабных внутренних волн в северной полярной атмосфере Венеры путем использования радиозатменных измерений интенсивности сигналов (Λ = 32 см) со спутников Венера-15 и -16 // Астр. Вестн. 2021. Т. 55. № 1. С. 3–12.

Извекова Ю.Н., Попель С.И., Извеков О.Я. К вопросу о расчете параметров вихрей в приповерхностной атмосфере Марса // Астр. Вестн. 2019. Т. 53. № 6. С. 415–422. https://doi.org/10.1134/S0038094619050058

Кораблев О.И. Российские исследования планетных атмосфер в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 158–169. https://doi.org/10.1134/S0001433820020061

Мингалев И.В., Родин А.В., Орлов К.Г. Численное моделирование общей циркуляции атмосферы Титана для условий равноденствия // Астр. Вестн. 2019. Т. 53. № 4. С. 291–308. https://doi.org/10.1134/S0038094619040051

Национальный отчет России по метеорологии и атмосферным наукам в 2019–2022 гг.: XXXVIII Генеральная Ассамблея Международного союза геодезии и геофизики (Берлин, Германия, 11–20 июля 2023 г.) / Ред.: И.И. Мохов, А.А. Криволуцкий. Москва: МАКС Пресс, 2023. 440 с. https://doi.org/10.29003/m3460.978-5-317-07017-5

Шапошников Д.С., Медведев А.С., Родин А.В. Моделирование фотодиссоциации водяного пара в сезон пылевых бурь на Марсе // Астр. Вестн. 2022. Т. 56. № 1.С. 27–35. https://doi.org/10.1134/S0038094622010051

Шематович В.И. Атмосферные потери атомарного кислорода при протонных авроральных событиях на Марсе // Астр. Вестн. 2021. Т. 55. № 4. С. 322–333. https://doi.org/10.1134/S0038094621040079

Шематович В.И., Бисикало Д.В., Жерар Ж.-К., Хубер Б. Кинетическая Монте-Карло модель высыпания протонов и атомов водорода с высокими энергиями в атмосферу Марса с учетом измеренного магнитного поля // Астр. Ж. 2019. Т. 96. № 10. С. 836–846. https://doi.org/10.1134/S1063772919100056

Шематович В.И., Бисикало Д.В., Жилкин А.Г. Влияние вариаций протяженной водородной короны Марса на эффективность перезарядки с протонами солнечного ветра // Астр. Ж. 2021. Т. 98. № 3. С. 232–238. https://doi.org/10.1134/S1063772921030033

Шематович В.И., Калиничева Е.С. Убегание атомов кислорода из атмосферы при протонных полярных сияниях на Марсе // Астр. Ж. 2020. Т. 97. № 7. С. 608–616. https://doi.org/10.1134/S1063772920080089

Alday J., Trokhimovskiy A., Irwin P.G.J., et al. Isotopic fractionation of water and its photolytic products in the atmosphere of Mars // Nature Astron. 2021a.V. 5. P. 943–950. https://doi.org/10.1038/s41550-021-01389-x

Alday J., Wilson C.F., Irwin P.G.J., et al. Isotopic Composition of CO_2 in the Atmosphere of Mars: Fractionation by Diffusive Separation Observed by the ExoMars Trace Gas Orbiter // J. Geophys. Res. (Planets). 2021b. V. 126. id. e06992. https://doi.org/10.1029/2021JE006992

Alday J., Wilson C.F., Irwin P.G.J., et al. Oxygen isotopic ratios in Martian water vapour observed by ACS MIR on

board the ExoMars Trace Gas Orbiter // Astron. Astrophys. 2019. V. 630.id. A91. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936234

Aoki S., Daerden F., Viscardy S., et al. Annual Appearance of Hydrogen Chloride on Mars and a Striking Similarity With the Water Vapor Vertical Distribution Observed by TGO/NOMAD // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48. id. e92506. https://doi.org/10.1029/2021GL092506

Aoki S., Vandaele A.C., Daerden F., et al. Global Vertical Distribution of Water Vapor on Mars: Results From 3.5 Years of ExoMars-TGO/NOMAD Science Operations // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e07231 https://doi.org/10.1029/2022JE007231

Belyaev D.A., Fedorova A.A., Trokhimovskiy A., et al. Thermal Structure of the Middle and Upper Atmosphere of Mars From ACS/TGO CO_2 Spectroscopy // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V.127. id. e2022JE007286. https://doi.org/10.1029/2022JE007286

Belyaev D.A., Fedorova A.A., Trokhimovskiy A., et al. Revealing a High Water Abundance in the Upper Mesosphere of Mars With ACS Onboard TGO // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48. id. e93411. https://doi.org/10.1029/2021GL093411

Bertaux J.-L., Khatuntsev I.V., Hauchecorne A., et al. Influence of Venus topography on the zonal wind and UV albedo at cloud top level: The role of stationary gravity waves // J. Geophys. Res. (Planets). 2016. V. 121. P. 1087–1101. https://doi.org/10.1002/2015JE004958

Borkov Y.G., Solodov A.M., Solodov A.A., Perevalov V.I. Line intensities of the 01111-00001 magnetic dipole absorption band of 12C16O2: Laboratory measurements // J. Molec. Spectr. 2021. V. 376. id. 111418. https://doi.org/10.1016/j.jms.2021.111418

Braude A.S., Montmessin F., Olsen K.S., et al. No detection of SO_2, H_2S, or OCS in the atmosphere of Mars from the first two Martian years of observations from TGO/ACS // Astron. Astrophys. 2022. V. 658. id. A86. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142390

Brown Z.L., Medvedev A.S., Starichenko E.D., et al. Evidence for Gravity Waves in the Thermosphere of Saturn and Implications for Global Circulation // Geophys. Res. Lett. 2022. V. 49. id. e97219. https://doi.org/10.1029/2021GL097219

Chaffin M.S., Chaufray J.-Y., Stewart I., et al. Unexpected variability of Martian hydrogen escape // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. P. 314–320. https://doi.org/10.1002/2013GL058578

Chaffin M.S., Kass D.M., Aoki S., et al. Martian water loss to space enhanced by regional dust storms // Nature Astron. 2021. V. 5. P. 1036–1042. https://doi.org/10.1038/s41550-021-01425-w

Chistikov D.N. Magnetic dipole and quadrupole transitions in the ν2 + ν3 vibrational band of carbon dioxide // J. Chem. Phys. 2023. V. 158. id. 134307. https://doi.org/10.1063/5.0144201

Daerden F., Neary L., Viscardy S., et al. Mars atmospheric chemistry simulations with the GEM-Mars general circulation model // Icarus. 2019. V. 326. P. 197–224. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.02.030

Deichuli V.M., Petrova T.M., Solodov A.M., et al. Water vapor absorption line parameters in the 6760-7430 cm-1 region for application to CO_2-rich planetary atmosphere // J. Quant. Spectr. Rad. Transf. 2022. V. 293. P. 108386. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2022.108386

Evdokimova D., Belyaev D., Montmessin F., et al. Improved calibrations of the stellar occultation data accumulated by the SPICAV UV onboard Venus Express // Planet. Space Sci. 2020. V. 184. id. 104868. https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104868

Evdokimova D., Belyaev D., Montmessin F., et al. The Spatial and Temporal Distribution of Nighttime Ozone and Sulfur Dioxide in the Venus Mesosphere as Deduced From SPICAV UV Stellar Occultations // J. Geophys. Res. (Planets). 2021. V. 126. id. e06625. https://doi.org/10.1029/2020JE006625

ExoMars Trace Gas Orbiter: One Martian Year of Science. Topical collection // J. Geophys. Res. (Planets). 2023. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/(ISSN)2169-9100.ExoMarsTGO1.

Fan S., Guerlet S., Forget F., et al. Thermal Tides in the Martian Atmosphere Near Northern Summer Solstice Observed by ACS/TIRVIM Onboard TGO // Geophys. Res. Lett. 2022. V. 49. id. e97130. https://doi.org/10.1029/2021GL097130

Fedorova A.A., Montmessin F., Korablev O., et al. Stormy water on Mars: The distribution and saturation of atmospheric water during the dusty season // Science. 2020. V. 367. P. 297–300. https://doi.org/10.1126/science.aay9522

Fedorova A., Montmessin F., Korablev O., et al. Multi-Annual Monitoring of the Water Vapor Vertical Distribution on Mars by SPICAM on Mars Express // J. Geophys. Res. (Planets). 2021. V. 126. id. e06616. https://doi.org/10.1029/2020JE006616

Fedorova A., Montmessin F., Trokhimovskiy A., et al. A Two-Martian Years Survey of the Water Vapor Saturation State on Mars Based on ACS NIR/TGO Occultations // J. Geophys. Res. (Planets). 2023. V. 128. id. e2022-JE007348. https://doi.org/10.1029/2022JE007348

Fedorova A., Trokhimovskiy A., Lefèvre F., et al. Climatology of the CO Vertical Distribution on Mars Based on ACS TGO Measurements // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e07195. https://doi.org/10.1029/2022JE007195

Fleurbaey H., Grilli R., Mondelain D., Kassi S., Yachmenev A., Yurchenko S. N., Campargue A. Electric-quadrupole and magnetic-dipole contributions to the ν2+ ν3 band of carbon dioxide near 3.3 μm // J. Quant. Spectr. Rad. Transf. 2021. V. 266. id. 107558. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107558

Forget F., Korablev O., Venturini J., et al. Editorial: Topical Collection on Understanding the Diversity of Planetary Atmospheres // Space Sci. Rev. 2021. V. 217. id. 51. https://doi.org/10.1007/s11214-021-00820-z

Gamache R.R., Vispoel B., Rey M., et al. Partition sums for non-local thermodynamic equilibrium conditions for nine molecules of importance in planetary atmospheres // Icarus. 2022. V. 378. id. 114947. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.114947

Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J., et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectr. Rad. Transf. 2022. V. 277. id. 107949. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107949

Gorinov D.A., Zasova L.V., Khatuntsev I.V., et al. Winds in the Lower Cloud Level on the Nightside of Venus from VIRTIS-M (Venus Express) 1.74 μm Images // Atmosphere. 2021. V. 12. id. 186. https://doi.org/10.3390/atmos12020186

*Guerlet S., Ignatiev N., Forget F., et al.*Thermal Structure and Aerosols in Mars' Atmosphere From TIRVIM/ACS Onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter: Validation of the Retrieval Algorithm // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e07062. https://doi.org/10.1029/2021JE007062

Guzewich S.D., Fedorova A.A., Kahre M.A., Toigo A.D. Studies of the 2018/Mars Year 34 Planet-Encircling Dust Storm // J. Geophys. Res. (Planets). 2020. V. 125. id. e06700. https://doi.org/10.1029/2020JE006700

Holmes J.A., Lewis S.R., Patel M.R., et al. Enhanced water loss from the martian atmosphere during a regional-scale dust storm and implications for long-term water loss // Earth Planet. Sci. Lett. 2021. V. 571. id. 117109. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117109

Holmes J.A., Lewis S.R., Patel M.R., et al. Global Variations in Water Vapor and Saturation State Throughout the Mars Year 34 Dusty Season J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e2022JE007203. https://doi.org/10.1029/2022JE007203

*Imamura T., Mitchell J., Lebonnois S., et al.*Superrotation in Planetary Atmospheres // Space Sci. Rev. 2020. V. 216. id. 87. https://doi.org/10.1007/s11214-020-00703-9

Karlovets E.V., Gordon I.E., Rothman L.S., et al. The update of the line positions and intensities in the line list of carbon dioxide for the HITRAN2020 spectroscopic database // J. Quant. Spectr. Rad. Transf. 2021. V. 276. id. 107896. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107896

*Karman T., Gordon I. E., van der Avoird A., et al.*Update of the HITRAN collision-induced absorption section // Icarus. 2019. V. 328. P. 160–175. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.02.034

Kazakov K.V., Vigasin A.A. Vibrational magnetism and the strength of magnetic dipole transition within the electric dipole forbidden v2 + v3 absorption band of carbon dioxide // Molec. Phys. 2021. V. 119:12. id. e1934581. https://doi.org/10.1080/00268976.2021.1934581

Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging // Icarus. 2013. V. 226. P. 140–158. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018

Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., et al. Twelve-Year Cycle in the Cloud Top Winds Derived from VMC/Venus Express and UVI/Akatsuki Imaging // Atmosphere. 2022b. V. 13:12. id. 2023. https://doi.org/10.3390/atmos13122023

Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., et al. Winds in the Middle Cloud Deck From the Near-IR Imaging by the Venus Monitoring Camera Onboard Venus Express // J. Geophys. Res. (Planets). 2017. V. 122. P. 2312–2327. https://doi.org/10.1002/2017JE005355

Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Zasova L.V., et al. Winds From the Visible (513 nm) Images Obtained by the Venus Monitoring Camera Onboard Venus Express // J. Geophys. Res. (Planets). 2022a. V. 127. id. e07032. https://doi.org/10.1029/2021JE007032

Knutsen E.W., Montmessin F., Verdier L., et al. Water Vapor on Mars: A Refined Climatology and Constraints on the Near-Surface Concentration Enabled by Synergistic Retrievals // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e07252. https://doi.org/10.1029/2022JE007252

Knutsen E.W., Villanueva G.L., Liuzzi G., et al. Comprehensive investigation of Mars methane and organics with ExoMars/NOMAD // Icarus. 2021. V. 357. id. 114266. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114266

Korablev O.I. Studies of planetary atmospheres in Russia (2011–2014) // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2016. V. 52. P. 483–496. https://doi.org/10.1134/S0001433816050066

Korablev O.I. Trace species in planetary atmospheres: Some results of TGO ExoMars // Astron. Astrophys. Trans. 2021. V. 32. P. 289–304.

Korablev O., Montmessin F., Trokhimovskiy A., et al. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of Three Spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. id. 7. https://doi.org/10.1007/s11214-017-0437-6

Korablev O., Olsen K.S., Trokhimovskiy A., et al. Transient HCl in the atmosphere of Mars // Science Advances. 2021. V. 7. id. eabe4386. https://doi.org/10.1126/sciadv.abe4386

*Korablev O., Vandaele A.C., Montmessin F., et al.*No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations // Nature. 2019. V. 568. P. 517–520. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1096-4

Krasnopolsky V.A. A photochemical model of Pluto's atmosphere and ionosphere // Icarus. 2020a. V. 335. id. 113374. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.07.008

Krasnopolsky V. A. On the methylacetylene abundance and nitrogen isotope ratio in Pluto's atmosphere // Planet. Space Sci. 2020b.V. 192. id. 105044. https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.105044

Krasnopolsky V.A. Photochemistry of HCl in the martian atmosphere // Icarus. 2022. V. 374. id. 114807. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114807

Krasnopolsky V.A. Photochemistry of water in the martian thermosphere and its effect on hydrogen escape // Icarus. 2019. V. 321. P. 62–70. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.10.033

Krasnopolsky V.A. Seasonal and latitudinal variations of the HDO/H_2O ratio in the martian atmosphere // Planet. Space Sci. 2021. V. 208. id. 105345. https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105345

Kurgansky M.V. An estimate of convective vortex activity at the InSight landing site on Mars // Icarus. 2021. V. 358. id. 114200. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114200

Kurgansky M.V. On determination of the size-frequency distribution of convective vortices in pressure time-series surveys on Mars // Icarus. 2020. V. 335. id. 113389. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113389

Kurgansky M.V. On the statistical distribution of pressure drops in convective vortices: Applications to Martian dust devils // Icarus. 2019. V. 317. P. 209–214. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.08.004

Kurgansky M.V. Statistical Distribution of Atmospheric Dust Devils on Earth and Mars // Boundary-Layer Meteorol. 2022. V. 184. P. 381. https://doi.org/10.1007/s10546-022-00713-w

Lebonnois S., Hourdin F., Eymet V., et al. Superrotation of Venus' atmosphere analyzed with a full general circulation model // J. Geophys. Res. (Planets). 2010. V. 115. id. E06006. https://doi.org/10.1029/2009JE003458

Lefèvre F., Trokhimovskiy A., Fedorova A., et al. Relationship Between the Ozone and Water Vapor Columns on Mars as Observed by SPICAM and Calculated by a Global Climate Model // J. Geophys. Res. (Planets). 2021. V. 126. id. e06838. https://doi.org/10.1029/2021JE006838

Limaye S.S., Zelenyi L., Zasova L. Introducing the Venus Collection—Papers from the First Workshop on Habitability of the Cloud Layer // Astrobiology. 2021. V. 21. P. 1157–1162. https://doi.org/10.1089/ast.2021.0142

Luginin M., Fedorova A., Ignatiev N., et al. Properties of Water Ice and Dust Particles in the Atmosphere of Mars During the 2018 Global Dust Storm as Inferred From the Atmospheric Chemistry Suite // J. Geophys. Res. (Planets). 2020. V. 125. id. e06419. https://doi.org/10.1029/2020JE006419

Luo Y., Mischna M.A., Lin J.C., et al. Mars Methane Sources in Northwestern Gale Crater Inferred From Back Trajectory Modeling // Earth Space Sci. 2021. V. 8. id. e01915. https://doi.org/10.1029/2021EA001915

Määttänen A., Lefèvre F., Verdier L., et al. Ozone vertical distribution in Mars Years 27-30 from SPICAM/MEX UV occultations // Icarus. 2022. V. 387. id. 115162. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115162

Marcq E., Baggio L., Lefèvre F., et al. Discovery of cloud top ozone on Venus // Icarus. 2019. V. 319. P. 491–498. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.10.006

Marcq E., Lea Jessup K., Baggio L., et al. Climatology of SO2 and UV absorber at Venus' cloud top from SPICAV-UV nadir dataset // Icarus. 2020. V. 335. id. 113368. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.07.002

Montmessin F., Belyaev D.A., Lefèvre F., et al. Reappraising the Production and Transfer of Hydrogen Atoms From the Middle to the Upper Atmosphere of Mars at Times of Elevated Water Vapor // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e07217. https://doi.org/10.1029/2022JE007217

Montmessin F., Bertaux J.-L., Lefèvre F., et al. A layer of ozone detected in the nightside upper atmosphere of Venus // Icarus. 2011. V. 216. P. 82–85. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.08.010

Montmessin F., Korablev O.I., Trokhimovskiy A., et al. A stringent upper limit of 20 pptv for methane on Mars and constraints on its dispersion outside Gale crater // Astron. Astrophys. 2021. V. 650. id. A140. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140389

Montmessin F., Fouchet T., Forget F. Modeling the annual cycle of HDO in the Martian atmosphere. // J. Geophys. Res.2005. V. 110:E3. id. E10004. https://doi.org/10.1029/2004JE002357

Moores J.E., King P.L., Smith C.L., et al. The Methane Diurnal Variation and Microseepage Flux at Gale Crater, Mars as Constrained by the ExoMars Trace Gas Orbiter and Curiosity Observations // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. P. 9430–9438. https://doi.org/10.1029/2019GL083800

Mumma M.J., Villanueva G.L., Novak R.E., et al. Strong Release of Methane on Mars in Northern Summer 2003 // Science. 2009. V. 323. P. 1041–1045. https://doi.org/10.1126/science.1165243

Olsen K.S., Fedorova A.A., Trokhimovskiy A., et al. Seasonal Changes in the Vertical Structure of Ozone in the Martian Lower Atmosphere and Its Relationship to Water Vapor // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e2022JE007213. https://doi.org/10.1029/2022JE007213

Olsen K.S., Lefèvre F., Montmessin F., et al. First detection of ozone in the mid-infrared at Mars: implications for methane detection // Astron. Astrophys. 2020. V. 639. id. A141. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038125

Olsen K.S., Lefèvre F., Montmessin F., et al. The vertical structure of CO in the Martian atmosphere from the ExoMars Trace Gas Orbiter // Nature Geosci. 2021a. V. 14. P. 67–71. https://doi.org/10.1038/s41561-020-00678-w

Olsen K.S., Trokhimovskiy A., Braude A.S., et al. Upper limits for phosphine (PH3) in the atmosphere of Mars // Astron. Astrophys. 2021c. V. 649. id. L1. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140868

Olsen K.S., Trokhimovskiy A., Montabone L., et al. Seasonal reappearance of HCl in the atmosphere of Mars during the Mars year 35 dusty season // Astron. Astrophys. 2021b. V. 647. id. A161. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140329

Patsaeva M.V., Khatuntsev I.V., Zasova L.V., et al. Solar-Related Variations of the Cloud Top Circulation Above Aphrodite Terra From VMC/Venus Express Wind Fields // J. Geophys. Res. (Planets). 2019. V. 124. P. 1864–1879. https://doi.org/10.1029/2018JE005620

Perevalov V.I., Trokhimovskiy A.Y., Lukashevskaya A.A., et al. Magnetic dipole and electric quadrupole absorption in carbon dioxide // J. Quant. Spectr. Rad. Transf. 2021. V. 259. id. 107408. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107408

Pinto J.P., Li J., Mills F.P., Marcq E., Evdokimova D., Belyaev D., Yung Y.L. Sulfur monoxide dimer chemistry as a possible source of polysulfur in the upper atmosphere of Venus // Nature Comm. 2021. V. 12:1. P. 1–6. https://doi.org/10.1038/s41467-020-20451-2

Rajendran K., Lewis S.R., Holmes J.A., et al. Enhanced Super-Rotation Before and During the 2018 Martian Global Dust Storm // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48. id. e94634. https://doi.org/10.1029/2021GL094634

*Rossi L., Vals M., Alday J., et al.*The HDO Cycle on Mars: Comparison of ACS Observations With GCM Simulations // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e07201. https://doi.org/10.1029/2022JE007201

*Rossi L., Vals M., Montmessin F., et al.*The Effect of the Martian 2018 Global Dust Storm on HDO as Predicted by a Mars Global Climate Model // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48. id. e90962. https://doi.org/10.1029/2020GL090962

Shaposhnikov D.S., Medvedev A.S., Rodin A.V., et al. Martian Dust Storms and Gravity Waves: Disentangling Water Transport to the Upper Atmosphere // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e07102. https://doi.org/10.1029/2021JE007102

Shaposhnikov D.S., Medvedev A.S., Rodin A.V., Hartogh P. Seasonal Water "Pump" in the Atmosphere of Mars: Vertical Transport to the Thermosphere // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. P. 4161–4169. https://doi.org/10.1029/2019GL082839

Starichenko E.D., Belyaev D.A., Medvedev A.S., et al. Gravity Wave Activity in the Martian Atmosphere at Altitudes 20–160 km From ACS/TGO Occultation Measurements // J. Geophys. Res. (Planets). 2021. V. 126. id. e06899. https://doi.org/10.1029/2021JE006899

*Stcherbinine A., Montmessin F., Vincendon M., et al.*A Two Martian Years Survey of Water Ice Clouds on Mars With ACS Onboard TGO // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e2022JE007502. https://doi.org/10.1029/2022JE007502

*Stcherbinine A., Vincendon M., Montmessin F., et al.*Martian Water Ice Clouds During the 2018 Global Dust Storm as Observed by the ACS-MIR Channel Onboard the Trace Gas Orbiter // J. Geophys. Res. (Planets). 2020. V. 125. id. e06300. https://doi.org/10.1029/2019JE006300

*Streeter P.M., Lewis S.R., Patel M.R., et al.*Asymmetric Impacts on Mars' Polar Vortices From an Equinoctial Global Dust Storm // J. Geophys. Res. (Planets). 2021.V. 126. id. e06774. https://doi.org/10.1029/2020JE006774

Trokhimovskiy A., Fedorova A.A., Olsen K.S., et al. Isotopes of chlorine from HCl in the Martian atmosphere // Astron. Astrophys. 2021. V. 651. id. A32. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140916

*Trokhimovskiy A., Perevalov V., Korablev O., et al.*First observation of the magnetic dipole CO_2 absorption band at 3.3 μm in the atmosphere of Mars by the ExoMars Trace Gas Orbiter ACS instrument // Astron. Astrophys. 2020. V. 639. id. A142. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038134

*Vals M., Rossi L., Montmessin F., et al.*Improved Modeling of Mars' HDO Cycle Using a Mars' Global Climate Model // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e07192. https://doi.org/10.1029/2022JE007192

*Vandaele A. C., Korablev O., Daerden F., et al.*Martian dust storm impact on atmospheric H_2O and D/H observed by ExoMars Trace Gas Orbiter // Nature. 2019. V. 568. P. 521–525. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1097-3

*Vlasov P., Ignatiev N., Guerlet S., et al.*Martian Atmospheric Thermal Structure and Dust Distribution During the MY 34 Global Dust Storm From ACS TIRVIM Nadir Observations // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e07272. https://doi.org/10.1029/2022JE007272

*Webster C.R., Mahaffy P.R., Atreya S.K., et al.*Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations // Science. 2018. V. 360. P. 1093–1096. https://doi.org/10.1126/science.aaq0131

*Webster C.R., Mahaffy P.R., Pla-Garcia J., et al.*Day-night differences in Mars methane suggest nighttime containment at Gale crater // Astron. Astrophys. 2021. V. 650. id. A166. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040030

Yachmenev A., Campargue A., Yurchenko S.N., et al. Electric quadrupole transitions in carbon dioxide // J. Chem. Phys. 2021. V. 154. id. 211104. https://doi.org/10.1063/5.0053279

Young R.M.B., Millour E., Guerlet S., et al. Assimilation of Temperatures and Column Dust Opacities Measured by ExoMars TGO-ACS-TIRVIM During the MY34 Global Dust Storm // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e07312. https://doi.org/10.1029/2022JE007312

Zasova L.V., Gorinov D.A., Eismont N.A., et al. Venera-D: A Design of an Automatic Space Station for Venus Exploration // Solar Syst. Res. 2020. V. 53. P.506. https://doi.org/10.1134/S0038094619070244

Planetary Atmosphere Studies in Russia in 2019–2022

O. I. Korablev*

Space Research Institute RAS (IKI), Profsoyuzanaya 84/32, Moscow, 117997 Russia

**e-mail: korab@cosmos.ru*

A review of the studies on planetary atmospheres performed by Russian scientists in 2019–2022 prepared in the Commission on planetary atmospheres of the National Geophysical Committee for the National Report on Meteorology and Atmospheric Science to the 28 General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics in Berlin, July 11–20, 2023, is presented.

Keywords: atmosphere, meteorology, planet, atmosphere composition, atmosphere circulation, superrotation, supersaturation, escape, methane, ozone, trace gases, dust, clouds, Venus, Mars, Saturn, Titan, Pluto, spectroscopy

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2023, том 59, № 7, с. 976–1007

УДК 551.510.4,551.501.8,551.521.3,535.338.4

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОЙ РАДИАЦИИ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. Ю. М. Тимофеев[a], В. П. Будак[b], Я. А. Виролайнен[a], *, Т. Б. Журавлева[c], И. В. Пташник[c], А. Б. Успенский[d], Н. Н. Филиппов[a], Н. Е. Чубарова[e]

[a]Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

[b]Национальный исследовательский университет "МЭИ", ул. Красноказарменная, 14, стр. 1, Москва, 111250 Россия

[c]Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, пл. Академика Зуева, 1, Томск, 634055 Россия

[d]Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета", Б. Предтеченский пер., 7, Москва, 123242 Россия

[e]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

*e-mail: yana.virolainen@spbu.ru

Поступила в редакцию 01.09.2023 г.
После доработки 09.11.2023 г.
Принята к публикации 15.11.2023 г.

Рассмотрены основные результаты научных исследований и разработок в области атмосферной радиации за период 2019–2022 гг. в Российской Федерации. Основное внимание уделено исследованиям в области теории переноса излучения, атмосферной спектроскопии, радиационной климатологии, аэрозоля и радиационного форсинга, дистанционного зондирования атмосферы и поверхности, интерпретации спутниковых измерений. Приведены списки основных публикаций в указанных областях за этот период.

Ключевые слова: теория переноса излучения, атмосферная спектроскопия, радиационная климатология, дистанционное зондирование атмосферы

DOI: 10.31857/S000235152307012X, **EDN:** CZEGHH

ВВЕДЕНИЕ

Излучение в атмосфере Земли (солнечное и собственное атмосферы и поверхности) играет важную роль в формировании погоды и климата планеты. Это излучение определяет многочисленные процессы формирования радиационного баланса Земли, процессы динамики атмосферы, фотохимии, облакообразования и т. д. Это же излучение играет важную роль в получении информации о многочисленных физических, химических, динамических и других параметрах атмосферы и поверхности Земли.

Краткий обзор, подготовленный Российской комиссией по атмосферной радиации, содержит наиболее значимые результаты работ в области исследований атмосферной радиации, выполненных в 2019–2022 гг. Он является частью Национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам, подготовленного для Международной ассоциации по метеорологии и атмосферным наукам (IAMAS). За истекший период Российская комиссия по атмосферной радиации совместно с заинтересованными ведомствами и организациями провела два Международных симпозиума "Атмосферная радиация и динамика" (МСАРД-2019, МСАРД-2021), на которых обсуждались актуальные проблемы современной физики атмосферы – перенос излучения и атмосферная оптика, парниковые газы, облака и аэрозоли, наземные и спутниковые дистанционные методы измерений, новые данные наблюдений. В настоящем обзоре представлено пять направлений, охватывающих весь спектр исследований, проводимых в области атмосферной радиации.

1. Теория переноса излучения.

2. Атмосферная спектроскопия.

3. Аэрозоль, радиационный форсинг, радиационная климатология.

4. Дистанционное зондирование атмосферы.

5. Интерпретация спутниковых измерений.

1. ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

В ИОА СО РАН разработано два новых алгоритма метода Монте-Карло, предназначенных для вычислений спектральных потоков и полей яркости теплового излучения с учетом сферичности атмосферы и 3D-эффектов облаков [Zhuravleva et al., 2019]. Алгоритмы отличаются способами учета молекулярного поглощения (метод k-распределений и метод рандомизации); реализации облачных полей моделируются на основе пуассоновской модели разорванной облачности. Алгоритмы позволяют рассчитать характеристики излучения в неоднородной атмосфере с учетом сферичности атмосферы при меньших вычислительных затратах, чем в методе k-распределения. Пуассоновская модель разорванных облаков обеспечивает эффективное моделирование множества различных мезомасштабных облачных полей, что позволяет идентифицировать 3D-эффекты облаков на исходящее излучение в верхней части атмосферы как функции конфигурации облаков и оптических характеристик в различных спектральных интервалах.

Осуществлено статистическое моделирование интенсивности пропущенного солнечного излучения в присутствии оптически тонких перистых облаков для двух геометрических схем зондирования, реализованных в фотометрической сети AERONET [Zhuravleva, 2021]. Численные эксперименты выполнены с использованием моделей кристаллической облачности: модели OPAC (гексагональные частицы с гладкой поверхностью) и модели группы авторов в составе Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J. и др. (смесь частиц разной формы, гексагональные столбики и агрегаты из гексагональных столбиков с сильно шероховатой поверхностью). Выявлено, что отсутствие пиков яркости в зонах возможного появления гало не означает отсутствие на небосводе перистой облачности, поскольку в присутствии сильно шероховатых гексагональных частиц угловая структура радиационного поля описывается гладкой функцией угла рассеяния. Анализ влияния микроструктуры кристаллической облачности на усредненные по множеству облачных реализаций альбедо и диффузное пропускание показал [Zhuravleva, 2021], что среднее значение неопределенности, обусловленное отсутствием информации о форме и размерах частиц, находится в пределах ~2%. Эта величина сопоставима с влиянием эффектов случайной геометрии облаков в оптически тонкой облачности, тогда как по мере увеличения оптической плотности диффузное пропускание может быть занижено более чем на 10%.

Разработан оригинальный алгоритм [Zhuravleva, 2021, 2021a] статистического моделирования переноса солнечного излучения в присутствии кристаллических облаков, оптически анизотропных относительно зенитного угла падающего излучения. Выполнено тестирование программно-алгоритмического обеспечения; результаты численных экспериментов свидетельствуют о том, что при моделировании переноса излучения с использованием предложенного алгоритма свойства оптической анизотропии среды учитываются адекватно.

В работе [Firsov et al., 2021] разработана широкополосная модель для переноса коротковолнового солнечного излучения в атмосфере Земли. Модель основана на параметризации функций пропускания излучения с использованием современной спектроскопической информации в виде коротких экспоненциальных рядов, что позволяет применить стандартный метод дискретных ординат к решению уравнения переноса излучения для каждой экспоненциальной составляющей.

В статье [Fomin, 2021] представлен прямой метод расчета (LBL) для быстрого вычисления компактных и точных таблиц спектрального поиска (LUT) для моделей переноса излучения LBL. Ключевой особенностью этого метода является получение и использование эффективных сеток с неоднородными волновыми числами для интерполяции профиля линии с заданной точностью.

Работа [Svetsov et al., 2019] посвящена решению системы уравнений переноса излучения совместно с уравнениями газовой динамики. Использовалось приближение радиационной теплопроводности или, если оптическая глубина Росселанда излучающего объема газа и пара была меньше единицы, приближение объемного излучения. Разработанный алгоритм применен для численного моделирования столкновений кометных тел диаметром 0.3, 1 и 3 км, которые входят в атмосферу под различными углами.

Целью работы [Soldatenko et al., 2021] являлось изучение влияния неопределенностей в радиационных обратных связях и инерции климатической системы на спектр мощности колебаний глобальной средней температуры поверхности (Global Mean Surface Temperature, GMST). Было показано, что в высокочастотном диапазоне спектра мощности колебаний GMST влияние инерции климатической системы более значительно, чем влияние обратных связей. В низкочастотном диапазоне, напротив, влияние обратных связей на спектр мощности превышает влияние климатической инерции.

В статье [Chesnokova et al., 2019] моделируются восходящий и нисходящий потоки солнечного и теплового излучения для метеорологических условий, типичных для лета в средних широтах. Оценен баланс атмосферной радиации, обусловленный перистыми облаками разной глубины, и чувствительность радиационного воздействия к различным моделям сплошного поглощения водяного пара.

В работе [Timofeev et al., 2020], основываясь на анализе уравнения переноса излучения в интегральной форме, исследуются причины измене-

ний исходящего теплового излучения Земли (Outgoing Thermal Radiation, OTR) при увеличении содержания CO_2 в атмосфере.

В исследовании [Kuchma et al., 2020] рассмотрена задача атмосферной коррекции коротковолновых каналов многоспектрального сканирующего радиометра низкого разрешения на борту спутника "Метеор-М № 2". Предложен алгоритм атмосферной коррекции на основе специальных таблиц поиска, сгенерированных авторами. Проверка показала высокую корреляцию с эталонным коэффициентом отражения, полученным с сайтов проверки альбедо поверхности портала EUMETSAT.

В [Silant'ev et al., 2021] получено уравнение переноса излучения для всех стоксовых параметров непрерывного излучения в атмосфере в однородном магнитном поле. Явные формулы для поперечных сечений и фазовых сдвигов даны с учетом эффектов поглощения. Представленная теория справедлива для магнитных полей не более 1010 Гс. В общем случае магнитное поле состоит из среднего значения и хаотической части. Система уравнений переноса для четырех усредненных параметров Стокса, I, Q, U и V, распадается на две независимые системы - для параметров I, Q и V, U.

В работе [Balugin et al., 2022] представлен метод оценки воздействия стратосферного аэрозоля на радиационный баланс стратосферы по данным аэростатного зондирования оптическим зондом обратного рассеяния аэрозоля. Методика оценки основана на использовании радиационной (line-by-line и Монте-Карло) модели переноса солнечной радиации.

В статье [Fomin et al., 2019] обсуждаются изменения в расчетах line-by-line спектров инфракрасного излучения, которые происходят при замене спектроскопической базы данных HITRAN-2012 на HITRAN-2016 и контура Фойгта на контур Хартмана-Трана.

В исследовании [Chernenkov et al., 2021] выполнена оценка концентрации сажи в снегу на основе балансовой модели снежного слоя и модели переноса излучения SNICAR. Вычисляется альбедо снега и радиационное воздействие от потемнения снега при различной концентрации сажи.

В работе [Dombrovsky et al., 2020] предложена модель распространения вирусов воздушно-капельным путем внутри микрокапель воды. Построена модель вирусного облака с учетом различных механизмов, таких как эффект солнечного облучения, динамическая релаксация движущихся капель в окружающем воздухе и гравитационное осаждение капель. Максимальная оценка спектрального потока излучения в случае безоблачного неба показала, что вклад излучения в испарение отдельных капель воды незначителен.

В статье [del Águila et al., 2020] описан метод ускорения моделей расчета гиперспектрального переноса излучения, основанный на кластеризации спектральных излучений, вычисленных с помощью малопотоковой модели переноса и регрессионного анализа, выполненного для малопотоковой и многопотоковой моделей внутри каждого кластера. Этот подход, который мы называем методом кластерной регрессии низких потоков (Cluster Low-Streams Regression, CLSR), применяется для вычисления спектров излучения в A-диапазоне O_2 при 760 нм и CO_2-диапазоне при 1610 нм для пяти атмосферных сценариев. Метод CLSR сравнивается с моделью переноса на основе анализа основных компонентов (Principal Component Analysis, PCA), демонстрируя улучшение по точности и вычислительной производительности.

В работе [Zhuravleva, 2021] представлен оригинальный алгоритм статистического моделирования переноса солнечного излучения в присутствии облаков из кристаллов льда, оптически анизотропных по отношению к зенитному углу падающего излучения. Численные эксперименты показали, что при использовании предложенного алгоритма при моделировании переноса излучения наиболее адекватно учитываются свойства оптически анизотропной среды.

В работах [Kataev et al., 2019, 2021, 2022] анализируются алгоритмы обработки изображения, полученные с борта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в режиме реального времени для оптического дистанционного зондирования поверхности земли. Применение аналога вегетационного индекса позволяет выделить на RGB изображении растения, что увеличивает вероятность правильного распознавания типов поверхности (растений). Рассматриваются методики предварительной и тематической обработки изображений, необходимой для уверенного распознавания типов поверхности.

Проведен анализ [Belov et al., 2019] эффективности оптического (фото и радиометрического) метода обнаружения нефтяных загрязнений, основанного на различии в отражательных характеристиках чистой и загрязненной нефтью водных поверхностей, при выборе длины волны зондирования в УФ, видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах спектра.

В [Belov et al., 2019] рассмотрены результаты экспериментов с подводными бистатическими оптико-электронными системами связи, в которых источником информации и полезным сигналом является рассеянное лазерное излучение. В полевых условиях получены дальности передачи информации до 40 м в озерной воде.

Статья [Burenkov et al., 2019] посвящена оценке погрешности определения показателя ослабления света морской водой методом Монте-Карло. Как правило, измерения показателя ослабления проводятся при небольшой базе прибора в достаточно прозрачных водах. Однако на практи-

ке встречаются случаи очень мутных вод (придонные нефелоидные слои), где погрешности измерения показателя ослабления существенно возрастают из-за многократного рассеяния в пределах базы прибора. Оценки таких погрешностей и рассматриваются в настоящей работе. Наиболее подробно рассмотрено влияние индикатрисы рассеяния на рассматриваемые погрешности. Кроме того, изучено влияние на погрешности измерения показателя ослабления длины базы прибора и угла зрения приемной системы.

В [del Águila et al., 2019, 2021] для улучшения эффективности алгоритма обработки гиперспектральных данных были проанализированы методы снижения размерности применительно к гиперспектральному дистанционному зондированию атмосферы. При снижении размерности происходит исключение из данных избыточной информации, и в настоящее время снижение размерности является неотъемлемой частью высокопроизводительных моделей переноса излучения.

В работе [Afanas'ev et al., 2019] проводится сравнительный анализ методов решения уравнения переноса для излучения и частиц. Физическая модель светового поля эквивалентна теории распространения пучков элементарных частиц в приближении классической механики. На сегодня особенно важно, что точность экспериментов в физике частиц близка к предельной, что позволяет проверять многие соотношения теории светового поля в мутной среде, где пока подобная точность недостижима. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по угловым распределениям электронов, упруго отраженных от двуслойных твердотельных мишеней.

Работа [Efremenko, 2021] посвящена применению искусственных нейронных сетей для параметризации вычислительно трудоемких моделей переноса излучения (МПИ) в задачах дистанционного зондировании атмосферы. Хотя прямое замещение МПИ нейронными сетями может приводить к многократному повышению производительности, такой подход имеет определенные недостатки, такие как потеря общности, проблемы с устойчивостью и т.д. При этом нейронная сеть обычно обучается для конкретного приложения, например, для заранее определенных атмосферных сценариев и заданного спектрометра. В данной работе рассматривается новая концепция нейросетевых МПИ, в которой нейронная сеть заменяет не всю модель целиком, а только ее часть (алгоритм расчета собственных значений), тем самым сокращая общее время вычислений при сохранении общности МПИ. Из обучения исключаются зависимости от геометрии наблюдения и оптической толщины среды.

Статья [Chuprov et al., 2022] посвящена сравнению эффективности метода разложения по сингулярным числам (singular value decomposition, SVD) и решателей обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) для нахождения матрицы отражения. Матрица отражения может находиться путем решения одномерного уравнения переноса излучения. Данное решение на основе метода дискретных ординат приводит к методу SVD. Альтернативный подход состоит в преобразовании исходной задачи в матричное уравнение Риккати, написанное специально для матрицы отражения и решаемое методами численного интегрирования ОДУ. Обнаружено, что для однослойного случая метод SVD на порядок быстрее решателей ОДУ, но по мере роста числа слоев решатели ОДУ становятся эффективнее метода SVD. Они эффективнее и при непрерывном изменении оптических свойств среды с глубиной.

В работе [Afanas'ev et al., 2020] анализируется современное состояние дискретной теории переноса излучения. Рассмотрены одномерная, трехмерная и стохастическая модели переноса излучения. Показано, что дискретная теория дает единственное решение одномерного уравнения переноса излучения. Все приближенные методы решения, основанные на формализме дискретных ординат, могут быть получены на основе синтетических итераций, малоугловой аппроксимации и метода матричных операторов. Намечены возможные направления перспективного развития переноса излучения.

2. АТМОСФЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Работа по данной тематике в основном велась по двум направлениям: исследование характеристик спектральных линий и полос и исследование континуального поглощения. Для моделирования атмосферного радиационного переноса и дистанционного мониторинга содержания парниковых и загрязняющих атмосферу газов требуется высокоточная информация по линиям поглощения атмосферных газов. Цикл работ по теоретическому исследованию линий полосы $\nu_6 CH_3I$ был проведен в СПбГУ совместно с ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН и Университетом Франш-Конте (Безансон, Франция). Интерес к спектроскопическим параметрам линий йодистого метила резко возрос за последние несколько лет из-за его экологической значимости (источник атомов йода, разрушающих озоновый слой). Были рассчитаны коэффициенты самоуширения CH_3I, включая их температурную зависимость [Troitsyna et al., 2020], коэффициенты уширения азотом [Troitsyna et al., 2021a], кислородом и воздухом [Troitsyna et al., 2021b]. Лабораторные исследования, представленные коллективом авторов ИОА СО РАН, включают в себя измерения на Фурье-спектрометре Bruker и на единственном в России спектрометре внутрирезонаторного затухания. Получена новая информация о спектрах поглощения C_2H_2, O_3, CF_4, CO, CH_3I, NO_2, N_2O, HCl, H_2S, чем

внесен значительный вклад в обновление популярных спектроскопических баз данных HITRAN и GEISA [Сердюков и др., 2022; Dudaryonok et al., 2022a,b; Jacquemart et al., 2022; Lavrentieva et al., 2022; Sinitsa et al., 2022; Vasilchenko et al., 2022a, 2022b]. Продолжается разработка комплекса низкотемпературных кювет, с помощью которых возможно моделирование газовых сред, в том числе смесей парниковых газов, в условиях верхних слоев атмосферы [Сердюков и др., 2020; Синица и др., 2020].

Проведен анализ влияния спектроскопической информации в современных базах данных по линиям поглощения CH_4, CO и H_2O на определение общего содержания (ОС) метана, монооксида углерода и водяного пара в столбе атмосферы из спектров прямого солнечного излучения, измеренных наземными Фурье-спектрометрами, расположенными на станциях в Санкт-Петербурге и Коуровке, в среднем и ближнем ИК диапазонах [Чеснокова и др., 2019; Chesnokova et al., 2020a, 2020b]. Обнаружено, что различия в ОС CH_4, CO и H_2O за счет использования различных версий баз данных HITRAN, GEISA, ATM могут достигать 4% и более. Для выработки стратегий восстановления содержания CO и CH_4, применяемых в международных сетях мониторинга парниковых газов NDACC и TCCON, получены рекомендации по применению спектроскопических баз данных в задачах дистанционного зондирования, что позволяет повысить точность определения ОС.

В области 5900–6100 $см^{-1}$ на Фурье-спектрометре Bruker IFS 125 HR в ИОА СО РАН зарегистрированы лабораторные спектры поглощения водяного пара, уширенные давлением атмосферного воздуха, и определены параметры линий поглощения H_2O [Дейчули и др., 2021] для контуров линий Фойгта и модифицированного профиля Фойгта, учитывающего зависимость уширения от скоростей сталкивающихся молекул. Показано, что использование новых значений параметров линий поглощения H_2O позволяет улучшить согласие между модельными и измеренными атмосферными спектрами по сравнению с моделированием, использующим известные спектроскопические базы данных HITRAN и GEISA, что ведет к повышению качества решения обратной задачи определения содержания газов в атмосфере.

Разработана широкополосная модель [Фирсов и др., 2021] для расчета переноса излучения в атмосфере Земли в солнечном коротковолновом диапазоне спектра для спектральных каналов радиометров, установленных на спутниках Sentinel-2A. Данная модель основывается на line-by-line расчетах спектров поглощения с использованием современной спектроскопической информации и последующей параметризации функций пропускания излучения в виде короткого ряда экспонент для применения в методе дискретных ординат при решении уравнения переноса излучения. Для каналов радиометров Sentinel-2A сделаны оценки погрешностей коэффициентов спектральной яркости поверхности, обусловленные неопределенностями аэрозольного ослабления для типичных оптико-метеорологических условий региона Нижнего Поволжья.

В работе [Kouzov et al., 2022] предложена новая немарковская теория развития диффузных спутников вокруг разрешенных (материнских) линий вращения, возмущенных буферными газами. С ростом давления буферного газа лоренцевская часть материнских линий, примыкающая к центру полосы, затухает из-за передачи интенсивности на сателлиты. Рассмотрены различные каналы, способствующие ослаблению инфракрасных и рамановских линий линейных молекул. Простые оценки коэффициентов затухания удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, имеющимися для спектров поглощения HCl и HF, возмущенных одноатомными газами.

В Институте прикладной физики РАН проведен ряд экспериментальных и теоретических исследований, направленных на повышение точности восстановления атмосферных профилей температуры и влажности с помощью микроволновой радиометрии. Эта задача решалась в основном за счет получения высокоточных экспериментальных данных о параметрах формы основных диагностических атмосферных линий. В частности, проведено исследование линии поглощения водяного пара вблизи 183 ГГц [Koshelev et al., 2021a] и полосы кислорода в окрестности 60 ГГц [Koshelev et al., 2021b, 2022; Makarov et al., 2020]. Полученные данные позволяют, в том числе, моделировать тонкие столкновительные молекулярные эффекты (включая, зависимость эффективного сечения столкновений от скорости) и составляют эмпирическую основу современных моделей распространения миллиметровых волн в атмосфере. В работе [Belikovich et al., 2022] продемонстрировано, что высокоточное моделирование профиля 60-ГГц кислородной полосы поглощения на основе полученных данных и формализма внезапной коррекции энергии (Enegry Correction Sudden, ECS) позволяет снизить погрешность восстановления профиля температуры атмосферы по данным радиометра HARTPRO до долей Кельвина. По результатам этих и ряда предшествующих исследований поглощения излучения атмосферой опубликована монография [Tretyakov, 2021].

Ввиду отсутствия удовлетворительной теории магнитно-дипольных переходов в многоатомных молекулах, способной описать наблюдаемую в атмосфере Марса запрещенную в электро-дипольном приближении полосу $\nu_2 + \nu_3$ углекислого газа, в ИФА им А.М. Обухова РАН была построена квантовая теория магнитного момента бесспиновых молекул и приведены основные элементы

теории магнитно-дипольных колебательно-вращательных переходов [Kazakov at al., 2021]. В дальнейшем, был разработан метод расчета магнитно-дипольных спектров, выполнены необходимые квантово-химические расчеты и проведены вариационные расчеты магнитно-дипольного и квадрупольного спектров в области 3.3 мкм углекислого газа. Показано хорошее согласие теоретических спектров и данных лабораторных измерений, выполненных с использованием высокочувствительного метода CRDS [Fleurbaey at al., 2021] и метода Фурье-спектроскопии [Borkov at al., 2021].

В работе [Ptashnik at al., 2019], выполненной совместно сотрудниками ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН и ИФА им А.М. Обухова РАН, было предложено описание континуального поглощения водяного пара в области 2.7 и 6.25 мкм с использованием модельных представлений о формировании континуума в результате суммирования вкладов связанных и квазисвязанных димеров воды и далеких крыльев колебательно-вращательных линий в спектре поглощения мономеров. В ИФА им А.М. Обухова РАН проведен цикл экспериментальных исследований, направленный на повышения точности описания континуального атмосферного поглощения в области вращательной полосы молекулы воды [Koroleva et al., 2021; Odintsova et al., 2019, 2020] и предложен подход к его физически обоснованному моделированию на основе современных представлений о бимолекулярном поглощении и поведении далеких крыльев резонансных линий водяного пара [Odintsova et al., 2022].

В ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН сделаны оценки влияния континуального поглощения водяного пара в атмосфере на радиационный форсинг CO_2 на основе массовых расчетов потоков теплового излучения для летних месяцев 2021 г. в регионе Нижнего Поволжья [Фирсов и др., 2022]. Результаты показали, что с ростом влажности вклад CO_2 в радиационное воздействие на поверхность Земли уменьшается, что приводит к меньшему нагреву поверхности и к увеличению нагрева атмосферы. При этом доминирующую роль играет континуум водяного пара, а не селективное поглощение в полосах H_2O.

Впервые получены экспериментальные спектры континуального поглощения чистого водяного пара в полосах поглощения 1.14 и 0.94 мкм при повышенной температуре (400–430 K) совместно с сотрудниками из Университета г. Рединга (Великобритания) [Симонова, 2022; Симонова и др., 2019; Simonova et al., 2022]. Разработана полуэмпирическая модель димеров воды для прогнозирования величины и спектральных особенностей континуума чистого водяного пара в ИК полосах поглощения в диапазоне температур от 280 до 430 K [Симонова, 2022; Simonova et al., 2022]. На основе лабораторных измерений и анализа теоретических расчетов получена оценка вклада простейших комплексов воды – димеров – в континуум водяного пара в полосах поглощения ИК диапазона: от 40 до 90% в температурном диапазоне от 280 до 430 K [Симонова, 2022; Симонова и др., 2022; Simonova et al., 2022].

Отдельно стоит отметить теоретические работы, использующие метод классических траекторий для расчета вкладов в континуальное поглощение. Первые работы по использованию этого метода для получения индуцированных спектров атмосферных молекул начались в 2014 году почти одновременно в ИФА им А.М. Обухова РАН и в СПбГУ. Успешное развитие этого теоретического подхода в работах [Chistikov et al., 2019, 2021; Serov et al., 2020] привело к появлению совместной публикации [Odintsova et al., 2021], в которой результаты теоретического моделирования ротоколебательной полосы CO_2-Ar, полученные в ИФА им А.М. Обухова РАН и в СПбГУ, сопоставлены с имеющимися в литературе данными, а также с результатами высокоточных измерений, проведенных в ИПФ РАН. Оказалось, что, несмотря на некоторые различия в методике траекторных расчетов, проводившихся в ИФА им А.М. Обухова РАН и в СПбГУ, полученные независимо теоретические спектры хорошо согласуются с данными измерений. Это позволило включить ротоколебательные спектры поглощения CO_2–Ar и N_2–N_2, полученные в ИФА им А. М. Обухова РАН, в основной блок базы данных HITRAN [Gordon et al., 2022]. В работе [Finenko et al., 2022] с помощью траекторного метода в ИФА им А.М. Обухова РАН были получены ротоколебательные спектры CH_4–N_2 при температурах от 70 до 400 K. Спектры CH_4–N_2 и полученные ранее спектры N_2–N_2 были использованы в этой работе для интерпретации спектральной яркости излучения в атмосфере Титана. Показано очень хорошее согласие теоретических данных и результатов измерений с борта космического аппарата Кассини. Можно полагать, что полученные в ИФА им А.М. Обухова РАН бинарные коэффициенты поглощения для CH_4–N_2 и N_2–N_2 окажутся полезными для моделирования радиационных процессов в некоторых экзопланетных атмосферах, предположительно состоящих их азота с примесью метана. В работе [Oparin et al., 2020], выполненной в СПбГУ, предложен метод расчета далеких крыльев полос, основанный на траекторных расчетах. Метод с успехом применен для расчета поглощения в области высокочастотного крыла полосы ν_3CO_2 в смесях с благородными газами.

3. АЭРОЗОЛЬНОЕ РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

В институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН проведен анализ пылевого минераль-

ного аэрозоля. Показано, что наряду с песчаной фракцией и фракцией частиц минеральной пыли ветрово-песчаный поток содержит алевритовую фракцию частиц размером примерно от 10 до 100 мкм [Gorchakov et al., 2019a]. Установлены статистические зависимости между концентрациями частиц алеврита и песка в ветрово-песчаном потоке и скоростью ветра в приземном слое атмосферы [Gorchakov et al., 2020a]. Были предложены аппроксимации вертикальных распределений концентраций частиц алеврита и песка в квазистационарных условиях [Gorchakov et al., 2021a, 2021b]. Показано, что в верхнем слое засоления, в отличие от нижнего слоя толщиной около 9 см, вертикальный градиент концентрации солеобразующих частиц зависит от скорости ветра в приземном слое атмосферы [Gorchakov et al., 2021a, 2021b]. Разработана эмпирическая модель функции распределения частиц алеврита и песка по размерам в ветрово-песчаном потоке в опустыниваемом районе [Gorchakov et al., 2021c]. Измерения вертикальных турбулентных потоков пылевого аэрозоля проводились корреляционным методом в опустыниваемой местности [Gorchakov et al., 2020b; Karpov et al., 2021]. Были получены оценки скорости подъема пылевого аэрозоля с подстилающей поверхности (до 6–7 см/с) [Gorchakov et al., 2020b; Karpov et al., 2021]. Низкочастотные вариации плотности турбулентного потока пылевого аэрозоля определяются конвективно обусловленной изменчивостью горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра в приземном слое атмосферы [Gorchakov et al., 2020b; Karpov et al., 2021]. Данные показали, что ветрово-песчаный поток характеризуется аномально высокой электризацией [Gorchakov et al., 2022a, 2022b]. Представлены результаты измерений напряженности электрического поля, солевых электрических токов и электрических токов, обусловленных переносом заряженных пылевых аэрозольных частиц [Gorchakov et al., 2022a, 2022b]. Получена оценка плотности электрических зарядов на подстилающей поверхности (до +25 нК/м^2). Был предложен новый механизм инициирования засоления электрическими (коронными) разрядами на подстилающей поверхности, который может обеспечить удаление солеобразующих частиц с подстилающей поверхности со скоростью 1 м/с и более [Gorchakov et al., 2022a, 2022b].

Были изучены свойства и радиационные эффекты пылевой дымки из пустыни Такламакан на Северо-Китайской равнине [Gorchakov et al., 2022c]. По данным AERONET на станции Пекин за период 2001–2021 гг. получены значения аэрозольных оптических толщин (АОТ) до 4.0–4.5. Показано, что оптические и микрофизические характеристики пылевого аэрозоля определяются его крупной фракцией с модальным радиусом объемного распределения частиц 2–4 мкм при массовом содержании в атмосфере до 10–12 г/м^2. Согласно данным мониторинга на станциях Синлун и Пекин в апреле 2006 года и на станции Пекин-CAMS в марте 2021 г., мнимая часть показателя преломления пылевого аэрозоля в большинстве случаев не превышала 0.003 в условиях оптически плотной пылевой дымки. Показано, что при интенсивных заносах пылевого аэрозоля в район Пекина эффективность аэрозольного радиационного воздействия достигала 85 Вт/м^2 на верхней границе атмосферы и 135–140 Вт/м^2 на нижней границе [Gorchakov et al., 2022c]. Используя данные реанализа по ветру, данные спутникового мониторинга оптической толщины аэрозоля (MODIS) и вертикального распределения коэффициента ослабления (CALIOP), а также данные AERONET, показано, что массовый поток пылевого аэрозоля из пустыни Такламакан на Северо-Китайскую равнину в апреле 2006 г. составляет 1.5 т/с или около 1.5 млн т в день.

Оценена степень распространения оптически плотной дымки в Евразии в июле 2016 года, включая рекордную сибирскую дымку, которая распространилась на площади около 16 млн км^2 [Gorchakov et al., 2019b]. Общая масса дымового аэрозоля в дымке на территории Северной Евразии достигла примерно 3.2 млн т. Среднее радиационное воздействие аэрозоля в период максимального задымления в Сибири составило –67 Вт/м^2 на верхней границе атмосферы и –98 Вт/м^2 на нижней границе. Согласно данным MODIS и AERONET установлены пространственные распределения смога и дымового аэрозоля на Северо-Китайской равнине в июне 2007 г. [Gorchakov et al., 2019c]. Выявлено сходство оптических и микрофизических характеристик дымового аэрозоля в крупномасштабной дымке в России и в дымке на Северо-Китайской равнине. Показано, что в летнем смоге на Северо-Китайской равнине альбедо однократного рассеяния в среднем ниже (0.91), чем в дымной атмосфере на территории России (0.95–0.98). Эффективность аэрозольного радиационного воздействия на верхней границе атмосферы в смоге составляет 45 Вт/м^2, что примерно на 30% меньше (58–62 Вт/м^2), чем в дымовом аэрозоле в России, а на нижней границе атмосферы эффективность радиационного воздействия в смоге – 144 Вт/м^2, что примерно на 30% больше, чем в условиях дымового аэрозоля (102–118 Вт/м^2).

С использованием самолетной лаборатории Института оптики атмосферы СО РАН [Panchenko et al., 2020a; Petäjä et al., 2020] был проведен детальный анализ свойств аэрозоля в приземном слое атмосферы и в тропосфере в фоновых условиях Западной Сибири. Развивая идеи Розенберга о классификации аэрозольных состояний в приземном слое атмосферы для различных типов “оптической погоды”, предложен новый вариант разделения наборов данных наблюдений на типы “аэрозольной погоды”. Этот подход основан на

том факте, что основной ("сухой") микрофизический состав частиц формируется под воздействием множества относительно длительных процессов, в то время как оптические характеристики частиц сильно зависят от быстро меняющейся относительной влажности воздуха. В рамках этого подхода весь набор данных наблюдений можно разделить на четыре типа аэрозольной погоды, условно обозначаемых как фон, дымка, смог и дымовой аэрозоль [Панченко и др., 2019а]. Анализ показал, что основные типы аэрозольной погоды могут быть надежно выделены в сезонных наборах данных по изученным оптическим и микрофизическим характеристикам [Panchenko et al., 2020b]. Анализ долгосрочных наблюдений [Полькин и др., 2022а, 2022б; Kabanov et al., 2019, 2020; Panchenko et al., 2021] и классификация состояний приземной атмосферы в соответствии с типами аэрозольной погоды значительно снизили неопределенность измеряемых входных параметров эмпирической модели аэрозольных оптических характеристик приземного слоя атмосферы. Это играет важную роль в разработке современной версии обобщенной эмпирической модели оптических характеристик тропосферного аэрозоля в Западной Сибири [Зенкова и др., 2021].

В 2019–2022 гг. ИАО СО РАН продолжило регулярные самолетные наблюдения в фоновом регионе Западной Сибири [Arshinov et al., 2021]. В осенние сезоны 2020 и 2022 гг. с помощью летающей лаборатории Optik Ту-134 были проведены крупномасштабные комплексные измерения парниковых газов и аэрозолей в российском секторе Арктики [Белан и др., 2022]. По данным самолетного зондирования тропосферы, полученным в ходе комплексного эксперимента по изучению состава тропосферы в российском секторе Арктики в сентябре 2020 г. над Баренцевым, Карским, Лаптевых, Восточно-Сибирским, Чукотским и Беринговым морями, получены вертикальные профили массовой концентрации субмикронного аэрозоля и поглощающего вещества (черный углерод) [Зенкова и др., 2022]. В ходе кампании 2020 г. впервые удалось провести воздушное зондирование аэрозоля в Арктическом регионе при переходе из тропосферы в стратосферу [Antokhin et al., 2021]. Было обнаружено, что при пересечении тропопаузы плотность аэрозольных частиц увеличивается. Выше тропопаузы в элементном и ионном составе преобладают Si и SO_4^{2-} соответственно, в то время как в тропосфере доминируют терригенные элементы Al, Cu и Fe [Antokhin et al., 2021]. В ходе самолетных кампаний ИАО СО РАН совместно с Государственным научным центром вирусологии и биотехнологии "ВЕКТОР" был накоплен уникальный набор данных о содержании микроорганизмов в атмосферном аэрозоле в тропосфере Западной Сибири на высотах от 0 до 7 км. Сравнение данных, полученных в период 2006–2008 гг., с измерениями 2012–2016 гг. показало, что содержание микроорганизмов, опасных для здоровья человека, в атмосферном аэрозоле на юге Западной Сибири не менялось в течение десяти лет (тенденции неотличимы от нуля с доверительной вероятностью выше 95%) [Safatov et al., 2022].

Исследователи ИАО СО РАН совместно с коллегами из других научно-исследовательских институтов продолжили измерения характеристик аэрозоля и обобщили результаты, полученные на полярных станциях и в морских районах [Радионов и др., 2019; Сакерин и др., 2019, 2022; Golobokova et al., 2020; Kabanov et al., 2020; Radionov et al., 2020; Sakerin et al., 2020, 2020a, 2020b, 2022]. На основе многолетних полевых исследований (2007–2018 гг.) впервые показано, что средние характеристики атмосферного аэрозоля снижаются с запада на восток в российском секторе Северного Ледовитого океана, что указывает на преобладание влияния адвекции антропогенного и природного аэрозоля из Европы [Radionov et al., 2019; Sakerin et al., 2020, 2020a]. Анализ серий долгосрочных наблюдений на полярных станциях Баренцбург и Ny-Alesund показал, что сезонная и межгодовая изменчивость АОТ определяется изменением содержания мелкодисперсного аэрозоля при значительном влиянии дымового аэрозоля. Колебания АОТ от года к году на двух станциях являются постоянными [Сакерин и др., 2022; Golobokova et al., 2020; Radionov et al., 2020]. Многолетние исследования, проведенные в двадцати антарктических экспедициях, выявили особенности пространственного распределения аэрозольной оптической толщины атмосферы, плотности распределения аэрозольных частиц и содержания поглощающего вещества (черного углерода) в высоких широтах Индо-Атлантического сектора океана. Общей тенденцией является снижение концентрации в широтном направлении в соответствии с распространением шлейфа пыли и антропогенных аэрозолей, переносимых из Африки. Показано, что пространственное распределение определяется циклоническим переносом аэрозоля с континента в зону Субантарктической депрессии (55°–60° ю.ш.), действием антарктического антициклона, препятствующего дальнейшему переносу воздуха, и широтным изменением скорости ветра и ледяного покрова океана, которые влияют на образование морского аэрозоля [Sakerin et al., 2022b].

В связи с растущим числом масштабных природных пожаров, которые распространяются на обширные территории Сибири и вторгаются в Арктический регион, очень актуальной задачей является точное определение их радиационного воздействия [Konovalov et al., 2021; Zhuravleva et al., 2020]. В рамках этой задачи был начат новый цикл измерений и моделирования рассеивающих и поглощающих свойств дымового аэрозо-

ля вблизи источника пожара с акцентом на ежедневную трансформацию свойств аэрозоля [Журавлева и др., 2022; Uzhegov et al., 2022; Zhuravleva et al., 2021]. Измерения оптических и микрофизических характеристик дымов различного состава в большой аэрозольной камере ИАО СО РАН позволили выявить тенденцию изменения соотношения коричневого и черного углерода в массовой концентрации смешанных дымов на стадии дымообразования и двух-трехдневной выдержки при ультрафиолетовом облучении и в темноте [Uzhegov et al., 2022]. Серия модельных расчетов радиационного воздействия дымового аэрозоля в зависимости от фотохимической эволюции его органической компоненты, условий облучения и типов подстилающей поверхности (вода, смешанный лес и снег/лед) показала, что увеличение альбедо подстилающей поверхности и уменьшение оптической толщины аэрозоля может привести к изменению эффекта охлаждения/нагрева. Было обнаружено, что, пренебрегая изменчивостью оптических характеристик органического аэрозоля, можно переоценить или недооценить радиационное воздействие на верхней границе атмосферы на несколько десятков Вт/м2 или даже неправильно получить его знак [Журавлева и др., 2022; Zhuravleva et al., 2019, 2021]. С помощью модели переноса химических веществ CHIMERE в сочетании с метеорологической моделью WRF рассчитано радиационное воздействие дымового аэрозоля в восточной части Арктики для периода сибирских мощных пожаров 16–31 июля 2016 г. Получены модельные оценки среднесуточного прямого радиационного воздействия дымового аэрозоля в солнечном спектральном диапазоне по данным аэрозольных наблюдений на станции Тикси в период аномально высокой концентрации черного углерода в приземном слое атмосферы (июль 2014 г.) [Zhuravleva et al., 2019]. Показано, что среднемесячные значения радиационных эффектов, обусловленные изменчивостью оптических характеристик фонового аэрозоля и кратковременными выбросами черного углерода от лесных пожаров в месте наблюдения, вполне сопоставимы.

Исследования в аэрозольной лаборатории Санкт-Петербургского государственного университета охватывали широкий спектр исследований и разработок [Vlasenko, 2020; Vlasenko et al., 2019; Volkova et al., 2020; Mikhailov and Vlasenko, 2020; Mikhailov et al., 2021]. Лаборатория включает наземный мониторинг дисперсных характеристик аэрозолей, их химического состава и оптических свойств вблизи Санкт-Петербурга. Проводилось усовершенствование аэрозольного оборудования и расширение перечня измеряемых параметров аэрозолей, в частности: гравиметрические измерения PM10, определение органического и элементарного углерода, определение дисперсных параметров аэрозолей, измерение коэффициентов рассеяния и поглощения аэрозолей. Особое внимание было уделено развитию измерительной инфраструктуры и получению новых данных о распределении ультрамалых частиц по размерам (<100 нм). Были проведены модельные расчеты и проанализированы потенциальные источники загрязнения с использованием моделей рецепторов. Впервые в Российской Федерации был налажен мониторинг и регулярные измерения содержания сверхмалых частиц (<100 нм), важного компонента урбанизированных территорий, влияющего на здоровье населения. Проведенные исследования и разработки позволили нам изучить временную изменчивость концентраций PM10, органического и элементарного углерода в течение 2013–2021 гг. Показано, что концентрации PM10 в Петергофе заметно ниже российских и европейских предельно допустимых концентраций (ПДК). Значительное снижение концентраций PM10, органического и элементарного углерода наблюдалось в период с апреля 2020 г. по июнь 2021 г., что, вероятно, связано с пандемическими ограничениями. В целом, хотя измеренные концентрации аэрозольных веществ не превышают допустимого порога для PM10, анализ данных показывает, что Петербургский регион испытывает систематическую антропогенную нагрузку. Так, зимой загрязненные воздушные массы составляют ~69%, и только ~31% случаев относится к фоновым условиям. В пригородном районе Санкт-Петербурга в Петергофе, где расположена аэрозольная станция, основными источниками аэрозольных частиц являются выхлопные газы транспортных средств (близость к кольцевой автодороге) и биогенная активность летом. В холодное время года (осень, зима, весна) высокая концентрация сверхмалых частиц (<100 нм) поддерживается выбросами транспортных средств в виде продуктов сгорания моторного топлива. Относительно высокая концентрация аэрозольных частиц в летний сезон обусловлена дополнительным вкладом в аэрозоли биогенных источников, образующих вторичный аэрозоль в результате фотохимической конверсии летучих органических соединений. Были изучены сезонные распределения расчетных и объемных концентраций частиц по размерам за период с января 2018 г. по декабрь 2021 г. Показано преобладание частиц с размером менее 0.1 мкм. Распределение аэрозоля по объему имеет две моды: мелкодисперсную (0.1–1.0 мкм) и крупнодисперсную (>1 мкм).

Важные аэрозольные исследования были проведены учеными из Института Арктики и Антарктики. Были получены оценки интегральной прозрачности и аэрозольной оптической толщины атмосферы в Антарктиде и проанализирована их долговременная изменчивость за весь период наблюдений. Сравнение полученных данных с оценками для других природных регионов и условий показало, что в периоды без воздействия извержений вулканов уровни аэрозольного содержания в Ан-

тарктиде за последние десятилетия являются минимальными на планете и могут рассматриваться как глобальные фоновые характеристики [Radionov et al., 2020]. Учитывая значительные изменения климата на планете в целом, базы данных и архивы данных об основных климатообразующих характеристиках атмосферы, собранные за длительные периоды времени в различных регионах земного шара и, в частности, в полярных регионах, приобретают особую роль. Поскольку суммарная солнечная радиация является одним из важнейших параметров, влияющих на энергетический баланс системы Земля-атмосфера, была создана база данных ее часовых и суточных сумм на пяти российских антарктических станциях (Беллинсгаузен, Восток Мирный, Новолазаревская и Прогресс). База включает данные с начала актинометрических наблюдений по 2019 г. [Сибир и др., 2021].

Ученые МГУ имени М.В. Ломоносова в сотрудничестве с Гидрометцентром России оценили уровень городского аэрозольного загрязнения в Московским мегаполисе с использованием модельной системы COSMO-ART и интенсивных измерительных кампаний в 2018 и 2019 гг. [Chubarova et al, 2022]. Были изучены PM10, черный углерод (BC), предшественники аэрозольных газов (NO_x, SO_2, CH_x), а также параметры мелкодисперсного и грубодисперсного аэрозоля в столбе атмосферы, а также индекс, характеризующий интенсивность рассеяния частиц (IPD). Была показана корреляция BC с массовыми концентрациями NO_2 и PM10 и выраженное увеличение отношения BC/PM10 с 0.7 до 5.9% при снижении индекса IPD, связанного с усилением устойчивости атмосферной стратификации. Получена обратная зависимость между соотношением BC/PM10 и альбедо однократного рассеяния для условий интенсивного перемешивания воздуха. Используя многолетние параллельные измерения AOT в Москве и в фоновых условиях, была оценена городская составляющая AOT (AOTurb), которая составила 15–19% от общей AOT при 550 нм. Выявлен суточный цикл городской компоненты PM10urb и BCurb и их корреляция с индексами IPD. При изменении индекса IPD с 3 на 1 ночью наблюдалось примерно четырехкратное увеличение PM10urb и трехкратный рост BCurb.

Анализ изменений содержания аэрозоля в период карантина из-за COVID-19 был проведен в [Chubarova et al., 2021a]. Снижение выбросов транспортных средств в период карантина с 30 марта по 8 июня 2020 года сыграло важную роль в снижении (до 70%) концентраций многих газообразных веществ и аэрозолей (PM10) и в увеличении содержания приземного озона (до 18%). Анализ концентраций загрязняющих веществ во время карантина показал гораздо более плавный суточный цикл для большинства веществ из-за снижения интенсивности дорожного движения, особенно в часы пик, по сравнению с таковым до и после карантина. Однако особые метеорологические условия с низкими температурами в периоды карантина, а также наблюдаемая адвекция дымового аэрозоля внесли значительный вклад в изменение качества воздуха в этот период. Анализ коэффициентов частичной корреляции Пирсона с фиксированным температурным фактором выявил статистически значимую отрицательную корреляцию между индексами самоизоляции Яндекса (SII), которые могут использоваться в качестве показателя интенсивности дорожного движения, и суточными концентрациями всех загрязняющих веществ, за исключением приземного озона, который имеет статистически значимую положительную корреляцию с SII за счет фотохимических реакций.

Аэрозольное городское загрязнение над Москвой также изучалось с использованием спутниковых данных MODIS/MAIAC и наземных измерений AERONET (Zhdanova et al., 2020). Для наземных измерений городской эффект AOT составил около 0.02. В последние годы городской аэрозоль начал снижаться из-за уменьшения выбросов загрязняющих веществ. В некоторых районах Московской области городская компонента AOT составила 0.02–0.04, что может быть связано с действием местных источников выбросов аэрозоля (строительство на территории Новой Москвы, автотрассы, сельскохозяйственная деятельность). Наиболее выраженные пространственные различия AOT на территории Москвы наблюдались на уровне 5% квантиля (до 0.05–0.06).

Непрямые аэрозольные эффекты играют важную роль за счет взаимодействия аэрозоля с облачностью и оказывают значительное влияние на радиационный баланс. Они были детально изучены исследователями из МГУ имени М.В. Ломоносова и Гидрометцентра России с использованием модели COSMO, а также с применением наземных и спутниковых данных для типичных условий [Shatunova et al., 2020] и для условий карантинных мер в период пандемии COVID-19 [Shuvalova et al., 2022]. Показано, что в период карантина, при аналогичных условиях северной адвекции, наблюдалось снижение концентрации количества частиц на 40–50 $см^3$ (или на 14–16%), при увеличении эффективного радиуса капель на 8% и уменьшении оптической толщины облака на 5%, по сравнению с условиями 2018–2019 гг. Согласно численным экспериментам наблюдаемое снижение концентрации облачных капель на 50 $см^{-3}$ обеспечивает увеличение суммарной радиации у земной поверхности на 5–9 $Вт/м^2$ (или на 9–11%) в условиях сплошного покрова облаков при водосодержании облаков 200–400 $г/м^2$.

Непрямые эффекты аэрозоля также были изучены с использованием модели INMCM48 при сотрудничестве МГУ с ИВМ РАН [Poliukhov et al., 2022]. Была усовершенствована параметризация

взаимодействия аэрозоля с облаком в модели INMCM48. Проведена оценка влияния сульфатного аэрозоля на концентрацию количества облачных капель, облачный покров, суммарную радиацию и пропускание солнечной радиации облаками. Показано, что включение сульфатного аэрозоля в параметризацию взаимодействия аэрозоль–облако обеспечивает корректное воспроизведение увеличения облачного пропускания с 1980 по 2005 год в модели INMCM48 в соответствии с реанализом ERA-Interim и данными модели реконструкции солнечной радиации. Согласно предварительным оценкам, среднее глобальное радиационное воздействие, обусловленное непрямым аэрозольным эффектом, составляет –0.13 Вт/м^2 в 2005 г. по сравнению с 1850 г. Были внесены некоторые улучшения в схему расчета естественного сульфатного аэрозоля (DMS) в климатической модели ИВМ РАН, которые обеспечивают лучшее соответствие между новыми модельными оценками AOT и данными реанализа CAMS [Chubarova et al., 2021b]. Максимальный (по абсолютной величине) радиационный эффект природного сульфатного аэрозоля наблюдается над морским побережьем Антарктиды из-за высоких концентраций DMS, где среднегодовое значение RFE (radiative forcing efficiency) составляет –0.14 Вт/м^2 (до –0.45 Вт/м^2 в январе). Среднегодовое глобальное значение радиационного эффекта сульфатного аэрозоля за 2005 г. составляет –0.36 Вт/м^2 с небольшими сезонными изменениями. В целом, доля RFE за счет природного сульфатного аэрозоля равна 20%, однако наблюдаются ее значительные сезонные колебания с максимумом в январе, когда она достигает 37%.

Радиационный климат и особенности естественной освещенности в Москве были изучены по данным многолетних измерений в метеорологической обсерватории (МО) МГУ [Gorbarenko, 2019, 2020]. С 2021 года в МО МГУ начаты высококачественные измерения с использованием автоматической станции RAD-MSU (BSRN) с помощью разработанного программного обеспечения для визуализации и обработки данных измерений, включая оценки критериев качества данных [Чубарова и др., 2022].

Разработана новая модель реконструкции коротковолнового солнечного излучения [Volpert and Chubarova, 2021]. Анализ временной изменчивости солнечной радиации, обусловленной различными факторами, над территорией Северной Евразии (40–80° с.ш, 10° з.д. – 180° в.д) показал, что в большинстве случаев наблюдается тенденция к ее увеличению с 1979 года, что в основном объясняется изменениями эффективного количества облаков, за исключением загрязненных районов регионов Сибири и Китая, а также некоторых пунктов в Северной Европе, где преобладало влияние аэрозольного фактора.

Выполнен комплекс исследований по измерениям и расчетам УФ радиации. Временная изменчивость эритемной УФ радиации (Eery) над Северной Евразией (40–80° с.ш., 10° з.д. – 180° в.д.), обусловленная общим содержанием озона (X) и облачностью, была оценена с использованием реанализа ERA–Interim, спутниковых измерений TOMS/OMI и химико–климатической модели ИВМ-РГМУ за период 1979–2015 гг. [Chubarova et al., 2020]. Кроме того, сделан прогноз изменения УФ радиации до 2059 г. [Pastukhova et al., 2019]. Для условий ясного неба весной и летом наблюдаются положительные тренды Eery, (+3% за десятилетие) за счет снижения озона, связанного, главным образом, с увеличением выбросов озоноразрушающих веществ. В дополнение, вулканический аэрозоль и температура поверхности моря также играют важную роль в многолетних изменениях Eery. Для средних условий облачности по данным ERA-Interim и TOMS/OMI над территорией Восточной Европы, Сибири и Северо-Восточной Азии наблюдаются более выраженные положительные тренды Eery (до +5–8% за десятилетие) из-за снижения содержания озона и облачности. В то же время по данным химико-климатического моделирования максимальный рост Eery составил всего +3–4% за десятилетие. Наблюдаемое увеличение Eery привело к заметному сокращению площади с УФ-оптимумом для типов кожи 1 и 2, особенно в апреле, на территории Евразии. В то же время в центральных арктических регионах снижение Eery в июле привело к изменению УФ ресурсов с “избытка УФ-излучения” на “оптимум УФ–излучения” для типов кожи 2 и 3 [Chubarova et al., 2020]. Оценки прогноза Eery с 1979 по 2059 г., свидетельствуют о нелинейном характере изменения общего содержания озона и Eery в 21 веке. Значения Eery за 2016–2020 гг. на 2–5% выше, чем его значения за 1979–1983 гг. в среднем по всей Северной Евразии (с максимумом в 6% в полярных широтах). Они выравниваются в 2035–2039 гг., а затем к 2055–2059 гг. постепенно снижаются (по сравнению с показателями 1979–1983 гг.) на 4–6% для Азии и на 6–8% для Северной Европы. К середине 21 века также наблюдаются различия в пространственном распределении ультрафиолетовых ресурсов, особенно весной и летом. Эти различия проявляются в расширении зон с дефицитом ультрафиолетового излучения на севере и сокращении зон с избытком ультрафиолетового излучения на юге [Pastukhova et al., 2019].

В Сибири многолетние измерения УФ-В радиации на станции TOR ИАО СО РАН за 2003–2016 гг., были использованы для изучения взаимосвязи между УФ-излучением и влияющими на него факторами, такими как ОС озона, балл облаков, оптическая толщина аэрозоля и альбедо поверхности [Belan et al., 2020, 2021]. Показано, что в условиях чистой атмосферы при ясном небе уве-

личение ОС озона на 1% приводит к снижению среднего уровня УФ-В излучения на 1.45%. Средний вклад АОТ в изменение суточного притока УФ-В излучения составляет 4.3–10.9%. Облачность может уменьшить УФ-излучение в среднем на 0.7–28.7%. Увеличение альбедо подстилающей поверхности способствует увеличению УФ-В излучения в среднем на 4–8% при ОС озона 300–400 е.Д. и на 9–13% при ОС озона 400–500 е.Д. при зенитном угле Солнца в диапазоне от 52 до 68°. В дни со свежевыпавшем снегом увеличение UV-B излучения может достигать 66%. Разработан новый детектор ультрафиолетового излучения на основе искусственных нанокристаллов периклаза (MgO) [Tentukov et al., 2022]. В последние годы в Фоновой обсерватории расширен набор измеряемых параметров, которые теперь включают измерения коротковолнового излучения и радиационного баланса в диапазонах 0.3–2.8 и 4.5–42 мкм [Belan et al., 2022a]. Показано, что суточный радиационный баланс составляет 1.20 ± 1.18 МДж/м^2 с ноября по март, когда поверхность земли покрыта устойчивым снежным покровом, и 8.83 ± 4.49 МДж/м^2 с мая по сентябрь, когда поверхность свободна от снега. В период стабильного снежного покрова с декабря по март суточное поглощение солнечной радиации поверхностью не превышало 2 МДж/м^2, в то время как в летний период оно колебалось от 10 до 25 МДж/м^2 [Belan et al., 2022b].

Научно-производственное объединение “Тайфун” разработало лидарную сеть АК-3 для зондирования параметров средней атмосферы на длинах волн 308, 355 и 532 нм [Ivanov et al., 2020]. Сеть оснащена лидарными станциями Росгидромета, на основе измерений которых был проведен цикл исследований характеристик стратосферного аэрозоля. В [Korshunov, 2022; Korshunov and Zubachev, 2021] было проведено исследование многократного рассеяния лазерного излучения в перистых облаках. Было проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Результаты измерений параметров перистых облаков с использованием двухволнового поляризационного лидара на длинах волн 355 и 532 нм в Обнинске (55° с.ш.) с 2012 по 2020 г. представлены в [Grebennikov et al., 2022]. Исследовались также измерения вулканического аэрозоля в слое с 13 до 18 км после извержения вулкана Райкоке (Курильские острова, 48.29° с.ш., 153.25° в.д.) на лидарных станциях Росгидромета в Обнинске, Знаменске, Новосибирске и Петропавловске-Камчатском в июне 2019 г. Влияние солнечной активности на аэрозоль средней атмосферы по данным лидарных наблюдений на длинах волн 532 и 355 нм в Обнинске с 2014 по 2018 г. обсуждается [Korshunov and Zubachev, 2022]. В нижней стратосфере в период от 0 до 2 дней после магнитной бури было обнаружено в среднем незначительное (~7%) уменьшение обратного рассеяния, что связано с резким уменьшением потока галактических космических лучей. За солнечно-протонными событиями с запаздыванием в 3–8 дней следует увеличение обратного рассеяния аэрозоля в диапазоне от 20 до 70%. Результаты лидарных наблюдений на длине волны 532 нм в Обнинске за период с 2012 по 2021 г. представлены в [Korshunov, 2021]. Они продемонстрировали, что максимумы аэрозоля связаны с извержениями вулканов и лесными пожарами. Отмечено, что в некоторых эпизодах добавление дымового аэрозоля к АОТ на высоте 10–30 км к типичному стратосферному аэрозолю приводит к дополнительному росту на 50–150%. В то же время, в среднегодовом выражении эта добавка в среднем за 2014–2021 гг. составляет около 10%.

В исследовании [Kulikov et al., 2019] было показано, что солнечное излучение с длиной волны 121.6 нм может приводить к образованию заметного количества H_2O_2 внутри частиц полярных мезосферных облаков. В этой работе впервые были проведены комплексные измерения образования H_2O_2 внутри тонких (50 нм) образцов льда из H_2O и $H_2O : O_2$ с помощью вакуумного ультрафиолетового излучения с длиной волны 121.6 нм в широком диапазоне температур (20–140 K).

4. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ

В ИОА СО РАН, начиная с 90-х гг. прошлого века, проводится лидарный мониторинг средней атмосферы для исследования особенностей поведения аэрозольной компоненты и температурного режима. По лидарным данным 2011–2021 гг. проведена оценка изменчивости содержания фонового аэрозоля в стратосфере на основе использования оптических параметров [Маричев и Бочковский, 2020; Marichev and Bochkovskii, 2022a]. Выявлена устойчивая тенденция максимального наполнения нижней стратосферы (10–30 км) фоновым аэрозолем зимой, малым содержанием, вплоть до полного отсутствия, летом и промежуточным значением с убыванием весной и ростом осенью. В верхней стратосфере (30–50 км) фоновый аэрозоль в летний период года практически отсутствует. Тем самым показана внутригодовая цикличность наполнения стратосферы Западной Сибири фоновым аэрозолем.

Предложена оптико-локационная модель стратосферного аэрозоля Западной Сибири для разных сезонов и месяцев года [Маричев и др., 2022]. При сравнении предложенной модели с известными выявлено несоответствие последних реальному состоянию стратосферного аэрозоля Западной Сибири, что в свою очередь может приводить к грубым погрешностям расчета лидарных сигналов и ослабления радиации. В работе [Черемисин и др., 2021] представлены результаты лидарных

наблюдений аэрозольного наполнения верхней тропосферы и стратосферы пирокумулятивными выбросами аэрозолей горения от пожаров в Сибири, проведенных на территории Западной Сибири, в Томске, в течение августа 2019 г. Полученная информация расширяет знания об источниках наполнения стратосферы аэрозолем и, в итоге, может использоваться для более достоверной оценки влияния этого аэрозоля на климат.

В лидарном исследовании термического режима стратосферы над Томском выявлено ежегодное проявление зимних внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Как показала статистика наблюдений, чаще происходят слабые (минорные) ВСП в отличие от сильных (мажорных). ВСП отличаются как по длительности проявления – от нескольких дней до месяца и более, так и по амплитуде положительных отклонений от среднемесячных значений для мажорных ВСП с максимумом до 60° K. Высота стратопаузы при сильных ВСП может опускаться до 27 км (стандартная высота: 50–55 км). Для региона Западной Сибири для длительного периода года апрель – ноябрь в подавляющем большинстве случаев вертикальное распределение температуры хорошо согласуется с распределением по международной модели CIRA-86 [Marichev and Bochkovskii, 2020, 2022b].

На Сибирской лидарной станции ИОА СО РАН в августе–октябре 2017 г. зафиксированы стратосферные аэрозольные слои невулканического происхождения, отношение рассеяния R(H) которых в максимуме на длине волны 532 нм достигало 5.8. Построенные обратные траектории движения воздушных масс показали, что источником этих аэрозольных слоев в стратосфере над Томском, явились канадские лесные пожары Северной Америки, которые имели место в середине августа. За счет пироконвекции продукты горения биомассы были подняты на стратосферные высоты и распространились по всему северному полушарию. Наличие результатов лазерного зондирования на двух длинах волн 355 и 532 нм дало возможность более полно проанализировать динамику наблюдаемых аномальных аэрозольных слоев, а также на основе этих данных получить качественную информацию о размерах аэрозольных частиц, формирующих эти слои. Анализ результатов наблюдений на основе параметра Ангстрема, позволил предположить, что его значение для фонового ансамбля рассеивающих аэрозольных частиц на высотах 16–19 км примерно 2.8, а выше (на высотах 23–25 км) приближается к четырем (X = 3.6–3.8). На высотах локализации выраженных аэрозольных слоев его значение достигает единицы (X = 1) [Невзоров и др., 2019].

В 2019–2022 гг. научная группа ИФА им. А.М. Обухова РАН продолжила исследования состава атмосферы спектроскопическими методами и получила следующие результаты. Получены уточненные оценки трендов общего содержания CO в разных районах Евразии и, в частности, России. Установлено замедление скорости снижения ОС CO в фоновых районах Евразии [Rakitin et al., 2020]. Установлен вклад климатических изменений в продолжающееся снижение ОС CO в Москве [Ракитин и др., 2021]. Исследовано влияние метеорологических условий на снижение концентраций основных атмосферных загрязнителей в Москве в период действия локдауна во время пандемии COVID-19 в 2020 г. [Скороход и др., 2022].

Разработан многофункциональный программно-вычислительный комплекс TROPOMI_tools, позволяющий проводить автоматический сбор, обработку и анализ измерительных данных нескольких космических систем мониторинга (MODIS, AIRS, OMI, TROPOMI). Результаты апробации TROPOMI_tools опубликованы в нескольких работах [Ракитин и др., 2021; Скороход и др., 2022]. Выполнены валидационные исследования измерений новейшего орбитального спектрометра высокого пространственного разрешения Sentinel-5P TROPOMI наземными спектроскопическими данными ИФА РАН в пунктах Москва и Звенигород (Звенигородская научная станция - ЗНС) по тропосферному и стратосферному содержанию NO_2 и ОС CO. Получены характеристики соответствия между орбитальными и наземными спектроскопическими измерениями в зависимости от пространственного разрешения, облачных условий, сезонов, наблюдаемых углов, высоты пограничного слоя атмосферы (ПСА). Полученные характеристики соответствия находятся в хорошем согласии с результатами валидации TROPOMI данными международных наблюдательных сетей NDACC, MAXDOAS, Pandonia по NO_2, NDACC и TCCON по CO.

Выполнены сопоставления и валидация орбитальных измерений общего содержания NO_2 прибором OMI по измерениям 10 станций NDACC в период 2004–2020 гг. Получены оценки линейных трендов ОС NO_2 на указанных станциях, а также оценки сезонной и широтной зависимости характеристик сопоставления измерений ОС NO_2 OMI и пунктов NDACC. Для пункта ЗНС также получены характеристики соответствия орбитальных измерений OMI наземным данным по тропосферному и стратосферному содержанию NO_2; установлено соответствие трендов тропосферного и стратосферного содержания, полученных на основе данных OMI и измерений ЗНС. Для других 9 станций NDACC, измеряющих только ОС NO_2 соответствие между трендами, полученными по данным OMI и наземных пунктов, в целом намного хуже.

В ИФА РАН продолжается развитие и усовершенствование наземного метода многоугловой дифференциальной спектроскопии (ДОАС) определения содержания NO_2, H_2CO и других химиче-

ски активных газов в ПСА. В 2016 году группа ИФА РАН приняла участие в международных сравнениях приборов и методик измерения NO_2 и других газов методом ДОАС – CINDI-2. На сравнениях CINDI-2 были представлены 36 спектральных приборов от 26 различных научных групп. В статьях [Kreher et al., 2020; Wang et al., 2020] рассматриваются результаты сравнений методик восстановления таких химически активных веществ, влияющих на химию озона, как NO_2, O_4, O_3, H_2CO, HNO_2. По результатам сравнений сформулированы рекомендации по режимам измерений и параметрам обработки измерений метода ДОАС.

По результатам наблюдений на ЗНС ИФА РАН и в ИОА СО РАН (г. Томск) получены оценки временной изменчивости ОС формальдегида H_2CO [Бручковский и др., 2019]. Показано существование статистически значимого положительного тренда ОС формальдегида в зависимости от температуры при $T > 5$°C в обоих пунктах наблюдений. Наблюдаемый положительный тренд, по-видимому, связан с ростом биогенных выбросов изопрена и др. неметановых летучих органических соединений с ростом температуры, а также площадей лесных и торфяных пожаров. В воздушных массах, приходящих на ЗНС из Москвы, наблюдается устойчивое превышение ОС формальдегида в среднем на $0.4 \pm 0.1 \times 10^{16}$ см$^{-2}$ при положительных температурах и на $0.8 \pm 0.2 \times 10^{16}$ см$^{-2}$ при отрицательных температурах. Несмотря на значительную удаленность от Москвы, наблюдаемые на ЗНС значения в целом на 10% выше наблюдаемых в Томске. По наблюдениям в Томске статистически значимое превышение ОС формальдегида при ветрах с направления основной городской застройки ($3.24 \pm 0.3 \times 10^{16}$ см$^{-2}$) величин, наблюдаемых при других направлениях ($2.63 \pm 0.2 \times 10^{16}$ см$^{-2}$) зафиксировано только при температурах выше 25°C.

Облачность и аэрозоль оказывают существенное влияние на возможности восстановления содержания малых газовых составляющих (МГС) (NO_2, H_2CO и др.) в нижней тропосфере методами ДОАС. Поскольку имеется большой объем оптических наблюдений методом ДОАС, которые не сопровождаются прямыми измерениями их характеристик, решение задачи определения свойств облачности и аэрозоля по самим спектральным измерениям могло бы повысить точности измерения МГС. В цикле работ [Chulichkov et al., 2021; Nikitin et al., 2019, 2020; Postylyakov et al., 2020b,] рассматриваются задачи определения характеристик облачности (нижняя граница, оптическая толща и др.) и аэрозоля (оптическая толща и др.) по характеристикам измеренного рассеянного солнечного излучения (оптическая толща O_4, индекс цветности, абсолютная интенсивность и др.). В качестве методов решения возникающих нелинейных задач оценивания используются методы машинного обучения: искусственных нейронных сетей и случайного леса.

На кафедре физики атмосферы и в Лаборатории исследования озонового слоя и верхней атмосферы СПбГУ проводятся исследования различных параметров атмосферы, в том числе и ее газового состава, с помощью наземной аппаратуры в УФ, видимой, ИК и МКВ областях спектра.

Наблюдательная станция СПбГУ в Петергофе оснащена спектральным комплексом на базе Фурье-спектрометра Bruker IFS 125HR. Регулярные измерения спектров солнечного ИК-излучения с 2009 г. позволяют исследовать временные вариации ОС и элементов вертикальной структуры различных климатически и экологически важных МГС атмосферы. Использование наземных измерений наряду со спутниковыми позволяет изучать пространственно-временные вариации содержания МГС, а также оценивать их долговременные тренды [Тимофеев и др., 2020а]. Применяемые методики интерпретации наземных спектральных измерений постоянно совершенствуются для достижения более высокой точности и однородности измерений [Виролайнен и др., 2020а, 2020б; Поляков и др., 2019, 2020; Polyakov et al., 2021].

За период 2019–2022 гг. проведены комплексные исследования пространственно-временных вариаций ОС различных МГС с использованием наземных и спутниковых измерений, а также результатов численного моделирования в окрестностях Санкт-Петербурга [Виролайнен и др., 2021; Неробелов и др., 2020, 2022а, 2022б; Никитенко и др., 2021; Тимофеев и др., 2019; Nerobelov et al., 2021, 2022; Polyakov et al., 2020, 2021]. Измерительная станция СПбГУ участвовала в комплексных экспериментах по валидации спутниковых измерений прибором TROPOMI ОС формальдегида [Vigoroux et al., 2020], а также метана и CO [Sha et al., 2021]. Измерения CO, HCN и C_2H_6 были использованы для определения и исследования загрязнения воздуха от лесных пожаров в районах Арктики и средних широт Северного полушария [Lutsch et al., 2020].

Изучена информативность наземных ИК-измерений относительно элементов вертикальной структуры ряда МГС [Виролайнен и др., 2022; Тимофеев и др., 2020б]. В результате проведенных исследований получена новая информация об элементах вертикального распределения содержания озона, CO_2 и HNO_3, проведены сопоставления наземных и спутниковых измерений с данными численного моделирования [Бордовская и др., 2022; Виролайнен и др., 2022; Никитенко и др., 2022; Тимофеев и др., 2021]. Получены результаты по определению вертикального распределения метана в тропосфере Западной Сибири [Макарова и др., 2020].

С использованием спектрометров OceanOptics, выполняющих зенитные измерения при низ-

ких углах Солнца в УФ и ВИД-областях спектра, с помощью методики ДОАС проводятся исследования содержания NO_2 и их эмиссий в Петергофе и в окрестностях мегаполиса Санкт-Петербурга [Ионов и Поберовский, 2020; Ionov et al., 2022].

Исследования в области наземного МКВ зондирования атмосферы в СПбГУ были направлены на совершенствование методик интерпретации измерений радиометра RPG-HATPRO, зондирование облачной атмосферы, определение влагосодержания и водозапаса облаков [Бирюков и Косцов, 2019; Kostsov et al., 2019, 2020].

В рамках европейской программы VERIFY в СПбГУ в 2019–2020 гг. были проведены мобильные измерительные кампании EMME (Emission Monitoring Mobile Experiment) с помощью приборов Bruker EM27/SUN, а также мобильных ДОАС-измерений. Программа была выполнена международным коллективом сотрудников СПбГУ (Россия), Karlsruhe Institute of Technology (Germany) and the University of Bremen (Germany). В ходе кампаний были получены данные о распределении вокруг мегаполиса Санкт-Петербург ОС метана, CO, CO_2 и NOx [Makarova et al., 2021]. Проведенные измерения позволили оценить удельные и интегральные эмиссии важнейшего антропогенного парникового газа – CO_2 в мегаполисе Санкт-Петербурга [Неробелов и др., 2021; Тимофеев и др., 2020в, 2022; Ionov et al., 2021; Makarova et al., 2021]. Измерения показали существенное занижение антропогенных эмиссий CO_2 в мегаполисе Санкт-Петербурга по данным инвентаризационного метода. Также были проведены сопоставления различных спутниковых измерений XH_2O, XCO_2, XCH_4 и XCO с наземными измерениями в рамках программы COCCON [Alberti et al., 2022].

Продолжены дистанционные измерения оптических и микрофизических параметров атмосферного аэрозоля с помощью аппаратуры CIMEL и локальных измерений вблизи Санкт-Петербурга [Власенко и др., 2019; Волкова и др., 2020].

Совместно с ГГО продолжались исследования вариаций ОС озона с использованием спектрофотометра Добсона и озонометра М-124 в том числе сравнения различных наземных измерений ОСО [Неробелов и др., 2022а; Nerobelov et al., 2022]. Проведены первые попытки интерпретации измерений нового российского озонометра УФОС для получения данных по ОС озона [Ионов и Привалов, 2021].

В работах [Устинов и др., 2019, 2020] коллектив НПО “Тайфун” представил результаты систематических (2003–2017 гг.) измерений ОС и средней по высоте концентрации метана и окиси углерода на Антарктической станции Новолазаревская с использованием дифракционного спектрометра с разрешением 0.2 $см^{-1}$. За период измерений средняя по высоте объемная концентрация CH_4 и CO составила (1663 ± 34) ppb и (37 ± 8) ppb, соответственно. Приведены оценки трендов и характеристик сезонных вариаций и результаты сопоставления с наземными и спутниковыми данными.

В ФГБУ “ГГО” продолжается обеспечение работы наземной озонометрической сети Росгидромета. Наблюдения на 28 станциях ведутся с 1973 г. [Соломатникова и др., 2020, 2021, 2022]. Отдельно проведен анализ для станций Арктического региона. На 12 станциях продолжаются измерения эритемной УФ радиации. Значительную роль в обеспечении наземных измерений играет калибровка измерительной аппаратуры. Привязка озонометров М-124 к мировой шкале осуществляется путем регулярных калибровок по эталону озонометрической сети Росгидромета (Спектрофотометр Добсона № 108).

Продолжаются работы по переоснащению озонометрической сети Росгидромета. В ходе опытной эксплуатации новых спектрометров УФОС, предназначенных для комплексных измерений спектрального состава суммарной УФР и общего содержания озона, усовершенствованы программное обеспечение, методы калибровки и расчета ОС озона.

Анализ наземных наблюдений на 38 европейских станциях позволил оценить реакцию озонового слоя над Европой на экстремальное истощение озонового слоя в Арктике в 2020 г. Ежегодно пополняется массив данных об ОС озона, поступающий с российских антарктических станций (ААНИИ) Мирный, Новолазаревская и Восток и с научно-экспедиционных судов ААНИИ. До начала 2000-х гг. на антарктических станциях отмечалась устойчивая тенденция уменьшения общего содержания озона антарктической весной, в настоящее время наблюдается тенденция возвращения содержания озона к значениям, характерным для периода, предшествующего проявлению эффекта озоновой дыры [Сибир и др., 2020].

С 1972 г. Главная Геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова участвует в международных программах глобального фонового мониторинга состава атмосферы (Программа Глобальной службы атмосферы – ГСА ВМО). В настоящее время исследования парниковых газов (ПГ) входят в обязательную программу наблюдений на станциях фонового мониторинга, а данные российских станций представляются в международные центры данных [Ивахов и др., 2019; Парамонова и др., 2020].

В работе [Kulikov et al., 2020] были сопоставлены значения 15 конвективных индексов, полученных по одновременно измеренным радиозондовым и микроволновым профилям температуры и водяного пара над Нижним Новгородом в течение 5 конвективных сезонов 2014–2018 гг. Для большинства индексов была обнаружена высокая корреляция (с коэффициентами ~0.7–0.85).

В работе [Беликович и др., 2019] описан математический аппарат метода оптимальной оценки для восстановления профилей температуры тропосферы (0–10 км) по радиометрическим данным с параметризацией искомых профилей в виде разложения по эмпирическим ортогональным функциям, получаемым путем сингулярного анализа ковариационной матрицы данных радиозондовых измерений.

В работе [Belikovich et al., 2021] проанализированы различия между наблюдаемыми и смоделированными микроволновыми спектрами теплового излучения атмосферы в диапазоне 20–59 ГГц, полученными в результате более чем 4-летних наземных микроволновых и радиозондовых наблюдений над Нижним Новгородом. В последующей работе [Belikovich et al., 2022] было показано, что использование технически более сложной модели поглощения, основанной на применении формализма ECS, позволяет минимизировать систематическое рассогласование моделируемых и измеренных спектров до 0.6 K.

Результаты разработки мобильного твердотельного микроволнового спектрорадиометра, работающего в 5-мм полосе поглощения молекулярного кислорода, представлены в работе [Швецов и др., 2020].

5. ИНТРЕПРЕТАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования по широкому кругу современных проблем спутникового дистанционного зондирования атмосферы (ДЗА) и подстилающей поверхности проводились в следующих направлениях:

1. Спутниковая целевая аппаратура, калибровка и валидация спутниковых данных и информационных продуктов.

2. Определение характеристик атмосферы и подстилающей поверхности по данным спутниковых измерений в различных спектральных диапазонах.

3. Использование данных спутниковых измерений и информационных продуктов для изучения различных процессов и явлений в атмосфере, океане и на суше, в задачах численного прогноза погоды (ЧПП) и климатических исследованиях.

За отчетный период группировка отечественных метеоспутников была пополнена за счет запуска новых полярно-орбитальных (п/о) и геостационарных космических аппаратов (КА) серий “Метеор-М” и “Электро-Л”.Кроме того, 28 февраля 2021 г. на высокоэллиптическую орбиту типа “Молния” запущен КА Арктика-М № 1, первый из создаваемой высокоэллиптической гидрометеорологической космической системы “Арктика-М”, см. [Асмус и др., 2021], дополняющей п/о и геостационарные метеоспутники в части оперативного получения в квазинепрерывном режиме гидрометеорологических данных по Арктическому региону Земли.

К первому направлению можно отнести обзор исследований по контролю бортовой радиометрической калибровки целевой аппаратуры отечественных оперативных метеоспутников [Rublev et al, 2019], выполненных в рамках модернизации созданной в НИЦ космической гидрометеорологии “Планета” (кратко НИЦ “Планета”) системы калибровки/валидации спутниковых данных и продуктов. Информационные и технические характеристики гиперспектрального ИК-зондировщика (ИК Фурье-спектрометра) ИКФС-2 за период 4-летней эксплуатации на борту Метеор-М № 2, включая погрешности радиометрической и спектральной калибровок, обсуждаются в [Timofeev et al., 2019]. Результаты исследования ковариационной матрицы шума в измерениях ИКФС-2 представлены в [Козлов и др., 2022]. Изучение климатических изменений Земли на основе анализа спектров уходящего теплового ИК-излучения, регистрируемых различной спутниковой аппаратурой, требует тщательной взаимной калибровки приборов. В работе [Козлов и др., 2019] описана взаимная калибровка Фурье-спектрометров SI-1 (устанавливались на спутниках “Метеор-28” и “Метеор-29”, 1977 и 1979 гг.) и ИКФС-2 (КА “Метеор-М” № 2), необходимая для анализа изменений ИК-спектров атмосферы за прошедшие 40 лет. В статьях [Заболотских, 2021; Заболотских и Балашова, 2021] приведено описание метода взаимной калибровки микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ на борту КА “Метеор-М” № 2-2 в восьми каналах сканера (диапазон частот 10.6–36.5 ГГц) и микроволнового радиометра AMSR2 (КА GCOM-W, JAXA).

Ряд публикаций специалистов СПбГУ посвящен валидации различных спутниковых информационных продуктов ДЗА, а также сравнению наземных и спутниковых методов измерений. Так, в работе [Kostsov et al., 2019] осуществлены сравнения оценок количества жидко-капельной воды в облаках (cloud liquid water path) для территории Сев. Европы по данным наземных микроволновых (радиометр RPG-HATPRO) и спутниковым (радиометры – имаджеры SEVIRI и AVHRR) измерений. В работе [Бордовская и др., 2022] проведено сопоставление измерений вертикальных профилей содержания озона в атмосфере Санкт-Петербурга с помощью наземного инфракрасного спектроскопического метода и спутникового микроволнового метода (аппаратура MLS/EOSAura) за период 2018–2020 гг. Анализ точности определения ОС озона по данным ИКФС-2 КА Метеор-М № 2 выполнен в работах [Nerobelov et al., 2022; Polyakov et al., 2021].

Несколько статей посвящены результатам сравнения наземных и спутниковых спектроскопических измерений ОС CO_2 (XCO_2). В статье

[Виролайнен и др., 2020] проведено сопоставление наземных (Фурье-спектрометр Bruker 125HR) и спутниковых (спектрометр OCO на борту КА OCO-2) измерений XCO_2 вблизи Санкт-Петербурга. Сравнения наземных и спутниковых (аппаратура ACE) измерений содержания углекислого газа в тропосфере и стратосфере [Никитенко и др. 2022] показало, что между двумя типами измерений наблюдается хорошее согласие. Результаты сравнения спутниковых (по данным КА Sentinel-5P) и наземных (сети TCCON и NDACC-IRWG) спектроскопических измерений содержания CH_4 и CO в атмосфере приведены в [Sha et al., 2021]. Погрешности результатов температурно-влажностного зондирования атмосферы по данным ИКФС-2 КА Метеор-М № 2 оценены в статье [Филей и др., 2019].

Исследования по второму направлению в последние годы характеризуется активным использованием алгоритмов нейронных сетей (ANN в англоязычной литературе) или машинного обучения (МО).

Значительное внимание в отчетный период уделялось традиционной задаче спутниковой метеорологии [Успенский, 2021] – развитию методов спутникового мониторинга параметров облачности и осадков. Общие технологические аспекты применения алгоритмов МО для классификации облачности и выделения снежного покрова по данным радиометров-имаджеров КА серий Метеор-М, Электро-Л и Himawari рассмотрены в [Крамарева и др., 2019]. Обзор различных методов (пороговых, с использованием алгоритмов МО) дистанционного определения характеристик облачного покрова и осадков по данным радиометров -имаджеров с п/о и геостационарных спутников представлен в работе [Волкова и др., 2021]. В статье также анализируются результаты валидации спутниковых продуктов, полученные в результате сравнения с наземными метеорологическими наблюдениями и независимыми спутниковыми оценками. К этой же тематике относятся статьи [Андреев и др., 2019; Волкова и Косторная и др., 2020; Волкова и Кухарский, 2020; Филей, 2019, 2020а; Чурсин и Кужевская, 2022]. В статье [Кучма и Шамилова, 2022] предложен алгоритм детектирования областей тумана по данным измерений радиометра–имаджера AHI с геостационарного КА Himawari-8. В работах [Кучма и др., 2022; Филей, 2020б; Филей и Маренцо, 2021] рассмотрены новые алгоритмы дистанционного определения параметров морского аэрозоля и вулканического пепла по данным измерений радиометров-имаджеров п/о и геостационарных метеоспутников.

Специалисты ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН провели серию исследований по спутниковому мониторингу параметров облачности. В работе [Астафуров и др., 2021а] на основе результатов классификации облачности по данным спутниковых радиометров -имаджеров MODIS/EOSTerra и VIIRS/S-NPP разработаны статистические модели характеристик (оптическая толщина, эффективный радиус частиц, водозапас, высота ВГО) облачного покрова для 14 типов облачных образований над территорией Зап. Сибири в летнее время. Согласно [Астафуров и др., 2021б], указанные модели могут быть использованы для параметризации и учета влияния облачности в задачах климатического моделирования на территории Зап. Сибири. В статьях [Скороходов и др., 2022а, 2022б] предложен алгоритм ANN для оценки высоты нижней границы однослойной облачности над территорией Зап. Сибири по данным MODIS, причем для обучения ANN использованы в качестве эталона данные спутникового лидара CALIOP (КА CALIPSO), радиолокатора CPR (КА CloudSat) и наблюдения наземной сети ASOS. В статьях [Тарасенков и др., 2021а, 2021б; Tarasenkov et al., 2021b, 2022] разработаны и апробированы алгоритмы оценки размера области влияния разорванной облачности на результат восстановления по данным MODIS коэффициентов отражения безоблачных участков земной поверхности при наблюдении через просветы в поле разорванной облачности.

Обзор работ по развитию методов и средств (современных и перспективных) температурно-влажностного зондирования атмосферы (ТВЗА) со спутников выполнен в [Успенский и др., 2021]. Дано краткое описание существующих и планируемых к запуску атмосферных зондировщиков, а также алгоритмов и технологий обработки спутниковых данных. Использование алгоритмов ANN для получения продуктов ТВЗА по данным микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ рассмотрено в [Филей и др., 2021, 2022]. Регрессионный алгоритм определения влагосодержания в безоблачной атмосфере над океаном по измерениям МТВЗА-ГЯ описан в [Косторная и др., 2020].

Были продолжены исследования по важному направлению спутникового ДЗА – развитию методов дистанционного определения ОС озона и ряда малых газовых составляющих атмосферы, включая парниковые газы. В статьях [Поляков и др., 2019; Тимофеев и др., 2021] описан алгоритм обработки данных ИКФС-2 спутника Метеор-М № 2, основанный на применении ANN и спутниковых измерений спектрометра OMI, используемых для обучения ANN. В работе [Блощинский и др., 2022] рассматривается алгоритм ANN оценки ОС озона поданным радиометра-имаджера МСУ-ГС геостационарного КА Электро-Л № 3, причем для обучения ANN используются оценки ОС озона по данным спектрометра OMPS КА S-NPP.

Статья [Успенский, 2022] содержит обзор работ последнего двадцатилетия, посвященных развитию в нашей стране и за рубежом методов и средств измерения со спутников полей концентрации дол-

гоживущих углеродсодержащих парниковых газов в атмосфере – диоксида углерода CO_2 и метана CH_4. Рассмотрены методы интерпретации измерений современных спутниковых гиперспектрометров ближнего инфракрасного и инфракрасного диапазонов спектра. Приведены сведения о программах развития отечественных и зарубежных спутниковых систем мониторинга содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере. В статье [Голомолзин и др., 2022] описана регрессионная методика определения XCO_2 в атмосфере по данным ИКФС-2 КА Метеор М № 2, предикторами в которой являются эффективные спектральные оптические толщины атмосферы в области спектра 8–14 мкм, а референсными значениями XCO_2 для построения регрессии – результаты контактных измерений концентраций CO_2 на высотной мачте международной обсерватории ZOTTO (Центральная Сибирь) и фоновые измерения в обсерватории NOAA на вулкане Мауна-Лоа (остров Гавайи), полученные в 2015–2016 гг. Валидация методики проводилась сопоставлением полученных усредненных оценок XCO_2 с данными параллельных измерений над Сибирью спутниковыми спектрометрами OCO КА OCO-2 и CrIS КА NOAA-20 (США).

Коллективом специалистов ИФА РАН выполнен цикл исследований по дистанционному определению интегрального содержания двуокиси азота NO_2 в тропосфере с высоким пространственным разрешением по данным измерений спектрометра ГСА со спутников наблюдения Земли серии Ресурс-П. Разработанная методика позволяет получать оценки распределения NO_2 в тропосфере с пространственным разрешением около 2.4 км на сетке 120 м. Для валидации крупномасштабных структур, выявляемых на восстановленных полях распределения NO_2, в [Postylyakov et al., 2019a, 2019b; 2020] выполнено сравнение с аналогичными оценками по данным спектрометров TROPOMI (КА Sentinel-5P) и OMI (КА Aura), которое подтвердило достоверность получаемых результатов. Для валидации мелкомасштабных структур и для нахождения источников выбросов NO_2 коллективом ИФА РАН совместно с физическим факультетом МГУ им. М.В. Ломоносова ведется разработка химико - транспортных моделей соответствующего масштаба [Davydova et al., 2021; Mukhartova et al., 2019, 2021; Zakharova et al., 2021], с помощью которых продемонстрирована возможность на основе данных ГСА/Ресурс-П детектировать точечные источники загрязнения и определять их мощность.

В Институте естественных наук и математики Уральского федерального университета предложены методы решения обратных задач ДЗА для определения вертикального профиля и общего содержания CH_4 [Zadvornykh et al., 2019], а также отношения концентраций HDO/H_2O [Zadvornykh et al., 2021] в атмосфере Земли по данным измерений спектров уходящего излучения теплового и ближнего ИК-диапазонов (спектрометр TANSO-FTS) со спутника GOSAT-2. Впервые данным методом восстановлен вертикальный профиль относительного содержания изотопологов HDO/H_2O (δD) в атмосферном водяном паре по данным TANSO-FTS, причем одновременное использование спектров уходящего излучения атмосферы в тепловом и ближнем ИК диапазоне дает более высокую корреляцию спутниковых оценок δD с данными наземного зондирования на FTIR станциях международной сети TCCON [Задворных и др., 2022]. В статье [Gribanov et al., 2021] исследована возможность определения относительного содержания $^{13}CO_2/^{12}CO_2$ в атмосфере по данным спутникового Фурье-спектрометра типа IASI/Metop. Эксперименты с использованием моделированных измерений Фурье-спектрометра IASI-NG, показали, что вертикальные профили концентрации $13CO_2$ и относительного содержания $^{13}CO_2/^{12}CO_2$ в атмосфере удовлетворительно восстанавливаются в тропосфере для интервала высот 2–11 км.

В ИОА СО РАН разработан алгоритм восстановления коэффициентов отражения земной поверхности с учетом влияния поляризации излучения [Tarasenkov et al., 2020]. Для оценки погрешности алгоритма используются измерения MODIS в пяти каналах и тестовые точки в центре хвойных лесных массивов в летний период года на трех участках (юг Томской обл., Иркутская и Московская обл.). Сопоставление результатов применения алгоритмов с учетом и без учета поляризации, известного алгоритма NASA MOD09 с измерениями, принятыми за эталонные, показывает, что средние значения новых оценок (с учетом влияния поляризации) ближе к эталонным, чем получаемые с помощью алгоритма NASA MOD09.

В НПО “Тайфун” исследованы характеристики высотных струйных течений и поля ветра в верхней тропосфере, а также их связи с климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными явлениями по данным измерений радиометра – имаджера SEVIRI, установленного на европейских геостационарных метеоспутниках второго поколения Meteosat-8,-9,-10 [Nerushev et al., 2019]. В статье [Нерушев и др., 2021а] предложена статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений Северного полушария, определенных по данным SEVIRI. В работе [Нерушев, и др., 2021б] рассмотрена связь аномалий среднемесячной приземной температуры воздуха на метеорологических станциях Европы и Европейской территории России с характеристиками высотных струйных течений. В работах [Нерушев и Ивангородский, 2019; Nerushev et al., 2022] предложен метод определения зон турбулентности в верхней тропосфере по данным измерений SEVIRI и постро-

ена статистическая модель временной изменчивости площадей зон турбулентности.

Из большого количества публикаций по различным приложениям результатов спутникового ДЗА остановимся на тех из них, которые относятся к мониторингу опасных природных явлений и антропогенных эмиссий парниковых газов, а также подготовке численных прогнозов погоды и климатическим исследованиям.

В статье [Асмус и др., 2019] представлены примеры использования спутниковой информационной продукции НИЦ "Планета" для мониторинга опасных природных явлений на территории России, включая наводнения, пожарную обстановку, выходы тропических циклонов, загрязнения природной среды, вулканическую активность и др. В работе [Гирина и др., 2019] дано описание созданной информационной системы "Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил", с помощью которой выполнен анализ дистанционных наблюдений эксплозивно-эффузивного извержения вулкана Ключевской в 2019–2020 гг. [Гирина и др., 2021]. В упомянутой выше статье [Волкова и Кухарский, 2020] описано использование данных измерений SEVIRI/Meteosat для диагноза опасных явлений погоды. В статье [Фролова и др., 2022] представлены первые результаты мониторинга мезомасштабных циклонов в Арктическом регионе в виде карты их повторяемости по данным радиометра–имаджера МСУ-ГС КА Арктика-М № 1.

Примеры использования спутниковых измерений XCO_2 в атмосфере по данным КА OCO-2 для исследований пространственно-временных вариаций и оценок антропогенных эмиссий в различных городах РФ приведены в работах [Никитенко и др., 2020; Тимофеев и др., 2019а, 2019б; 2020а, 2020б].

В статьях [Цырульников и др., 2019, 2021] дано описание системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений Гидрометцентра России на основе трехмерного вариационного подхода и представлены результаты усвоения в этой системе данных измерений атмосферных микроволновых и ИК-зондировщиков, поступающих с КА серии Метеор-М. Приводятся методика и результаты адаптивной коррекции каналов микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ. Описывается методика усвоения данных ИК-зондировщика ИКФС-2 КА серии Метеор-М, включающая новую схему выбора наиболее информативных каналов. Сравнение результатов усвоения данных ИКФС-2 и европейского Фурье-спектрометра IASI (КА Metop) показывает, что данные ИКФС-2 и IASI оказывают примерно одинаковое положительное влияние на краткосрочный прогноз погоды.

В статье [Успенский и др., 2022] обсуждается использование измерений ИК-зондировщика ИКФС-2 КА серии Метеор-М для дистанционного определения параметров состояния атмосферы, относящихся к основным климатическим переменным (концентрации основных парниковых газов, характеристики облачности и аэрозолей, вертикальные профили температуры и др.), мониторинг которых необходим для характеризации климатической системы и ее изменений. Проанализирована возможность формирования многолетних однородных рядов, содержащих измерения ИКФС-2 и спутниковые оценки вышеупомянутых атмосферных климатических переменных. В уже цитированной выше статье [Астафуров и др., 2021б] на основе результатов классификации облачности по спутниковым данным (измерения MODIS и VIIRS) исследована многолетняя изменчивость структуры полей облачности и их характеристик над природными зонами Западной Сибири в летнее время периода 2001–2019 гг. В работе [Покровский, 2019] представлены результаты анализа климатических рядов глобальной и региональной облачности за 1983–2009 гг., полученных в рамках международного спутникового проекта ISCCP. Результаты анализа показывают, что глобальная и региональная облачность демонстрируют убывание на 2–6%. В статьях [Покровский и др., 2020, 2022] на основе наземных наблюдений и данных дистанционного зондирования атмосферы, океана и криосферы выявлены и исследованы медленные климатические колебания температуры вод поверхностного океанического слоя и для глубин океана до 700 м в северном полушарии за последние полтора века как отклик на модуляции солнечной активности.

В ИПФ РАН выполнены исследования фотохимических реакций и их влияния на важнейшие характеристики и составляющие атмосферы в области мезопаузы (на высотах 80–100 км) по спутниковым данным – измерениям 10-канального ИК-радиометра SABER, работающего в лимбовом режиме (спутник TIMED, США). В статье [Kulikov et al., 2019] показано, что нарушение известного предположения о химическом равновесии "ночного" озона на нижней границе мезопаузы (77–86 км в зависимости от сезона и широты) приводит к грубым ошибкам при дистанционном определении атомарного кислорода O по данным SABER. В статье [Kulikov et al., 2020] данные SABER за период 2003–2005 гг. использованы для дистанционного определения пространственно-временных распределений O (^{1}D) в области мезопаузы. В работе [Kulikov et al., 2021] на основе анализа данных SABER получено первое экспериментальное подтверждение возбуждения нелинейных фотохимических осцилляций с периодом 2 суток как отклика на суточные вариации освещенности. В статьях [Kulikov et al., 2022a, b] проанализирована точность восстановления дневных распределений атомарного кислорода O и

атомарного водорода H в области мезопаузы по данным SABER за 2003–2015 гг. при учете реакции озона с атомарным водородом в уравнении баланса для озона.

Обзор подготовлен на основе материалов, предоставленных: С.С. Власенко, Е.Ф. Михайловым, Д.И. Нагирнером, Г.М. Неробеловым (СПбГУ), А.А. Вигасиным, Г.И. Горчаковым, Е.И. Гречко, О.В. Постыляковым, В.С. Ракитиным (ИФА), В.Г. Астафуровым, Б.Д. Беланом, В.В. Беловым, С.М. Бобровниковым, В.Н. Маричевым, М.В. Панченко, А.А. Симоновой, Л.Н. Синицей, Т.Ю. Чесноковой (ИОА), Ю.В. Киселевой, А.Н. Рублевым (НИЦ Планета), А.Ф. Нерушевым (НПО "Тайфун"), О.М. Покровским (РГГМУ) , В.М. Иваховым, Н.Н. Парамоновой, А.А. Соломатниковой (ГГО им. Воейкова А.И.), В.Ф. Радионовым (ААНИИ), В.И. Захаровым (ИЕНМ УФУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев А.И., Шамилова Ю.А., Холодов Е.И. Применение сверточной нейронной сети для детектирования облачности по данным прибора МСУ-МР спутника "Метеор-М" № 2 // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 44–53.

Асмус В.В., Иоффе Г.М., Крамарева Л.С. и др. Космический мониторинг опасных природных явлений на территории России // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 20–32.

Асмус В.В., Милехин О.Е., Крамарева Л.С. и др. Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система "Арктика-М" // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 11–26.

Астафуров В.Г., Скороходов А.В. Использование результатов классификации облачности по спутниковым данным для решения задач климатологии и метеорологии // Метеорология и гидрология. 2021б. № 12. С. 5–10.

Астафуров В.Г., Скороходов А.В., Курьянович К.В. Статистические модели характеристик облачности над западной Сибирью в летний период по данным MODIS // Метеорология и гидрология. 2021а. № 11. С. 20–35.

Афанасьев В.П., Будак В.П., Ефременко Д.С., Капля П.С. Применение фотометрической теории светового поля в задачах рассеяния электронов // Светотехника, 2019. № 1. С. 44–50.

Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Скляднева Т.К., Фофонов А.В. Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории «Фоновая». Часть I. Методические аспекты и технические характеристики // Оптика атмосферы и океана. 2022а. Т. 35. № 9. С. 759–765.

Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Скляднева Т.К., Фофонов А.В. Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории "Фоновая". Часть II. Результаты измерений в 2021 г. // Оптика атмосферы и океана. 2022б. Т. 35. № 10. С. 843–849.

Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Скляднева Т.К. Исследование взаимосвязи ультрафиолетовой радиации с влияющими на нее факторами. Часть I. Роль общего содержания озона, облачности и аэрозольной оптической толщи // Оптика атмосферы и океана. 2020а. Т. 33. № 8. С. 649–655.

Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Скляднева Т.К. Исследование взаимосвязи ультрафиолетовой радиации с метеорологическими факторами и замутнением атмосферы. Часть II. Роль альбедо подстилающей поверхности // Оптика атмосферы и океана. 2020б. Т. 33. № 12. С. 926–931.

Беликович М.В., Куликов М.Ю., Рыскин В.Г., Швецов А.А., Красильников А.А., Скалыга Н.К., Серов Е.А., Фейгин А.М. Применение параметризации эмпирическими ортогональными функциями в задаче восстановления термической структуры тропосферы по радиометрическим данным // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 9. С. 664–680.

Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В. Бистатическая подводная оптико-электронная связь. Полевые эксперименты в 2017–2018 гг. // Светотехника. 2019. № 2. С. 67–70.

Белов М.Л., Всякова Ю.И., Городничев В.А. Оптический метод обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности в УФ спектральном диапазоне // Светотехника. 2019. № 3. С. 15–21.

Бирюков Е.Ю., Косцов В.С. Использование линейных регрессионных соотношений, полученных на основе модельных и экспериментальных данных, для определения водозапаса облаков из наземных микроволновых измерений // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 5. С. 386–394.

Блощинский В.Д., Кучма М.О., Кухарский А.В. Определение общего содержания озона в столбе атмосферы по данным КА Электро-Л № 3 с использованием нейронных сетей // Исследования Земли из космоса. 2022. № 4. С. 79–85.

Бордовская Ю.И., Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М. Сравнение наземного и спутникового методов определения вертикальных профилей содержания озона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 225–231.

Бручковский И.И., Боровский А.Н., Джола А.В., Еланский Н.Ф., Постыляков О.В., Баженов О.Е., Романовский О.А., Садовников С.А., Капауа Y. Наблюдения интегрального содержания формальдегида в нижней тропосфере в городских агломерациях Москвы и Томска методом дифференциальной спектроскопии // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 1. С. 11–19.

Буренков В.И., Шеберстов С.В., Артемьев В.А., Таскаев В.Р. Оценка погрешности измерения показателя ослабления света морской водой в мутных водах арктических морей // Светотехника. 2019. № 2. С. 55–60.

Виролайнен Я.А., Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М. Взаимная калибровка спутниковых и наземных спектроскопических измерений содержания CO_2 на станции NDACC St. Petersburg // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. Т. 87. № 5. С. 816–820.

Виролайнен Я.А., Поляков А.В., Кирнер О. Оптимизация методики определения содержания нитрата хлора в атмосфере по наземным спектроскопическим измерениям // Журнал прикладной спектроскопии. 2020а. Т. 87. № 2. С. 306–313.

Виролайнен Я.А., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Анализ изменчивости стратосферных газов по данным наземных спектроскопических наблюдений в районе Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 163–174.

Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Поберовский А.В. ИК-спектроскопические измерения атмосферного содержания азотной кислоты на станции NDACC St. Petersburg // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 11. С. 906–911.

Власенко С.С., Волкова К.А., Ионов Д.В., Рышкевич Т.И., Иванова О.А., Михайлов Е.Ф. Изменчивость углеродосодержащей фракции атмосферного аэрозоля вблизи Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 147–156.

Волкова Е.В., Андреев А.И., Косторная А.А. Мониторинг характеристик облачного покрова и осадков по данным измерений с полярно-орбитальных и геостационарных спутников // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 45–56.

Волкова Е.В., Косторная А.А., Амикишиева Р.А. Определение параметров облачного покрова системами автоматической обработки спутниковых данных // Географический вестник. 2020. № 3. С. 124–134.

Волкова Е.В., Кухарский А.В. Автоматизированная технология диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды для Европейской территории России по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4 (378). С. 43–62.

Волкова К.А., Аникин С.С., Михайлов Е.Ф., Ионов Д.В., Власенко С.С., Рышкевич Т.И. Сезонная и суточная изменчивость концентраций аэрозольных частиц вблизи Санкт-Петербурга // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 5. С. 407–414.

Гирина О.А., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Крамарева Л.С., Романова И.М., Нуждаев А.А., Кашницкий А.В., Марченков В.В., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П. Дистанционные наблюдения эксплозивно-эффузивного извержения вулкана Ключевской в 2019-2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 81–91.

Гирина О.А., Лупян Е.А., Мельников Д.В., Кашницкий А.В., Уваров И.А., Бриль А.А., Константинова А.М., Бурцев М.А., Маневич А.Г., Гордеев Е.И., Крамарева Л.С., Сорокин А.А., Мальковский С.И., Королев С.П. Создание и развитие информационной системы "Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил" // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 249–265.

Голомолзин В.В., Рублев А.Н., Киселева Ю.В., Козлов Д.А., Прокушкин А.С., Панов А.В. Определение общего содержания диоксида углерода над территорией России по данным отечественного космического аппарата Метеор-М № 2 // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С.79–95.

Дейчули В.М., Петрова Т.М., Солодов А.М., Солодов А.А., Чеснокова Т.Ю., Трифонова-Яковлева А.М. Параметры линий поглощения молекулы воды в спектральной области 5900–6100 см-1 // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 1. С. 20–25.

Дель Агила А., Ефременко Д.С. Повышение точности двухпотоковой модели переноса излучения для расчета оптических спектров поглощения в присутствии аэрозолей // Светотехника. 2021. № 2. С. 44–49.

Дель Агила А., Ефременко Д.С., Траутманн Т. Обзор методов снижения размерности при обработке гиперспектральных оптических сигналов // Светотехника. 2019. № 4. С. 60–70.

Ефременко Д.С. Модель переноса излучения на основе метода дискретных ординат с вычислением собственных значений с помощью нейронной сети: доказательство концепции // Светотехника. 2021. № 1. С. 64–68.

Журавлева Т.Б. Влияние формы и размеров кристаллических частиц на угловые распределения пропущенной солнечной радиации в двух геометрических схемах зондирования: результаты численного моделирования // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 10. С. 798–804.

Журавлева Т.Б. Имитационное моделирование полей яркости солнечной радиации в присутствии оптически анизотропной кристаллической облачности: алгоритм и результаты тестирования // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12. С. 937–943.

Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М. Влияние микроструктуры и горизонтальной неоднородности разорванной кристаллической облачности на средние потоки солнечной радиации в видимой области спектра: результаты численного моделирования // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 10. С. 792–802.

Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Коновалов И.Б., Головушкин Н.А. Радиационный форсинг дымового аэрозоля с учетом фотохимической эволюции его органической компоненты: влияние условий освещенности и альбедо подстилающей поверхности // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 09. С. 748–758.

Заболотских Е.В. Внешняя калибровка измерений российского спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в каналах сканера. Часть 1. Моделирование // Метеорология и гидрология. 2021. № 10. С. 57–65.

Заболотских Е.В., Балашова Е.А. Внешняя калибровка измерений российского спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в каналах сканера. Часть 2. Эксперимент // Метеорология и гидрология. 2021. № 11. С. 47–55.

Задворных И.В., Грибанов К.Г., Захаров В.И., Imasu R. Определение относительного содержания HDO в атмосфере по данным одновременных измерений спутника GOSAT-2 в тепловом и ближнем ИК-диапазонах // Оптика атмосферы и океана, 2022. Т. 35. № 12 (407). С. 999–1003.

Зенкова П.Н., Терпугова С.А., Полькин Вас. В., Полькин В.В., Ужегов В.Н., Козлов В.С., Яушева Е.П., Панченко М.В. Развитие эмпирической модели оптических характеристик аэрозоля Западной Сибири. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 3. С. 192–198.

Зенкова П.Н., Чернов Д.Г., Шмаргунов В.П., Панченко М.В., Белан Б.Д. Субмикронный аэрозоль и поглощающее вещество в тропосфере российского сектора Арктики по данным измерений самолета-

лаборатории Ту-134 “Оптик” в 2020 г. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 882–890.

Ивахов В.М., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Зинченко А.В, Лоскутова М.А., Макштас А.П., Кустов В.А., Лаурила Т., Аурела М., Асми Э. Атмосферная концентрация диоксида углерода на станциях Тикси и Мыс Баранова в 2010–2017 гг. // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 110–122.

Ионов. Д.В., Поберовский А.В. Изменчивость содержания оксидов азота в приземном слое атмосферы по данным наблюдений в Петергофе // Метеорология и Гидрология. 2020. № 10. С. 73–81.

Ионов Д.В., Привалов В.И. Методика дифференциальной спектроскопии DOAS в задаче определения общего содержания озона из измерений наземного ультрафиолетового спектрометра УФОС. Оптика атмосферы и океана.2021. № 11. С. 842–848.

Катаев М.Ю., Дадонова М.М. Методика распознавания растительности на основе цветового и текстурного анализа RGB изображений // Светотехника. 2019. № 2. С. 34–39.

Катаев М.Ю., Дадонова М.М., Ефременко Д.С. Коррекция освещенности многовременных RGB-изображений, получаемых с помощью беспилотного летательного аппарата // Светотехника. 2020. № 6. С. 19–25.

Катаев М.Ю., Карташов Е.Ю., Карпов Р.К. Методика оценки цветового качества производства кирпичной продукции на основе RGB-изображений // Светотехника. 2022. № 3. С. 63–67.

Козлов Д.А., Завелевич Ф.С., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Козлов И.А., Черкашин И.С. Интеркалибровка бортовых инфракрасных фурье-спектрометров SI-1 и ИКФС-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 6. С. 72–80.

Козлов Д.А., Козлов И.А., Успенский А.Б., Рублев А.Н., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Колесников М.В. Оценка ковариационной матрицы шума в измерениях бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 // Исследования Земли из космоса. 2022. № 1. С. 53–67.

Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А., Тимофеев Д.Н., Кан Н., Ткачев И.В., Боровой А.Г., Коханенко Г.П., Балин Ю.С. Расчет сигнала сканирующего лидара при зондировании перистых облаков, содержащих преимущественно горизонтально ориентированные кристаллы. // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 2. С. 116–121.

Косторная А.А., Рублев А.Н., Голомолзин В.В. Определение влагосодержания в безоблачной атмосфере над океаном по измерениям микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 4. С. 83–98.

Крамарева Л.С., Андреев А.И., Блощинский В.Д. и др. Использование нейронных сетей в задачах гидрометеорологии // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24. № 6. С. 50–59.

Кучма М.О., Блощинский В.Д. Алгоритм атмосферной коррекции коротковолновых каналов прибора МСУ-МР спутника “Метеор-М” // Исследование земли из космоса. 2019. № 6. С. 3–12.

Кучма М.О., Холодов Е.И., Амельченко Ю.А. Двухканальный алгоритм определения аэрозольной оптической толщины над морской поверхностью по данным прибора МСУ-МР спутника “Метеор-М” № 2 // Исследования Земли из космоса. 2022. № 2. С. 88–94.

Кучма М.О., Шамилова Ю.А. Оперативное детектирование областей потенциального тумана по данным геостационарного спутника Himawari-8 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 3 (385). С. 113–126.

Макарова М.В., Сердюков В.И., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронин Б.А., Никитин А.В., Щербаков А.П., Гриднев Ю.В. Первый комплексный эксперимент по определению элементов вертикального распределения метана в тропосфере Западной Сибири по солнечным спектрам с использованием Фурье-спектрометра FTS 125M и натурных измерений с борта самолета-лаборатории // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 9. С. 728–734.

Маричев В.Н., Бочковский Д.А. Лидарный комплекс малой станции высотного зондирования атмосферы ИОА СО РАН // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 5. С. 399–406.

Маричев В.Н., Бочковский Д.А., Елизаров А.И. Оптические характеристики стратосферного аэрозоля Западной Сибири по результатам лидарного мониторинга в 2010–2021гг. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 9. С. 717–721.

Невзоров А.В., Долгий С.И., Макеев А.П., Ельников А.В. Результаты лидарных наблюдений аэрозоля от лесных пожаров Северной Америки в стратосфере над Томском в конце лета и осенью 2017г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 02. С. 162–167.

Неробелов Г.М., Аль-Субариа О.Х., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Поберовский А.В., Соломатникова А.А. Сравнения результатов наземных измерений общего содержания озона вблизи Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022а. Т. 58. № 5. С. 1–7.

Неробелов Г.М., Тимофеев Ю.М. Оценки эмиссий и поглощения CO2 водной поверхностью вблизи мегаполиса Санкт-Петербурга // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 5. С. 374–379.

Неробелов Г.М., Тимофеев Ю.М., Смышляев С.П., Виролайнен Я.А., Макарова М.В., Фока С.Ч. Сопоставление данных CAMS по содержанию CO2 с результатами измерений в Петергофе // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 10. С. 805–810.

Неробелов Г.М., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н., Имхасин Х.Х. Наземные спектроскопические измерения общего содержания аммиака в районе Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана.2022б. Т. 58. № 6. С. 658–66

Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений северного полушария на основе спутниковых измерений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021а. Т. 57. № 4. С. 401–413.

Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Кулижникова Л.К., Ивангородский Р.В. О связи температурных аномалий с характеристиками высотных струйных течений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021б. Т. 18. № 1. С. 199–209.

Нерушев А.Ф., Ивангородский Р.В. Определение зон турбулентности в верхней тропосфере на основе

спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 205–215.

Никитенко А.А., Неробелов Г.М., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. Анализ наземных спектроскопических измерений содержания CO_2 в Петергофе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 57–70.

Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайнен Я.А., Поляков А.В. Анализ содержания CO_2 вблизи российских городов по спутниковым измерениям OCO-2. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 7. С. 538–543.

Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Неробелов Г.М., Поберовский А.В. Сравнения измерений стратосферного содержания CO_2 наземным и спутниковым методами // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т.35. № 3. С. 191–194.

Панченко М.В., Кабанов М.В., Пхалагов Ю.А., Белан Б.Д., Козлов В.С., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н., Полькин В.В., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Яушева Е.П., Аршинов М.Ю., Симоненков Д.В., Шмаргунов В.П., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Полькин Вас.В., Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Зенкова П.Н. Комплексные исследования тропосферного аэрозоля в ИОА СО РАН (этапы развития) // Оптика атмосферы и океана. 2019а. Т. 32. № 9. С. 703–716.

Панченко М.В., Полькин В.В., Полькин Вас.В., Козлов В.С., Яушева Е.П., Шмаргунов В.П. Распределение по размерам "сухой основы" частиц в приземном слое атмосферы пригородного района г.Томска в рамках эмпирической классификации типов "аэрозольной погоды" // Оптика атмосферы и океана. 2019б. Т. 32. № 07. С. 539–547.

Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Ивахов В.М., Русина Е.Н., Боброва В.К., Соколенко Л.Г., Зайнетдинов Б.Г., Соломатникова А.А., Ромашкина К.И., Волохина Д.Ю., Вязанкин А.С., Цветкова Н.Д., Банкова Т.В., Кирюшов Б.М., Лукьянов А.Н., Глазков В.Н., Юшков В.А. Физические и химические характеристики атмосферы // В сборнике: Обзора фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2019 г. Ежегодный обзор. Под редакцией Г.М. Черногаевой. Москва, 2020. С. 13–30.

Покровский О.М. Изменение облачности в период глобального потепления по результатам международного спутникового проекта // Исследования Земли из космоса. 2019. № 1. С. 3–13.

Покровский О.М. Когерентность колебаний компонентов глобальной климатической системы с медленными флуктуациями солнечной активности по данным наземных и спутниковых наблюдений // Исследования Земли из космоса. 2022. № 3. С. 1–14.

Покровский О.М., Покровский И.О. Идентификация фундаментального климатического колебания с помощью вейвлет – анализа комбинированных данных наземных и спутниковых наблюдений // Исследования Земли из космоса. 2020. № 6. С. 59–72.

Полькин В.В., Панченко М.В. Временная изменчивость концентраций субмикронных и крупнодисперсных частиц в приземном слое атмосферы на Аэрозольной станции ИОА СО РАН г. Томска (2000-2020 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6. С. 471–476.

Полькин Вас.В., Полькин В.В., Панченко М.В. Многолетние наблюдения ореольной индикатрисы рассеяния в приземном слое пригорода Томска (2010–2021 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 2022б. Т. 35. № 12. С. 987–992.

Поляков А.В., Поберовский А.В., Виролайнен Я.А., Макарова М.В. Методика обращения спектров прозрачности для оценки содержания фреона CCl_3F в атмосфере. // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. Т. 86. № 1. С. 108–115.

Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Козлов Д.А. Мониторинг общего содержания озона в атмосфере с использованием российской аппаратуры ИКФС-2 // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86. № 4. С. 597–601.

Поляков А.В., Виролайнен Я.А., Макарова М.В. Методика обращения спектров прозрачности для оценки содержания фреона CCl_2F_2 в атмосфере // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86. № 3. С. 417–424.

Радионов В.Ф., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Сакерин С.М., Изосимова О.Н. Характеристики аэрозоля над арктическими морями Евразии: результаты измерений 2018 г. и среднее пространственное распределение в летне-осенние периоды 2007–2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 4. С. 405–421.

Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Джола А.В., Ракитина А.В., Шилкин А.В., Кириллова Н.С., Казаков А.В. Долговременные тенденции общего Содержания окиси углерода в атмосфере Московского мегаполиса // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 126–136.

Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Козлов В.С., Круглинский И.А., Макаров В.И., Макштас А.П., Попова С.А., Радионов В.Ф., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И., Чанкина О.В., Чернов Д.Г. Результаты измерений физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре "Ледовая база "Мыс Баранова" в 2018 г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 421–429.

Сакерин С.М., Круглинский И.А., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Кравчишина М.Д., Макаров В.И., Попова С.А., Почуфаров А.О., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Дарьин Ф.А. Пространственно-временная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля над Карским, Баренцевым, Норвежским и Гренландским морями (экспедиции 2018–2021 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6. С. 447–455.

Сердюков В.И., Синица Л.Н., Емельянов Н.М. Исследование R-ветви полосы $3\nu3$ $^{13}CH_4$ в области от 9000 до 9200 $см^{-1}$. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 8. С. 619–625.

Сердюков В.И., Синица Л.Н., Луговской А.А., Емельянов Н.М. Охлаждаемая жидким азотом оптическая кювета для исследования спектров поглощения на Фурье-спектрометре // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 2. С. 146–152.

Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Русина Е.Н. База данных часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских антарктических станциях: анализ из-

менения суммарной радиации за весь период наблюдений в Антарктиде // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 249–260.

Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Русина Е.Н. Результаты многолетних наблюдений за общим содержанием озона в Антарктиде и над акваториями Атлантического и Южного океанов Метеорология и Гидрология. 2020. Т. 3. С. 33–43.

Симонова А.А. Механизмы формирования спектра континуального поглощения водяного пара в ИК полосах поглощения молекулы воды: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.05. – ИОА СО РАН, Томск, 2022 – 148 с.

Симонова А.А., Пташник И.В. Вклад димеров воды в континуальное поглощение чистого водяного пара в полосах фундаментальных изгибного и валентного колебаний молекулы воды // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 1. С. 5–11.

Симонова А.А., Пташник И.В. Вклад погрешностей параметров линий поглощения водяного пара в определение континуального поглощения в полосах 0.94 и 1.13 мкм. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 3. С. 175–177.

Синица Л.Н., Сердюков В.И., Луговской А.А. Спектр поглощения полосы (0120)–(0000) 13CH4 при низкой температуре. Идентификация спектра // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 9. С. 668–676.

Скороход А.И., Ракитин В.С., Кириллова Н.С. Влияние мер по сдерживанию пандемии COVID-19 и метеорологических условий на состав атмосферного воздуха в Москве в 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 36–46.

Скороходов А.В., Курьянович К.В. Использование данных CALIOP для оценки высоты нижней границы облаков на спутниковых снимках MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022а. Т. 19. № 2. С. 43–56.

Скороходов А.В., Курьянович К.В. Использование данных CloudSatCPR для повышения эффективности нейросетевого подхода к восстановлению высоты нижней границы облаков на спутниковых снимках Aqua MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса 2022б. Т. 19. № 5. С. 63–75.

Солдатенко С.А., Колман Р.А. Влияние обратных связей и тепловой инерции климатической системы на спектр мощности флуктуаций приповерхностной температуры по данным ансамбля моделей проекта CMIP5 и малопараметрических моделей // Известия Российской Академии наук. Физика атмосферы и океана, 2022. Т.58. № 2. С. 230–232.

Соломатникова А.А., Волохина Д.Ю., Жукова М.П. Особенности состояния озонового слоя над регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год. Росгидромет, 2022. С. 36–39.

Соломатникова А.А., Ромашкина К.И., Волохина Д.Ю. Особенности состояния озонового слоя над регионами РФ// Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2019 год. Росгидромет. 2020. С. 36–39.

Тарасенков М.В., Зонов М.Н., Белов В.В., Энгель М.В. Пассивное спутниковое зондирование земной поверхности в просветы облачных полей // Оптика атмосферы и океана. 2021б. Т. 34. № 8. С. 621–628.

Тарасенков М.В., Зонов М.Н., Энгель М.В., Белов В.В. Оценка влияния разорванной облачности на восстановление коэффициентов отражения безоблачных участков земной поверхности по снимкам прибора MODIS // Метеорология и гидрология. 2021а. № 11. С. 36–46.

Тентюков М.П., Лютоев В.П., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Головатая О.С. Детектор ультрафиолетового излучения на основе ультрадисперсного оксида магния с кристаллической структурой периклаза // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 916–923.

Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Поляков А.В. Оценки вариаций радиационного форсинга для углекислого газа в последнее столетие и в будущем // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 10. С. 856–859.

Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поляков А.В., Виролайнен Я.А. Спутниковый мониторинг озоносферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 71–79.

Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Виролайнен Я.А., Макарова М.В., Ионов Д.В., Поберовский А.В., Имхасин Х.Х. Оценки трендов содержания климатически важных атмосферных газов вблизи Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана 2020а. Т. 56. № 1. С. 97–103.

Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайнен Я.А., Макарова М.В., Никитенко А.А. Анализ мезомасштабных вариаций содержания углекислого газа вблизи мегаполиса Москвы по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019б. Т. 16. № 4. С. 263–270.

Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайнен Я.А., Поберовский А.В., Макарова М.В., Поляков А.В. Оценки антропогенных эмиссий CO_2 для Москвы и Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений OCO-2 // Оптика атмосферы и океана. 2020а Т. 33. № 4. С. 261–265.

Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайнен Я.А., Макарова М.В., Поляков А.В., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н., Фока С.Ч. Пространственно-временные вариации содержания CO_2 по данным спутниковых и наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019а. Т.55. № 1. С. 65–72.

Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н. Определение содержания CO_2 в тропосфере и стратосфере наземным ИК методом. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 57. № 3. С. 322–333.

Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Виролайнен Я.А., Поберовский А.В., Фока С.Ч. Оценки антропогенных эмиссий CO_2 мегаполиса Санкт-Петербурга // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020в. Т. 494. № 1. С. 97–100.

Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайнен Я.А., Макарова М.В., Поляков А.В., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н., Фока С.Ч. Пространственно-временные вариации содержания CO_2 по данным спутниковых и наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана.2019. Т. 55. № 1. С. 65–72.

Тимофеев Ю.М., Филиппов Н.Н., Поберовский А.В. Анализ информативности и вертикального разрешения наземного спектроскопического ИК-метода

определения вертикальной структуры CO_2 // Оптика атмосферы и океана. 2020б. Т. 33. № 11.

Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поберовский А.В. Экспериментальные оценки интегральных антропогенных эмиссий CO_2 города Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 282–291.

Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Виролайнен Я.А., Делер В., Эртель Д., Шпенкух Д. Первые спутниковые измерения содержания углекислого газа в земной атмосфере (1977 и 1979 гг., спутник "МЕТЕОР", прибор SI-1) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020б. Т. 56. № 4. С. 458–461.

Успенский А.Б. 60 лет спутниковой метеорологии // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 5–10.

Успенский А.Б. Измерения распределения содержания парниковых газов в атмосфере со спутников // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8. № 1. С. 122–144.

Успенский А.Б., Рублев А.Н., Козлов Д.А., Голомолзин В.В., Киселева Ю.В., Козлов И.А., Никулин А.Г. Мониторинг основных климатических переменных атмосферы по данным спутникового ИК-зондировщика ИКФС-2 // Метеорология и гидрология. 2022. № 11. С. 5–18.

Успенский А.Б., Тимофеев Ю.М., Козлов Д.А., Черный И.В. Развитие методов и средств дистанционного температурно-влажностного зондирования земной атмосферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 33–44.

Устинов В.П., Баранова Е.Л., Вишератин К.Н, Грачев М.И., Кальсин А.В. Вариации окиси углерода в атмосфере Антарктиды по данным наземных и спутниковых измерений // Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 97–106.

Устинов В.П., Баранова Е.Л., Вишератин К.Н, Грачев М.И., Кальсин А.В. Вариации метана в атмосфере Антарктиды в 2009–2017 гг. по данным наземных и спутниковых измерений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т.66. № 1. С. 66–81.

Филей А.А. Восстановление высоты верхней границы облачности по данным спутникового прибора МСУ-МР КА "Метеор-М" № 2 // Оптика атмосферы и океана. 2020а. Т. 33. № 12. С. 918–925.

Филей А.А. Восстановление оптической толщины и эффективного радиуса частиц облачности по данным дневных измерений спутникового радиометра МСУ-МР // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 8. С. 650–656.

Филей А.А. Построение моделей оптических параметров вулканических облаков для задач дистанционного зондирования Земли из космоса. // Оптика атмосферы и океана. 2020б. Т. 33. № 2. С. 127–134.

Филей А.А., Андреев А.И., Кучма М.О., Успенский А.Б. Применение искусственных нейронных сетей для определения общего содержания водяного пара в атмосфере по данным микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ со спутника "Метеор-М" № 2-2 // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 34–45.

Филей А.А., Андреев А.И., Успенский А.Б. Использование искусственных нейронных сетей для восстановления температурно-влажностного состояния атмосферы по данным спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА Метеор-М № 2-2 // Исследования Земли из космоса. 2021. № 6. С. 83–95.

Филей А.А., Давиденко А.Н., Киселева Ю.В., Козлов Д.А., Холодов Е.И. Оценка точности температурно-влажностного зондирования атмосферы по данным фурье-спектрометра на ИСЗ "Метеор-М" № 2 // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 110–118.

Филей А.А., Маренцо Ф. Восстановление параметров вулканического пепла по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2021. № 4. С. 86–101.

Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Размолов А.А. Влияние аэрозоля и облаков на характеристики подстилающей поверхности, измеряемые Sentinel-2A в регионе Нижнего Поволжья // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 04. С. 285–291.

Фирсов К.М, Чеснокова Т.Ю., Размолов А.А. Влияние континуального поглощения паров воды на радиационный форсинг углекислого газа в атмосфере для региона нижнего Поволжья// Оптика атмосферы и океана. 2022. Т.35. № 12. С.1029–1035.

Фомин Б.А., Колокутин Г.Э. Новая спектроскопическая база HITRAN-2016 в полинейных моделях, применяемых в дистанционном зондировании Земли методами инфракрасной спектрометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 17–24.

Фролова Е.А., Нестеров Е.С., Салагина А.А. Использование данных МСУ – ГС КА "Арктика М" № 1 для мониторинга и анализа мезомасштабных циклонов в Арктическом регионе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 293–305.

Цырульников М.Д., Гайфулин Д.Р., Свиренко П.И., Успенский А.Б. Усвоение данных спутниковых метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 80–93.

Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Успенский А.Б. Развитие системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4. С. 112–126.

Черемисин А.А., Маричев В.Н., Бочковский Д.А., Новиков П.В., Романченко И.И. Стратосферный аэрозоль сибирских лесных пожаров по данным лидарных наблюдений в Томске в августе 2019 г. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 898–905.

Черненков А.Ю., Кострыкин С.В. Оценка радиационного форсинга от загрязнения снега черным углеродом по данным климатической модели // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т.57. № 2. С.146–155.

Чеснокова Т.Ю., Фирсов К.М., Размолов А.А. Вклад континуального поглощения водяного пара в радиационный баланс атмосферы при наличии перистых облаков // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 9. С. 743–751.

Чеснокова Т.Ю., Макарова М.В., Ченцов А.В., Воронина Ю.В., Захаров В.И., Рокотян Н.В., Langerock B. Определение содержания монооксида углерода в атмосфере из атмосферных спектров высокого разрешения. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 4. С. 257–265.

Чубарова Н.Е., Розенталь В.А., Жданова Е.Ю., Полюхов А.А. Новый радиационный комплекс Метеоро-

логической обсерватории МГУ стандарта BSRN: методические аспекты и первые результаты измерений // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 8. С. 670–678.

Чупров И.А., Константинов Д.Н., Ефременко Д.С., Земляков В.В., Гао Ц. Решение уравнения переноса излучения для вертикально неоднородных сред методами численного интегрирования: сравнительный анализ // Светотехника. 2022. № 4. С. 63–70.

Чурсин В.В., Кужевская И.В. Выделение с помощью нейронных сетей вероятностных зон развития грозы по данным спутникового зондирования // Геосферные исследования. 2022. № 3. С. 162–171.

Швецов А.А., Беликович М.В., Красильников А.А., Куликов М.Ю., Кукин Л.М., Рыскин В.Г., Большаков О.С., Леснов И.В., Щитов А.М., Фейгин А.М., Хайкин В.Б., Петров И.В. Спектрорадиометр 5-миллиметрового диапазона для исследования атмосферы и подстилающей поверхности // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 6. С. 100–104.

Afanas'ev V.P., Basov A.Yu., Budak V.P., Efremenko D.S., Kokhanovsky A.A. Analysis of the Discrete Theory of Radiative Transfer in the Coupled "Ocean–Atmosphere" System: Current Status, Problems and Development Prospects // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. V. 8. Art. 202.

Alberti C., Tu O., Hase F., Makarova M.V., Gribanov K., Foka S.C., Zakharov V., Blumenstock T., Buchwitz M., Diekmann C., Ertl B., Frey M.M., Imhasin H.K., Ionov D.V., Khosrawi F., Osipov S.I., Reuter M., Schneider M., and Warneke T. Investigation of spaceborne trace gas products over St Petersburg and Yekaterinburg, Russia, by using COllaborative Column Carbon Observing Network (COCCON) observations Atmos. Meas. Tech. 2022. V. 15. P. 2199–2229.

Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Golobokova L.P., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov A.S., Otmakhov V.I., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Change in the Air Composition upon the Transition from the Troposphere to the Stratosphere // Atmospheric and Oceanic Optics. 2021. V. 34. № 6. P. 567–576.

Arshinov M.Yu., Arshinova V.G., Belan B.D., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.S., Kuibida L.V., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N. and Fofonov A.V. Anomalous Vertical Distribution of Organic Aerosol over the South of Western Siberia in September 2018 // Atmospheric and Oceanic Optics. 2021. V. 34. № 5. P. 495–502.

Balugin N.V., Fomin B.A., Lykov A.D., Yushkov V.A. Stratospheric Radiation Budget According to Optical Balloon Backscatter Probe and Radiation Modeling // (2022) Russian Meteorology and Hydrology. 2022. V. 47. № 10. P. 812–817.

Belan B.D., Ancellet G., Andreeva I.S., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y., Balin Y.S., Barsuk V.E., Belan S.B., Chernov D.G., Davydov D.K., Fofonov A.V., Ivlev G.A., Kotel'nikov S.N., Kozlov A.S., Kozlov A.V., Law K., Mikhal'chishin A.V., Moseikin I.A., Nasonov S.V., Nédélec P., Okhlopkova O.V., Ol'kin S.E., Panchenko M.V., Paris J.-D., Penner I.E., Ptashnik I.V., Rasskazchikova T.M., Reznikova I.K., Romanovskii O.A., Safatov A.S., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Yakovlev S.V., Zenkova P.N. Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian sector of the Arctic // Atmos. Meas. Tech. 2022. V. 15. № 13. P. 3941–3967.

Belikovich M.V., Kulikov M.Yu., Makarov D.S., Skalyga N.K., Ryskin V.G., Shvetsov A.A., Krasil'nikov A.A., Dementyeva S.O., Serov E.A., Feigin A.M. Long-term Observations of Microwave Brightness Temperatures over a Metropolitan Area: Comparison of Radiometric Data and Spectra Simulated with the use of Radiosonde Measurements // Remote Sensing. 2016. V. 13. P. 2021.

Belikovich M.V., Makarov D.S., Serov E.A., Kulikov M.Y., Feigin A.M. Validation of Atmospheric Absorption Models within the 20–60 GHz Band by Simultaneous Radiosonde and Microwave Observations: The Advantage of Using ECS Formalism // Remote Sensing. 2022. V. 14. P. 6042.

Belikovich M.V., Makarov D.S., Serov E.A., Kulikov M.Yu., Feigin A.M. Validation of atmospheric absorption models within the 20–60 GHz band by simultaneous radiosonde and microwave observations: the advantage of using ECS formalism // Remote Sensing. 2022. V. 14. P. 6042.

Borkov Y.G., Solodov A.M., Solodov A.A., Perevalov V.I. Line intensities of the 01111–00001 magnetic dipole absorption band of $^{12}C_{16}O_2$: Laboratory measurements // Journal of Molecular Spectroscopy. 2021. V. 376. P. 111418.

Chesnokova T.Yu., Chentsov A.V., Firsov K.M. Impact of spectroscopic information on total column water vapor retrieval in the near-infrared spectral region // Journal of Applied Remote Sensing. 2020. V. 14. № 3. P. 34510.

Chesnokova T.Yu., Makarova M.V., Chentsov A.V., Kostsov V.S., Poberovskii A.V., Zakharov V.I., Rokotyan N.V. Estimation of the impact of differences in the CH_4 absorption line parameters on the accuracy of methane atmospheric total column retrievals from ground-based FTIR spectra // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2020. V. 254. P. 107187.

*Chistikov D.N., Finenko A.A., Kalugina Y.N., Lokshtanov S.E., Petrov S.V., Vigasin A.A.*Simulation of collision-induced absorption spectra based on classical trajectories and ab initio potential and induced dipole surfaces. II. CO_2–Ar rototranslational band including true dimer contribution // The Journal of Chemical Physics. 2021. V. 155. P. 064301.

Chistikov D.N., Finenko A.A., Lokshtanov S.E., Petrov S.V., and Vigasin A.A. Simulation of collision-induced absorption spectra based on classical trajectories and ab initio potential and induced dipole surfaces. I. Case study of N_2–N_2 rototranslational band // Journal Chemical Physics. 2019. V. 151. P. 194106.

Chubarova N.Y., Androsova Y.Y., Lezina Y.A. The Dynamics Of The Atmospheric Pollutants During The Covid-19 Pandemic 2020 And Their Relationship With Meteorological Conditions In Moscow // GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. 2021a. V. 14. № 4. P. 168–182.

Chubarova N.E., Vogel H., Androsova E.E., Kirsanov A.A., Popovicheva O.B., Vogel B., and Rivin G.S. Columnar and surface urban aerosol in the Moscow megacity according to measurements and simulations with the COSMO-ART model // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22. P. 10443–10466.

Chubarova N.E., Poliukhov A.A., Volodin E.M. Improving the Calculation of the Sulfate Aerosol Evolution and

Radiative Effects in the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Climate Model. Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2021b. V. 57. P. 370–378.

Chubarova N.E., Pastukhova A.S., Zhdanova E.Y., Volpert E.V., Smyshlyaev S.P., Galin V.Y. Effects of Ozone and Clouds on Temporal Variability of Surface UV Radiation and UV Resources over Northern Eurasia Derived from Measurements and Modeling // Atmosphere 2020. V. 11. P. 59.

Chulichkov A.I., Nikitin S.V., Borovski A.N., Postylyakov O.V. Computer-aided measuring system based on an artificial neural network for estimating atmospheric parameter // Proc. IEEE, 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)/ 20-24 Sept. 2021. ISBN:978-1-6654-3217-7.

Vigouroux C., Langerock B., Aquino C.A.B., Blumenstock T., Cheng Z., De Maziere M., De Smedt I., Grutter M., Hannigan J.W., Jones N., Kivi R., Loyola D., Lutsch E., Mahieu E, Makarova M., Metzger J.-M., Morino I., Murata I., Nagahama T., Notholt J., Ortega I, Palm M., Pinardi G., Rohling A., Smale D., Stremme W., Strong K., Sussmann R., Te Y, van Roozendael M., Wang P., and Winkler H. TROPOMI–Sentinel-5 Precursor formaldehyde validation using an extensive network of ground-based Fourier-transform infrared stations // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. № 1. P. 3751–3767.

Davydova M.A., Elansky N.F., Zakharova S.A., Postylyakov O.V. Application of a Numerical-Asymptotic Approach to the Problem of Restoring the Parameters of a Local Stationary Source of Anthropogenic Pollution // Doklady Mathematics. 2021. V. 103. № 1. P. 26–31.

del Águila A., Efremenko D.S., García V.M., Kataev M.Y. Cluster low-streams regression method for hyperspectral radiative transfer computations: Cases of O_2 a-And Co_2 bands // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 8. P. 1250.

Dombrovsky L.A., Fedorets A.A., Levashov V.Y., Kryukov A.P., Bormashenko E., Nosonovsky M. Modeling evaporation of water droplets as applied to survival of airborne viruses // Atmosphere. 2020. V. 11. № 8. P. 965.

Dudaryonok A., Buldyreva J., Lavrentieva N., Troitsyna L. Temperature-dependence parameters for CH_3I-O_2 and CH_3I-air line-broadening coefficients // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2022. V. 277. P. 108164.

Dudaryonok A.S., Buldyreva J.A., Lavrentieva N.N., Troitsyna L. Temperature-dependence exponents for CH_3I-N_2 line-broadening coefficients // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2022. V. 277. P. 107956.

Finenko A.A., Bézard B., Gordon I.E., Chistikov D.N., Lokshtanov S.E., Petrov S.V., Vigasin A.A. Trajectory-based Simulation of Far-infrared Collision-induced Absorption Profiles of CH_4–N_2 for Modeling Titan's Atmosphere // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2022. V. 258:33.

Fleurbaey H., Grilli R., Mondelain D., Kassi S., Yachmenev A., Yurchenko S.N., Campargue A. Electric-quadrupole and magnetic-dipole contributions to the $\nu 2 + \nu 3$ band of carbon dioxide near 3.3 μm // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2021. V. 266. P. 107558.

Fomin B.A. Efficient line-by-line technique for calculating accurate and compact spectral lookup tables for satellite remote sensing // (2021) International Journal of Remote Sensing, V. 42. № 8. P. 3074–3089.

Golobokova L.P., Khodzher T.V., Izosimova O.N., Zenkova P.N., Pochyufarov A.O., Khuriganowa O.I., Onishyuk N.A., Marinayte I.I., Polkin V.V., Radionov V.F., Sakerin S.M., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P. Chemical Composition of Atmospheric Aerosol in the Arctic Region and Adjoining Seas along the Routes of Marine Expeditions in 2018–2019 // Atmospheric and Oceanic Optics. 2020. V. 33. № 5. P. 480–489.

Gorbarenko E.V. Radiation Climate of Moscow // Russian Meteorology and Hydrology, Allerton Press Inc. (United States). 2020.V 45. P. 478–487.

Gorbarenko E.V. Sunshine Variability in Moscow in 1955–2017. Russian Meteorology and Hydrology, Allerton Press Inc. (United States). 2019. V. 44. № 6. P. 384–393.

Gorchakov G.I., Buntov D.V., Karpov A.V., Kopeikin V.M., Mirsaitov S.F., Gushchin R.A. and Datsenko O.I. The Saltating Particle Aleurite Mode in Wind–Sand Flux over a Desertified Area // Doklady Earth Sciences. 2019a. V. 488. № 1. P. 1103–1106.

Gorchakov G.I., Datsenko O.I., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gushchin R.A., Gorchakova I.A., Mirsaitov S.F. Ponomareva T.Y. Dust Haze over the North China Plain // Atmospheric and Oceanic Optics. 2022. V. 35. № 2. P. 125–132.

Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gushchin R.A. Turbulent fluxes of the dust aerosol on the desertified area // Doklady Earth Sciences. 2020b. V. 494. P. 799–802.

Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Gushchin R.A., and Datsenko O. I. Smog and Smoke Haze over the North China Plain in June 2007 // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. V. 32. № 6. P. 643–649.

Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Buntov D.V. Vertical profiles of the saltating particle concentration on a desertified area // Doklady Earth Sciences. 2021a. V. 496. № 2. P. 119–124.

Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Buntov D.V. Vertical Distribution of Aleurite and Sand Particles in Windsand Flux over a Desertified Area // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021b. V. 57. № 5. P. 486–494.

Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Buntov D.V. Stratification of Aleurite and Sand Particle Size Distribution in Windsand Flux over Desertified Areas // Atmospheric and Oceanic Optics. 2021. V. 34. № 5. P. 438–442.

Gorchakov G.I., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Buntov D.V. Dusty Plasma of a Wind-Sand Flux in Desertified Areas // Atmospheric and Oceanic Physics. 2022b. V. 58. № 5. P. 466–475

Gorchakov G.I., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Buntov D. V. Wind–Sand Flux Electrization over Desertified Areas // Doklady Earth Sciences. 2022a. V. 505. Part 1. P. 483–488.

Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Gushchin R.A., Datsenko O.I. Eurasian Large-Scale Hazes in Summer 2016 // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2019b. V. 55. № 3. P. 261–270.

Gorchakov G.I., Buntov D.V., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I. Wind Effect on the Size Distribution of Saltating Particles // Atmospheric and Oceanic Optics. 2020a. V. 33. № 2. P. 198–205.

Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J., Hashemi R., Karlovets E.V., Skinner F.M., Conway E.K., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y., Wcislo P., Finenko A.A., Nelson K., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Campargue A., Chance K.V., Coustenis A., Drouin B.J., Flaud J.-M., Gamache R.R., Hodges J.T., Jacquemart D., Mlawer E.J., Nikitin A.V., Perevalov V.I., Rotger M., Tennyson J.,

Toon G.C., Tran H., Tyuterev V.G., Adkins E.M., Baker A., Barbe A., Cane E., Csaszar A.G., Dudaryonok A., Egorov O., Fleisher A.J., Fleurbaey H., Foltynowicz A., Furtenbacher T., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Horneman V.-M., Huang X., Karman T., Karns J., Kassi S., Kleiner I., Kofman V., Kwabia-Tchana F., Lavrentieva N.N., Lee T.J., Long D.A., Lukashevskaya A.A., Lyulin O.M., Makhnev V.Yu., Matt W., Massie S.T., Melosso M., Mikhailenko S.N., Mondelain D., Mueller H.S.P., Naumenko O.V., Perrin A., Polyansky O.L., Raddaoui E., Raston P.L., Reed Z.D., Rey M., Richard C., Tobias R., Sadiek I., Schwenke D.W., Starikova E., Sung K., Tamassia F., Tashkun S.A., Vander Auwera J., Vasilenko I.A., Vigasin A.A., Villanueva G.L., Vispoel B., Wagner G., Yachmenev A., Yurchenko S.N. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2022. V. 277. P. 107949.

Grebennikov V.S., Zubachev D.S., Korshunov V.A., Sakhibgareev D.G., Chernikh I.A. C. Observations of Stratospheric Aerosol at Rosgidromet Lidar Stations after the Eruption of the Raikoke Volcano in June 2019 // Atmospheric and Oceanic Optics. 2020. V. 33. № 5. P. 519–523.

Gribanov K.G., Zadvornykh I.V., Zakharov V.I. On the Feasibility of $^{13}CO_2$ Retrieval from the Spectra of Satellite Fourier Transform Spectrometers of the IASI/Metop Type // Atmos. Ocean Opt. 2021. V. 34. № 1. P. 1–5.

Ionov D.V., Makarova M.V., Hase F., Foka S.C., Kostsov V.S., Alberti C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Y.A. The CO_2 integral emission by the megacity of St Petersburg as quantified from ground-based FTIR measurements combined with dispersion modelling // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21. P. № 14. P. 10939–10963.

Ionov D.V., Makarova M.V., Kostsov V.S., Foka S.F. Assessment of the NOx integral emission from the St.Petersburg megacity by means of mobile DOAS measurements combined with dispersion modelling // Atmospheric Pollution Research. 2022. V. 13. № 12. P. 101598.

Ivanov V.N., Zubachev D.S., Korshunov V.A., Sakhibgareev D.G. Network lidar AK-3 for middle atmosphere sensing: design, methods of measurements, results. // Proceedings of MGO. 2020. V. 598. P. 155–187.

Jacquemart D., Lyulin O.M., Solodov A.M., Petrova T.M., Solodov A.A. The Q-branch of $\nu1 + \nu3 + 3\nu4$ band of $^{12}C_2H_2$ located at 8330 cm^{-1} // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2022. V. 288. P. 108272.

Kabanov D.M., Ritter C., Sakerin S.M. Interannual and seasonal variations in aerosol optical depth of the atmosphere in two regions of Spitsbergen Archipelago (2002–2018) // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. V. 13. P. 5303–5317.

Kabanov D.M., Sakerin S.M., Turchinovich Yu.S. Interannual and Seasonal Variations in the Atmospheric Aerosol Optical Depth in the Region of Tomsk (1995–2018) // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. V. 32. № 6. P. 663–670.

Karpov A.V., Gorchakov G.I., Gushchin R.A., Datsenko O.I. Vertical Turbulent Dust-Aerosol Fluxes // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. № 5. P. 495–503.

Kazakov K.V., Vigasin A.A. Vibrational magnetism and the strength of magnetic dipole transition within the electric dipole forbidden $\nu2 + \nu3$ absorption band of carbon dioxide // Molecular Physics. 2021. V. 119. P. e1934581.

Konovalov I.B., Golovushkin N.A., Beekmann M., Panchenko M.V., Andreae M.O. Inferring the absorption properties of organic aerosol in Siberian biomass burning plumes from remote optical observations // Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14. № 10. P. 6647–6673.

Koroleva A.O., Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu., Pirali O., Campargue A. The Foreign-Continuum Absorption of Water Vapour in the Far-Infrared (50–500 cm^{-1}) // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2021. V. 261. P. 107486.

Korshunov V.A. Lidar observations of stratospheric aerosols at Obninck in 2012-2021: influence of volcanic eruptions and biomass burning // Fundamental and Applied Climatology. V. 8. № 3. P. 31–51.

Korshunov V.A. Multiple scattering in cirrus clouds and taking it into account when interpreting lidar measurements in the stratosphere // Atmospheric and Oceanic Optics. 2022. V. 35. № 2. P. 151–157.

Korshunov V.A., Zubachev D.S. Manifestation of Solar Activity Effects in Lidar Observations of Stratospheric Aerosol // Geomagnetism and Aeronomy. 2022. V. 62. № 1. P. 67–74.

Korshunov V.A., Zubachev D.S. Characteristics of cirrus clouds from lidar measurements at Obninsk // Proceeding of MGO. 2021. V. 602. P. 68–78.

Koshelev M.A., Golubyatnikov G.Yu., Vilkov I.N., Tretyakov M.Yu. Molecular Oxygen Fine Structure with Sub-kHz Accuracy // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2022. V. 278. P. 108001.

Koshelev M.A., Vilkov I.N., Makarov D.S., Tretyakov M.Yu., Rosenkranz P.W. Speed-Dependent Broadening of the O2 Fine-Structure Lines // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2021. V. 264. P. 107546.

Koshelev M.A., Vilkov I.N., Makarov D.S., Tretyakov M.Yu., Vispoel B., Gamache R.R., Cimini D., Romano F., Rosenkranz P.W. Water Vapor Line Profile at 183 GHz: Temperature Dependence of Broadening, Shifting, and Speed-Dependent Shape Parameters // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2021. V. 262. P. 107472.

Kostsov V.S., Kniffka A., Stenge M., Ionov D.V. Cross-comparison of cloud liquid water path derived from observations by two space-borne and one ground-based instrument in Northen Europe // Atmospheric Measurement Techniques. 2019. V. 12. № 11. P. 5927–5946.

Kostsov V.S., Ionov D.V., Kniffka A. Detection of the cloud liquid water path horizontal inhomogeneity in a coastline area by means of ground-based microwave observations: feasibility study // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. V.13. № 8. P. 4565–4587.

Kouzov A.P., Sokolov A.V., Filippov N.N. Non-Markovian approach to pressure broadening of isolated lines in spectra of light rotators // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2022. V. 278. P. 108043.

Kreher K., Van Roozendael M., Hendrick F., Apituley A., Dimitropoulou E., Frieß U., Richter A., Wagner T., Lampel J., Abuhassan N., Ang L., Anguas M., Bais A., Benavent N., Bösch T., Bognar K., Borovski A., Bruchkouski I., Ced A., Chan K. L., Donne, S., Drosoglou T., Fayt C., Finkenzeller H., Garcia-Nieto D., Gielen C., Gómez-Martín L., Hao N., Henzing B., Herman J. R., Hermans C., Hoque S., Irie H., Jin J., Johnston P., Khayyam Butt J., Khokhar F., Koenig T.K., Kuhn J., Kumar V., Liu C., Ma J., Merlaud A., Mishra A.K., Müller M., Navarro-Comas M.,

Ostendorf M., Pazmino A., Peters E., Pinardi G., Pinharanda M., Piters A., Platt U., Postylyakov O., Prados-Roman C., Puentedura O., Querel R., Saiz-Lopez A., Schönhardt A., Schreier S. F., Seyler A., Sinha V., Spinei E., Strong K., Tack F., Tian X., Tiefengraber M., Tirpitz J.-L., van Gent J., Volkamer R., Vrekoussis M., Wang S., Wang Z., Wenig M., Wittrock F., Xie P. H., Xu J., Yela M., Zhang C., Zhao X. Intercomparison of NO_2, O_4, O_3 and HCHO slant column measurements by MAX-DOAS and zenith-sky UV–visible spectrometers during CINDI-2 // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. V. 13. № 5. P. 2169–2208.

Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Grygalashvyly M. et al. Retrieving daytime distributions of O, H, OH, HO_2, and chemical heating rate in the mesopause region from satellite observations of ozone and OH* volume emission: The evaluation of the importance of the reaction $H+O3 \rightarrow O_2 + OH$ in the ozone balance // Advances in Space Research. 2022a. V. 69. № 9. P. 3362–3373.

Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Feigin A.M. The 2-day photochemical oscillations in the mesopause region: the first experimental evidence? // Geophysical Research Letters. 2021. V. 48. e2021GL092795.

Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnenmsnn G.R., Feigin A.M. The revised method for retrieving daytime distributions of atomic oxygen and odd-hydrogens in the mesopause region from satellite observations // Earth Planets Space. 2022b. V. 74. P. 44.

Kulikov M.Yu. and Belikovich M.V. Nighttime O (^{1}D) distributions in the mesopause region derived from SABER data // Ann. Geophys. 2020. V. 38. P. 815–822.

Kulikov M.Yu., Feigin A.M., Schrems O. H_2O_2 photoproduction inside H_2O and H_2O:O_2 ices at 20–140 K // Scientific Reports. 2019. V. 9. P. 11375.

Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Skalyga N.K., Shatalina M.V., Dementyeva S.O., Ryskin V.G., Shvetsov A.A., Krasil'nikov A.A., Serov E.A., Feigin A.M. Skills of Thunderstorm Prediction by Convective Indices over a Metropolitan Area: Comparison of Microwave and Radiosonde Data // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 4. P. 604.

Kulikov M.Yu., Nechaev A.A., Belikovich M.V., Vorobeva E.V., Grygalashvyly M., Sonnenmsnn G.R., Feigin A.M. Boundary of nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region from SABER data: Implications for derivation of atomic oxygen and atomic hydrogen // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. № 2. P.997–1004.

Lavrentieva N.N., Dudaryonok A.S. Nitrogen dioxide line shift coefficients induced by air pressure // Molecular Physics. 2022. V. 120. № 9. P. 2052370.

Lutsch E., Strong K., Jones D.B.A., Blumenstock T., Conway S., Fisher J.A., Hannigan J.W., Hase F., Kasai Y., Mahieu E., Makarova M., Morino I., Nagahama T., Notholt J., Ortega I., Palm M., Poberovskii A.V., Sussmann R., Warneke T. Detection and attribution of wildfire pollution in the Arctic and northern midlatitudes using a network of Fourier-transform infrared spectrometers and GEOS-Chem // Atmos. Chem. Phys. 2020. V. 20. № 21. P. 12813–12851.

Makarov D.S., Tretyakov M.Yu., Rosenkranz P.W. Revision of the 60-GHz Atmospheric Oxygen Absorption Band Models for Practical Use // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2020. V. 242. P. 106798.

Makarova M.V., Alberti C., Ionov D.V., Hase F., Foka S.C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Ya.A., Kostsov V.S., Frey M., Poberovskii A.V., Timofeyev Yu.M., Paramonova N.N., Volkova K.A., Zaitsev N.A., Biryukov E.Y., Osipov S.I., Makarov B.K., Polyakov A.V., Ivakhov V.M., Imhasin H.Kh., Mikhailov E.F. Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME): an overview and first results of the St. Petersburg megacity campaign-2019 // Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14. № 2. P. 1047–1073.

Marichev V.N., Bochkovskii D.A. Lidar monitoring of stratospheric aerosol over Tomsk in 2021 // Proc. SPIE 12341, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123417A. 2022a.

Marichev V.N., Bochkovskii D.A. Investigations of the thermal regime of the stratosphere over Tomsk in 2021 based on lidar monitoring // Proc. SPIE12341, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123417B. 2022b.

Marichev V.N., Bochkovskii D.A. Lidar studies of winter stratospheric warming over Tomsk // Proceedings of SPIE. 2020. V. 11560. CID: 1156087.

Mikhailov E.F., Pöhlker M.L., Reinmuth-Selzle K., Vlasenko S.S., Krüger O.O., Fröhlich-Nowoisky J., Pöhlker C., Ivanova O.A., Kiselev A.A., Kremper L.A., Pöschl, U. Water uptake of subpollen aerosol particles: hygroscopic growth, cloud condensation nuclei activation, and liquid–liquid phase separation // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21. № 9. P. 6999–7022.

Mikhailov E.F., Vlasenko S.S.. High-humidity tandem differential mobility analyzer for accurate determination of aerosol hygroscopic growth, microstructure, and activity coefficients over a wide range of relative humidity // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. № 4. P. 2035–2056.

Mukhartova Y.V., Davydova M.A., Elansky N.F. et al. On application of nonlinear reaction-diffusion-advection models to simulation of transport of chemically - active impurities // Proc. SPIE. 11157, 111570X, 2019 (2 October 2019).
https://doi.org/10.1117/12.2535489

Mukhartova Y.V., Postylyakov O.V., Davydova M.A., Elansky N.F., Postylyakov O.V., Zakharova S.A., Borovski A.N. High-detailed tropospheric transport of NO_x from ground sources: comparison of model data and satellite imagery // Proc. SPIE. 11859. 1185906. 2021.

Nerobelov G., Timofeyev Y., Smyshlyaev S., Foka S., Mammarella I., Virolainen Y. Validation of WRF-Chem Model and CAMS Performance in Estimating Near-Surface Atmospheric CO_2 Mixing Ratio in the Area of Saint Petersburg (Russia) // Atmosphere. 2021. V. 12. № 3. P. 387.

Nerobelov G., Timofeyev Y., Virolainen Y., Polyakov A., Solomatnikova A., Poberovskii A., Kirner O., Al-Subari O., Smyshlyaev S., Rozanov E. Measurements and Modelling of Total Ozone Columns near St. Petersburg, Russia // Remote Sensing 2022. V. 14. № 16. P. 3944.

Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodsky R.V. Satellite-derived estimations of the clear-air turbulence in the upper troposphere // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022. 1040 012025.

Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodsky R.V. Characteristics of the upper troposphere wind field according to the satellite measurements and their connection with climatic parameters // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020. V. 606. 012041.

Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodsky R.V. Dynamics of High-Altitude Jet Streams from Satellite Measurements and Their Relationship with Climatic Parameters and Large-Scale Atmospheric Phenomena // Izv. Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. V. 55. № 9. P. 1198–1209.

Nikitin S.V., Chulichkov A.I., Borovski A.N., Postylyakov O.V. Estimation of cloudiness and aerosol characteristics in the atmosphere from spectral measurements of scattered solar radiation using a neural network // Proc. SPIE, 11152, 111521H, 2019.

Nikitin S.V., Chulichkov A.I., Borovski A.N., Postylyakov O.V. On estimation of atmospheric scattering characteristics from spectral measurements of solar radiation using machine learning algorithms // Proc. SPIE 11531, 115310V; 2020.

Odintsova T.A., Koroleva A.O., Simonova A.A., Campargue A., Tretyakov M.Yu. The atmospheric continuum in the "terahertz gap" region (15–700 cm^{-1}): Review of experiments at SOLEIL synchrotron and modeling // J. Mol. Spectrosc. 2022. V. 386. P. 111603.

Odintsova T.A., Serov E.A., Balashov A.A., Koshelev M.A., Koroleva A.O., Simonova A.A., Tretyakov M.Yu., Filippov N.N., Chistikov D.N., Finenko A.A., Lokshtanov S.E., Petrov S.V., Vigasin A.A. CO_2–CO_2 and CO_2–Ar continua at millimeter wavelengths // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2021. V. 258. P. 107400.

Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu., Simonova A.A., Ptashnik I.V., Pirali O., Campargue A. Measurement and Temperature Dependence of the Water Vapor Self-Continuum Between 70 and 700 cm^{-1} // J. Mol. Struct. 2020. V. 1210. P. 128046.

Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu., Zibarova A.O., Pirali O., Roy P., Campargue A. Far-Infrared Self-Continuum Absorption of H216O and H218O (15–500 cm–1) // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2019. V. 227. P. 190–200.

Oparin D.V., Filippov N.N., Grigoriev I.M., Kouzov A.P. Non-empirical calculations of rotovibrational band wings: Carbon dioxide-rare gas mixtures // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2020. V. 247. 106950.

Panchenko M.V., Kozlov V.S., Polkin V.V., Polkin Vas.V., Terpugova S.A., Uzhegov V.N., Chernov D.G., Shmargunov V.P., Yausheva E.P., Zenkova P.N. Aerosol characteristics in the near-ground layer of the atmosphere of the city of Tomsk in different types of aerosol weather // Atmosphere. 2020. V. 11. № 1. P. 20–39.

Panchenko M.V., Yausheva E.P., Chernov D.G., Kozlov V.S., Makarov V.I., Popova S.A., Shmargunov V.P. Submicron aerosol and Black Carbon in the troposphere of Southwestern Siberia (1997–2018) // Atmosphere. 2021. V.12. № 3. P. 351–370.

Pastukhova A.S., Chubarova N.E., Zhdanova Y.Y., Galin V.Y., Smyshlyaev S.P. The forecast of erythemal UV irradiance over the territory of Northern Eurasia according to the INM-RSHU chemical-climate model // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. V. 55. № 3. P. 242–250.

Petäjä T., Duplissy E.-M., Tabakova K., Arshinov M., Balin Y., Belan B., Panchenko M. Itergrative and comprehensive Understanding on Polar Environments (iCUPE): the concept and initial results // Atmos. Chem. Phys. 2020. V. 20. № 14. P. 8551–8592.

Poliukhov A.A., Chubarova N.Y., Volodin E.M. Impact of Inclusion of the Indirect Effects of Sulfate Aerosol on Radiation and Cloudiness in the INMCM Model // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2022. V. 58. № . P. 486–493 (2022).

Polyakov A., Poberovsky A., Makarova M., Virolainen Y., Timofeyev Y., Nikulina A. Measurements of CFC-11, CFC-12, and HCFC-22 total columns in the atmosphere at the St. Petersburg site in 2009-2019 // Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14. № 8. P. 5349–5368.

Polyakov A., Virolainen Y., Nerobelov G., Timofeyev Y., Solomatnikova A. Total ozone measurements using IKFS-2 spectrometer aboard Meteor M N2 satellite in 2019–2020 // Intern. Journal of Remote Sensing. 2021. V. 42. № 22. P. 8709–8733.

Polyakov A., Virolainen Ya., Poberovskiy A., Makarova M., Timofeyev Yu. Atmospheric HCFC-22 total columns near St. Petersburg: stabilization with start of a decrease // International Journal of Remote Sensing. 2020. V. 41. № 11. P. 34365–4371.

Postylyakov O.V., A.N. Borovski, A.I. Chulichkov, S.V. Nikitin. On estimation of cloudiness characteristics and parameters of DOAS retrieval from spectral measurements using a neural network // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020b. V. 489. P. 012031.

Postylyakov O.V., Borovski A.N., Davydova M.A. et al. Preliminary validation of high-detailed GSA/Resurs-P tropospheric NO_2 maps with alternative satellite measurements and transport simulations // Proc. SPIE. 11152. 111520F. 2019b. https://doi.org/10.1117/12.2535487

Postylyakov O.V., Borovski A.N., Elansky N.F., Davydova M.A., Zakharova S.A., Makarenkov A.A. Comparison of space high-detailed experimental and model data on tropospheric NO_2 distribution // Proc. SPIE. 11208. 112082S. 2019a.

Postylyakov O.V., Borovski A.N., Shukurov K.A., Muhartova Y.V., Davydova M.A., Makarenkov A.A. On validation high-detail mapping of tropospheric NO_2 using GSA/Resurs-P observations with simulated data // Proc. SPIE. 11531. 1153109. 2020.

Ptashnik I.V., Klimeshina T.E., Solodov A.A., Vigasin A.A. Spectral composition of the water vapour self-continuum absorption within 2.7 and 6.25 μm bands // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2019. V. 228. P. 97–105.

Radionov V.F., Rusina E.N., Sibir E.E. Long-term variability of integral and spectral transparency of the atmosphere at Mirny observatory, Antarctica // Russian Meteorology and Hydrology. 2020. V. 45. № 2. P. 74–80.

Radionov V.F., Sidorova O.R., Golobokova L.P., Khuriganova O.I., Khodzher T.V., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Chernov D.G., Kozlov V.S., Panchenko M.V. – 5.2. Aerosol component of the Atmosphere in Barentsburg. P. 282–304 // Current State of Environment of the Svalbard Archipelago: Collective monograph [ed. by L.M. Savatyugin]. St. Petersburg: AARI, 2020. 304 pp.

Rakitin V.S., Skorokhod A.I., Pankratova N.V., Shtabkin Yu.A., Rakitina A.V., Wang G., Vasilieva A.V., Makarova M.V., Wang P. Recent changes of atmospheric composition in background and urban Eurasian regions in XXI-th century // 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 606 012048.

Rublev A., Kiseleva Ju., Uspensky A., Golomolzin V., Gayfulin D., Tsyrulnikov M. On-orbit calibration of Russian satellite instruments: New issues // GSICS Quarterly Spring Issue 2021. 2021. V. 15. № 1. P. 4–6.

Safatov A.S., Andreeva I.S., Buryak G.A., Olkin S.E., Reznikova I.K., Belan B.D., Panchenko M.V., Simonenkov D.V. Long-Term Studies of Biological Components of Atmospheric Aerosol: Trends and Variability // Atmosphere. 2022. V. 13. № 5. P. 651.

Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Khurigaanowa O.I., Pol'kin V.V., Radionov V.F., Sidorova O.R., Turchinovich Yu.S. Spatial distribution of aerosol characteristics over the South Atlantic and Southern Ocean, using multiyear (2004–2021) measurements in Russian Antarctic expeditions // Atmosphere. 2022. V. 13. № 3. P. 427.

Sakerin S.M., Kabanov D.M., Makarov V.I., Polkin V.V., Popova S.A., Chankina O.V., Pochufarov A.O., Radionov V.F., Rize D.D. Spatial distribution of atmospheric aerosol physicochemical characteristics in Russian sector of the Arctic Ocean // Atmosphere. 2020. V. 11. № 11. P. 1170.

Sakerin S.M., Kruglinsky I.A., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Kravchishina M.D., Makarov V.I., Novigatinsky A.N., Popova S.A., Pochufarov A.O., Simonova G.V., Turchinovich Yu.S., Darin F.A. Spatiotemporal variations in atmospheric aerosol characteristics over the Kara, Barents, Norwegian, and Greenland Seas (2018–2021 expeditions) // Atmospheric and Oceanic Optics. 2022. V. 35. № 6. P. 651–660.

Sakerin S.M., Zenkova P.N., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Lisitzin A.P., Makarov V.I., Polkin V.V., Popova S.A., Simonova G.V., Chankina O.V., Shevchenko V.P. Results of Studying Physicochemical Characteristics of Atmospheric Aerosol in the 71st Cruise of RV Akademik Mstislav Keldysh // Atmospheric and Oceanic Optics. 2020. V. 33. № 5. P. 470–479.

Serov E.A., Balashov A.A., Tretyakov M.Yu., Odintsova T.A., Koshelev M.A., Chistikov D.N., Finenko A.A., Lokshtanov S.E., Petrov S.V., Vigasin A.A. Continuum absorption of millimeter waves in nitrogen // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2020. V. 242. P. 106774.

Sha M.K., Langerock B., Blavier J.-F.L., Blumenstock Th., Borsdorff T., Buschmann M., Dehn A., De Maziere M., Deutscher N.M., Feist D.G., Garcia O.E., Griffith D.W.T., Grutter M., Hannigan J.W., Hase F., Heikkinen P., Hermans Ch., Iraci L.T., Jeseck P., Jones N., Kivi R., Kumps N., Landgraf J., Lorente A., Mahieu E., Makarova M.V., Mellqvist J., Metzger J.-M., Morino I., Nagahama T., Notholt J., Ohyama H., Ortega I., Palm M., Petri Ch., Pollard D.F., Rettinger M., Robinson J., Roche S., Roehl C.M., Rohling A.N., Rousogenous C., Schneider M., Shiomi K., Smale D., Stremme W., Strong K., Sussmann R., Te Y., Uchino O., Velazco V.A., Vigouroux C., Vrekoussis M., Wang P., Warneke Th., Wizenberg T., Wunch D., Yamanouchi S., Yang Y., Zhou M. Validation of methane and carbon monoxide from Sentinel-5 Precursor using TCCON and NDACC-IRWG stations // Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14. № 9. P. 6249–6304.

Shatunova M.V., Khlestova Y.O., Chubarova N.E. Forecast of Microphysical and Optical Characteristics of Large-Scale Cloud Cover and Its Radiative Effect Using the COSMO Mesoscale Weather Prediction Model // Atmos Ocean Opt. 2020.V. 33. P. 154–160.

Shuvalova J.; Chubarova N.; Shatunova M. Impact of Cloud Condensation Nuclei Reduction on Cloud Characteristics and Solar Radiation during COVID-19 Lockdown 2020 in Moscow // Atmosphere. 2022. V. 13. № 10. P. 1710.

Silant'ev N.A., Alekseeva G.A., Ananjevskaja Y.K. Radiative transfer in atmospheres with a large chaotic magnetic field // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2021.V. 506 № 4. P. 4805–4818.

Simonova A.A., Ptashnik I.V., Elsey J., McPheat R.A., Shine K.P., Smith K.M. Water vapour self-continuum in near-visible IR absorption bands: Measurements and semiempirical model of water dimer absorption // J. Quant.Spectrosc. Radiat. Transf. 2022. V. 277. P.107957.

Sinitsa L.N., Serdyukov V.I., Polovtseva E.R., Bykov A.D., Scherbakov A.P. Led-based fourier spectroscopy of HD17O in the range of 10000–11300 cm^{-1}. Analysis of the 3ν3 band. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2022. V. 294. P. 108409.

Svetsov V., Shuvalov V. Thermal radiation from impact plumes // Meteoritics and Planetary Science. 2019. V. 54. № 1. P. 126–141.

Tarasenkov M.V., Engel M.V., Zonov M.N. et al. Assessing the cloud adjacency effect on retrieval of the ground surface reflectance from MODIS satellite data for the Baikal area // Atmosphere. 2022. V. 13. № 12. P. 2054.

Tarasenkov M.V., Zimovaya A.V., Belov V.V. et al. Retrieval of Reflection Coefficients of the Earth's Surface from MODIS Satellite Measurements Considering Radiation Polarization // Atmospheric and Oceanic Optics. 2020. V. 33. № 2. P. 179–187.

Timofeyev Y.M., Uspensky A.B., Zavelevich F.S., Polyakov A.V., Virolainen Y.A., Rublev A.N., Kukharsky A.V., Kiseleva J.V., Kozlov D.A., Nikulin A.G., Pyatkin V.P., Rusin E.V. Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder IKFS-2 on "Meteor-M" No. 2 – four years in orbit // Journ. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2019. V. 238. P. 106579.

Tretyakov M.Yu. High Accuracy Resonator Spectroscopy of Atmospheric Gases at Millimetre and Submillimetre Waves. United Kindom: Cambridge Scholars Publishing. 2021. 425 p. https://www.cambridgescholars.com/product/978-1-5275-7581-3

Troitsyna L., Dudaryonok A., Buldyreva J.V., Filippov N.N., Lavrentieva N. Temperature dependence of CH3I self-broadening coefficients in the ν6 fundamental // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2020. V. 242. P. 106797.

Troitsyna L., Dudaryonok A., Buldyreva J.V., Filippov N.N., Lavrentieva N.A. Room-temperature CH3I-N2 broadening coefficients for the ν6 fundamental // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2021. V. 266. P. 107566.

Troitsyna L., Dudaryonok A., Filippov N.N., Lavrentieva N., Buldyreva J.V. Oxygen- and air-broadening coefficients for the CH3I ν6 fundamental at room temperature // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2021. V. 273. P. 107839.

Uzhegov V.N., Kozlov V.S., Konovalov I.B., Panchenko M.V., Zenkova P.N., Polkin V.V., Romashchenko V.A., Chernov D.G., Shmargunov V.P., Yausheva E.P. Relationships between aerosol absorption, scattering and extinction of radiation in combustion and pyrolysis smokes // Proc. SPIE 12341, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123412W. 2022.

Vasilchenko S., Barbe A., Starikova E., Kassi S., Mondelain D., Campargue A., Tyuterev V. Cavity-ring-down spectroscopy of the heavy ozone isotopologue $^{18}O_3$: Analysis of a high energy band near 95% of the dissociation thresh-

old // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2022. V. 278. P. 108017.

Vasilchenko S., Mikhailenko S.N., Campargue A. Cavity ring down spectroscopy of water vapour near 750 nm: a test of the HITRAN2020 and W2020 line lists // Molecular Physics. 2022. V. 120. № 15–16. P. e2051762.

Vlasenko S.S., Volkova K.A., Ionov D.V., Ryshkevich T.I., Ivanova O.I., Mikhailov E.F. Variations of carbonaceous atmospheric aerosol near St. Petersburg // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2019. V. 55. № 6. P. 619–627.

Volkova K.A., Anikin S.S., Mikhailov E.F., Ionov D.V., Vlasenko S.S., Ryshkevich T.I. Seasonal and daily variability of aerosol particle concentrations near St. Petersburg // Atmos. Ocean Opt. 2020. V. 33. № 5. P. 524–530.

Volpert E.V., Chubarova N.E. Long-term Changes in Solar Radiation in Northern Eurasia during the Warm Season According to Measurements and Reconstruction Model // Russ. Meteorol. Hydrol. 2020. V. 46. P. 507–518.

Wang Y., Apituley A., Bais A., Beirle S., Benavent N., Borovski A., Bruchkouski I., Chan K.L., Donner S., Drosoglou T., Finkenzeller H., Friedrich M.M., Frieß U., Garcia-Nieto D., Gómez-Martín L., Hendrick F., Hilboll A., Jin J., Johnston P., Koenig T.K., Kreher K., Kumar V., Kyuberis A., Lampel J., Liu C., Liu H., Ma J., Polyansky O.L., Postylyakov O., Querel R., Saiz-Lopez A., Schmitt S., Tian X., Tirpitz J.-L., Van Roozendael M., Volkamer R., Wang Z., Xie P., Xing C., Xu J., Yela M., Zhang C., Wagner T. Inter-comparison of MAX-DOAS measurements of tropospheric HONO slant column densities and vertical profiles during the CINDI-2 campaign // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. № 9. P. 5087–5116.

Zadvornykh I.V., Gribanov K.G., Denisova N.Yu., Zakharov V.I., Imasu R. Method for Retrieval of the HDO/H_2O Ratio Vertical Profile in the Atmosphere from Satellite Spectra Simultaneously Measured in Thermal and Near-IR Ranges // Atmospheric and Oceanic Optics. 2021. V. 34. № 2. P. 81–86.

Zadvornykh I.V., Gribanov K.G., Zakharov V.I., Imasu R. Methane Vertical Profile Retrieval from the Thermal and Near-Infrared Atmospheric Spectra // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. V. 32. № 2. P. 152–157.

Zakharova S., Davydova M., Borovski A., Shukurov K., Mukhartova Yu., Makarenkov A., Postylyakov O. Experiments on high-detailed mapping of tropospheric NO_2 using GSA/Resurs-P observations: results, validation with models and measurements, estimation of emission power // Proc. SPIE. 11859. 1185905. 2021.

Zhdanova E.Y., Chubarova N.Y., Lyapustin A.I.: Assessment of urban aerosol pollution over the Moscow megacity by the MAIAC aerosol product // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. № 2. P. 877–891.

Zhuravleva T., Nasrtdinov I., Chesnokova T., Ptashnik I. Monte Carlo simulation of thermal radiative transfer in spatially inhomogeneous clouds taking into account the atmospheric sphericity // J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2019. V. 236. P. 296–305.

Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M., Artyushina A.V., Timofeev D.N., Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V. Intensity of reflected solar radiation in the presence of optically anisotropic crystal clouds: Results of preliminary calculations // Proceedings of SPIE. 2021a. V. 11916. 1191603.

Zhuravleva T.B., Nastrdinov I.M., Konovalov I.B., Golovushkin N.A., Beekmann M. Impact of the Atmospheric Photochemical Evolution of the Organic Component of Biomass Burning Aerosol on its Radiative Forcing Efficiency: a Box Model Analysis // Atmosphere. 2021b. V. 12. № 12. P. 1555.

Zhuravleva T.B., Artyushina A.V., Vinogradova A.A., Voronina Yu.V. Black Carbon in the Near-Surface Atmosphere Far Away from Emission Sources: Comparison of Measurements and MERRA-2 Reanalysis Data // Atmospheric and Oceanic Optics, 2020, V. 33. № 6. P. 591–601.

Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M., Vinogradova A.A. Direct Radiative Effects of Smoke Aerosol in the Region of Tiksi Station (Russian Arctic): Preliminary Results. // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. V. 32. № 3. P. 296–305.

Russian Investigations in the Field of Amtospheric Radiation in 2019–2022

Yu. M. Timofeyev[1], V. P. Budak[2], Ya. A Virolainen[1, *], T. B. Zhuravleva[3], I. V. Ptashnik[3], A. B. Uspensky[4], N. N. Filippov[1], and N. E. Chubarova[5]

[1]St. Petersburg University, 7-9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034 Russia
[2]National Research University MPEI, Krasnokazarmennaya str, building 1, Moscow, 111250 Russia
[3]Zuev Institute of atmospheric optics Russian Academy of Sciences, Siberian branch, Academic Zuev Sq., 1, Tomsk, 634055 Russia
[4]Scientific Research Center for space hydrometeorology "Planeta", B. Predtechensky per., 7, Moscow, 123242 Russia
[5]Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, 1, building 2, Moscow, 119991 Russia
**e-mail: yana.virolainen@spbu.ru*

The main results of scientific research and development in the field of atmospheric radiation in Russia for the period 2019–2022 are considered The main attention is paid to research in the field of radiative transfer theory, atmospheric spectroscopy, radiation climatology, aerosol and radiation forcing, remote sensing of the atmosphere and surface, interpretation of satellite measurements Lists of major publications in these areas for this period are provided.

Keywords: theory of radiation transfer, atmospheric spectroscopy, radiation climatology, remote sensing of the atmosphere

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2023, том 59, № 7, с. 1008–1020

УДК 504.3.054. 541.124

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОЙ ХИМИИ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. И. К. Ларин*

Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН, Ленинский пр., д. 38, корп. 2, Москва, 119334 Россия

**e-mail: iklarin@narod.ru*

Поступила в редакцию 31.08.2023 г.
После доработки 08.11.2023 г.
Принята к публикации 15.11.2023 г.

Представлен краткий обзор работ российских ученых в области атмосферной химии в 2019–2022 гг., включая работы по химии тропосферы, химии озонового слоя, работы по изучению гетерофазных процессов, а также работы по химическим аспектами климата и его изменением. Обзор подготовлен в Комиссии по атмосферной химии Секции метеорологии и атмосферных наук Национального геофизического комитета.

Ключевые слова: химические процессы, гетерофазные процессы, тропосфера, стратосфера, климат

DOI: 10.31857/S0002351523070076, **EDN:** NYTADI

1. ХИМИЯ ТРОПОСФЕРЫ

Одним из основных направлений исследований в этой области является изучение элементарных химических реакций атмосферного значения, данные о которых затем используются в математических моделях атмосферы. В этой связи следует назвать работу [Ларин и др., 2019], в которой с использованием метода резонансной флуоресценции для регистрации активных химических реагентов в проточном реакторе была измерены константы скорости реакции атомов хлора с CH_3Br в диапазоне температур 273–358 K. Показано, что измеренная константы скорости возрастают при проведении реакции при более низкой температуре, что характерно для гетерогенных реакций. Предполагается, что взаимодействие атома с CF_3Br происходит на поверхности реактора. Наряду с методом резонансной флуоресценции для изучения химических реакций используется масс-спектральная техника. В работе [Васильев и др., 2021б] с использованием этой техники была определена константа скорости реакции бензола с атомарным фтором методом конкурирующих реакций. Исследования проводили в проточном реакторе низкого давления с масс-спектрометрическим анализом реагентов и продуктов реакции. В качестве конкурирующих реакций использованы реакции атомов фтора с циклогексаном, трифторуксусной и трихлоруксусными кислотами. Впервые определены соотношения констант скорости бензола и этих конкурирующих реакций с атомарным фтором. На основе полученных экспериментальных данных и известных из литературы констант скорости реакций рассчитана величина константы скорости реакции атомов фтора с бензолом. В другой работе [Васильев и др., 2021а] масс-спектрографическим методом электрораспыления растворов электролитов в вакууме были получены масс-спектры отрицательных ионов водных растворов полностью нейтрализованных молекул монохлоруксусной кислоты. В работе [Васильев и др., 2019] эта техника использовалась для изучения свойств токсичных веществ. В работе описываются результаты масс-спектрометрического исследования химических веществ – хлоруксусных кислот (монохлоруксусная, дихлоруксусная, трихлоруксусная кислоты) и пиридина с применением напуска исследованных веществ в виде модулированного молекулярного пучка. Преимуществом молекулярно-пучкового напуска является сведение к минимуму образования в ходе анализа посторонних веществ, поскольку метод исключает столкновение молекул исследуемого вещества с нагретыми стенками ионного источника, на которых могут происходить реакции пиролиза и другие реакции образования новых веществ. Помимо лабораторных измерений химические реакции изучаются модельным и теоретическим путем. Так, в работе [Федотов и Кольцов, 2019] был предложен метод расчета точных кинетических автономных инвариантов многостадийных линейных химических реакций, протекающих в безградиентном реакторе через любое количество

элементарных стадий с участием произвольного числа реагентов в рамках закона действующих масс. Для динамических моделей линейных реакций всегда можно найти общие и частные аналитические решения, которые выражаются через начальные условия явным образом. Идея метода основана на выборе таких начальных условий, которые позволяют выразить неравновесные концентрации реагентов через постоянные кинетические параметры (константы скоростей стадий и скорости потока). В подобной работе [Ненайденко, 2020] рассматриваются особенности протекания химических реакций в многокомпонентных системах. Указывается, в частности, что с увеличением количества компонентов, принимающих участие в подобных реакциях, резко возрастает структурное разнообразие образующихся продуктов, которое становится практически безграничным. В другой расчетной работе [Крупнов и Погосбекян, 2019] методами квантовой механики рассчитаны переходные состояния, частоты колебаний и пути реакции $CO + N_2O \rightleftarrows CO_2 + N_2$. Рассмотрен как прямой, так и обратный переход атома кислорода, так и процесс, идущий через образование нескольких промежуточных комплексов. В рамках теории переходного состояния рассчитаны константы скорости прямой и обратной реакции. В работе [Денисов и Денисова, 2019] экспериментальные данные по реакциям отрыва атомов водорода от углеводородов, галогеналканов и кислородсодержащих соединений атомами кислорода (50 реакций) проанализированы в рамках модели пересекающихся парабол. Установлено влияние пяти факторов на энергию активации этих реакций: энтальпии реакции, триплетного отталкивания, электроотрицательности атомов реакционного центра, диполь-дипольного взаимодействия реакционного центра с полярными группами, π-электронов соседних ароматических колец. Важные сведения о химических процессах, протекающих в загрязненном городском воздухе, могут быть получены из данных о химическом составе и кислотности городских осадков. В качестве примера можно привести работу [Васильчук и др., 2021], в которой анализируется состав осадков, собранных на протяжении 2014–2016 гг. на территории Метеорологической станции МГУ (Москва), включая их изотопный состав. Было показано, что распределение изотопного состава осадков в Москве, наблюдаемое на протяжении 2014–2016 гг., имеет синусоидальный вид и хорошо коррелирует с изменением температуры приземного слоя воздуха. В сезонном ходе среднемесячных значений 18 O в осадках наблюдается их закономерное увеличение с января по май–июль. В течение рассматриваемого 3-летнего периода самые изотопически легкие осадки выпадали в январе, наиболее изотопически тяжелые – в летние месяцы. В аналогичной работе [Ерёмина, 2019] химический состав осадков в Москве анализируется уже в период с 1982 по 2017 гг. Весь ряд наблюдений можно разделить на три периода, которые характеризуются кислотностью осадков, изменением минерализации и преобладанием тех или иных ионов. В 1982–1998 гг. наблюдались наиболее загрязненные атмосферные с повышенной кислотностью; в 1999–2004 гг. – практически полностью отсутствовали кислотные выпадения, и уменьшилась минерализации. Последний период 2005–2017 гг. отличается от предыдущего увеличением частоты кислотных осадков, при этом минерализация практически не изменилась, несмотря на заметное увеличение хлоридов в последние годы. Работа [Горбаренко, 2022] продолжает исследование причин климатических изменений в Московском регионе на базе наблюдений МО МГУ. Проведен анализ многолетней динамики основного климатообразующего фактора – радиационного режима атмосферы. На протяжении 65-летнего периода наблюдений на фоне квазипериодических изменений отмечены значимые тенденции для всех радиационных параметров атмосферы, наиболее выраженные в зимний период. Наибольший рост на 26, 16 и 49% отмечен для среднегодовых значений и на 73, 41 и 34% для зимних значений радиационного, длинноволнового балансов и температуры поверхности почвы соответственно. В XXI веке усилились тенденции уменьшения аэрозольной мутности атмосферы, роста прямой и уменьшения рассеянной радиации. Практически вдвое увеличилась скорость повышения длинноволнового и радиационного баланса, температуры поверхности почвы. В отсутствии значительных вулканических извержений, главным естественным фактором стал “парниковый эффект” облачности. Антропогенная составляющая аэрозольной мутности в последние годы существенно снизилась, что связано с рядом мер правительства Москвы по улучшению экологии в городе. Антропогенное влияние на радиационный режим в городе проявилось в усилении длинноволновых потоков, что привело к росту интенсивности “острова тепла” в XXI веке.

В связи с актуальностью вопросов охраны окружающей среды и безопасной энергетики укажем на работу [Филиппов и Ярославцев, 2021], в которой рассматривается современное состояние перспективы развития водородной энергетики. Значительное число работ в области тропосферной химии было посвящено мониторингу загрязняющих веществ, включая продукты лесных пожаров, аэрозолей, а также малых составляющих тропосферы, таких, как озон, окись и двуокись углерода, двуокись азота и др. [Агеев и др., 2019; Агеев и Пономарев, 2020; Андреев и др., 2022; Баженов и др., 2019; Белан и др., 2020; Головко и др., 2022; Головушкин и др., 2020; Голубков и др.,

2020; Горбаренко, 2020; Горчаков и др., 2021а, б; Груздев, 2019; Груздев и Елохов, 2021; Дембелов и Башкуев, 2022; Дементьева и др., 2020; Еланский и др., 2021, 2022; Захаров и др., 2022; Иванова, 2019; Ионов и Поберовский, 2020; Калашник, 2022; Карпов и др., 2021; Ковалев и др., 2022; Курятникова и др., 2022; Ларин и др., 2020а, 2021а; Малкарова, 2022; Мирошниченко и др., 2022; Морозов и др., 2022; Неробелов и др., 2022; Панов и Сахарова, 2022; Ракитин и др., 2021; Скороход и др., 2022; Федченко и др., 2019; Филей и др., 2022; Чеснокова и др., 2019; Чистякова и др., 2021; Чэнсюнь и др., 2022; Шаталина и др., 2019, 2021а, 2021б; Шихов и др., 2022].

2. ГЕТЕРОФАЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Гетерофазные процессы имеют большое значение для понимания озоносферной химии. Напомним, что именно эти процессы сыграли решающую роль в истощении озонового слоя в конце 20-го столетия и в образовании Арктической и Антарктической озоновых дыр. В последние годы в этой области были получены новые важные результаты. При этом значительное внимание уделялось процессам, протекающим в слое Юнге (нижняя и средняя стратосфера). Так, в работе [Алоян и др., 2019а] приводятся результаты 3D-моделирования пространственно-временной структуры распределения в атмосфере газовых примесей и частиц слоя Юнге в зимний период 2002 г., даны о счетных и массовых концентрациях, а также изменчивости содержания в частицах воды, серной и азотной кислот. Аналогичные задачи решались в работе [Алоян и др., 2019б].

Сульфатные частицы слоя Юнге оказывают влияние на свойства окружающей среды. В работе [Ларин и др., 2021а] авторы объясняют, каким образом это влияние изменяет атмосферное время жизни нечетного кислорода. В другой работе, [Ларин и др., 2021б], объясняется влияние сульфатных частиц на скорость разрушения озона в нижней стратосфере. Найденный в расчетах на высотах менее 16 км драматический спад скорости разрушения озона в сравнении со скоростью убыли озона, рассчитанной с участием газовых химических реакций свидетельствует об ингибирующей роли частиц аэрозоля. Причиной выступает захват из воздуха частицами аэрозоля молекул N_2O_5. Их быстрый сток влечет за собой резкий спад концентраций компонент семейства NO_x в воздухе, а также, хотя и менее выраженное, снижение концентраций компонентов семейств HO_x и O_x, участвующих в разрушении озона.

В работе [Алоян и др., 2021] описана новая численная модель переноса и трансформации в атмосфере газовых и аэрозольных примесей с учетом процессов фотохимии, нуклеации с участием нейтральных молекул и ионов, а также конденсации/испарения и коагуляции. Полученные применительно к северному полушарию и зимнему времени результаты указывают на значимую роль процесса ионнойнуклеации в формировании атмосферного аэрозоля. При этом наряду с уровнем ионизации воздуха ключевыми факторами, определяющими динамику ионной нуклеации, являются также температура и относительная влажность. В работе [Алоян и др., 2021] анализируются образцы из скважины, глубиной в 70 м, пробуренной на станции Восток (Центральная Антарктида), которые охватывают эпоху позднего голоцена (последние 2000 лет). Реконструированы климатические условия (температура воздуха и скорость снегонакопления) в окрестностях станции Восток. Полученные результаты сравниваются с опубликованными палеоклиматическими реконструкциями. В работе [Рогачев, 2019] автор объясняет, каким образом механическое воздействие может привести к гетерогенным реакциям в порошковых системах. Правда, для этого необходимо, чтобы реакция была экзотермической, т.е. шла с выделением тепла. В работе [Панченко и др., 2019] в хронологическом порядке излагается история исследований тропосферного аэрозоля в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

Для того, чтобы учитывать гетерофазные реакции в атмосферной химии, необходимо знать константы скорости гетерогенных реакций. Такие данные получают с помощью специальных лабораторных кинетических установок, в которых химическая реакция протекает не в газовой фазе, а на стенках реактора. В качестве примера можно привести работу [Ларин и др., 2021в], в которой изучалась реакция диметилсульфида с радикалами IO. Была определена температурная зависимость этой гетерогенной реакции. В работе [Ларин и др., 2020б] с использованием той же методики что и в [Ларин и др., 2021г], была изучена гетерогенная реакция сероводорода с радикалами IO.

Среди работ гетерофазной тематики определенный интерес представляют работы, в которых анализируются аэрозольные данные локального характера. Примером такой работы является работа [Ермаков и др., 2020], в которой представлены данные о сезонной изменчивости аэрозольного состава в различных районах Бельгии в 2001–2003 гг. В работе [Сакерин и др., 2019] обсуждаются аэрозольные данные, полученные на Северной Земле. Было показано, что средние значения большинства характеристик аэрозоля, измеренных в апреле–июне 2018 г., немного ниже, чем в арктическом пос. Баренцбург (арх. Шпицберген), и в несколько раз меньше, чем на юге Западной Сибири в этот же период. В работе [Ермаков и др., 2019] авторы анализируют вопрос образования сульфатов в карбонатных частицах, используя данные мониторинга атмосферы в Иркутске. Ав-

торам удалось показать, что основным источником сульфатов в карбонатных частицах в атмосфере Иркутска служит захватываемый из воздуха SO_2. Их накопление в составе частиц вызвано гетерофазными реакциями и сопровождается замещением гидрокарбонатов (HCO_3^-) на сульфатные анионы.

Помимо описанного выше, гетерофазная химия занимается изучением реакций активных химических компонент с и покрытиями разного химического состава. Так, в работах [Зеленов и др., 2019; Зеленов и Апарина, 2021] изучался захват радикалов NO_3 покрытием из метановой сажи. На основе хроматографического и масс-спектрометрического анализов состава исходной метановой сажи и твердых продуктов ее реакции с окисляющим газофазным реагентом NO_3 было установлено, что одними из основных продуктов этой гетерогенной реакции являются производные фталевой кислоты, соединения группы парафинов и производные ацетофена.

Определенные сведения о гетерофазных процессах, протекающих в атмосфере, могут быть получены при изучении химического состава и других характеристик осадков, выпадающих на земную поверхность в виде дождя или снега. Соответствующие данные обсуждаются в работах, [Власов и Еремина, 2020; Завгородняя и др., 2021]. В заключении этого раздела укажем на работу [Береснев и Васильева, 2020], в которой обсуждается предложенная ранее [Зуев и др., 2014а, б, в] гипотеза о возможности образования наночастиц черного углерода в эруптивной колонне вулканического извержения. Другие вопросы гетерофазной химии обсуждаются в работах [Бабушкин и др., 2022; Губанова и др., 2022; Козлов и Жестков, 2022; Шилин и др., 2022].

3. ХИМИЯ ОЗОНОВОГО СЛОЯ

В этой области в последнее четырехлетие был получен ряд новых результатов, как в области теории озонового слоя, так и в области наблюдений за его восстановлением после истощения в конце прошлого века под действием антропогенных факторов. Так, в работе [Никифорова и др., 2019] по данным отечественной сети фильтровых озонометров М-124 и результатам спутникового мониторинга исследована изменчивость общего озона в Арктике в зимний сезон 2015/2016 г. и установлено развитие в конце января 2016 г. первой за всю историю наблюдений озоновой минидыры. В [Криволуцкий и др., 2021] представлен обзор работ, выполненных в лаборатории химии и динамики атмосферы Центральной аэрологической обсерватории, по созданию и использованию глобальных численных моделей атмосферы. Созданные модели позволяют проводить широкий спектр численных исследований, включая как температурные, так и циркуляционные эксперименты. Из модельных работ назовем работу [Варгин и др., 2021], в которой по результатам пяти 50-летних расчетов с 5-й версией совместной климатической модели ИВМ РАН, было показано, что зимние сезоны с явлением Эль-Ниньо характеризуются более высокой температурой арктической стратосферы по сравнению с сезонами с Ла-Нинья. В работе [Коленникова и др., 2021] рассматривался отклик стратосферы Арктики на климатическое явление Эль-Ниньо с учетом его восточно- и центрально-тихоокеанского типов за период 1950–2005 гг. на основе регрессионного и композитного анализа с использованием расчетов шести совместных климатических моделей проекта CMIP5 и данных реанализа. В работе [Цветкова и др., 2021] приводятся оценки химического разрушения озона в зимне-весенние сезоны для стратосферы Арктики на базе многолетних данных наблюдений вертикального распределения озона.

Проанализированы особенности и возможные причины необычайно сильного и устойчивого стратосферного полярного вихря в Арктике в зимний сезон 2019/2020 г., приведшего к рекордному за последние годы разрушению озонового слоя, и связанные с этим полярным вихрем динамические процессы. Эти данные дополняются данными работы [Баженов, 2021], в которой сообщается, что зимой-весной 2019–2020 гг. наблюдалась самая значительная озоновая аномалия в Арктике за всю историю наблюдений. Она была обусловлена необычайно сильным и продолжительным полярным вихрем, повлекшим беспрецедентное химическое разрушение озона. Анализ данных Aura OMI/MLS показал, что общее содержание озона неуклонно сокращалось и составило 230 е.Д. 18 марта в пункте Алерт, 222 е.Д. 18 марта в Эврике, 229 е.Д. 20 марта в Туле и 226 е.Д. 18 марта в Резольют. Минимальная температура была на 9–10% ниже нормы с декабря по апрель в стратосфере над Томском и Арктикой. В работе [Габис, 2021]обсуждается вопрос о том, каким образом квазидвухлетние осцилляции зонального ветра в экваториальной стратосфере могут повлиять на межгодовые изменения мощности озоновой дыры в Антарктике. Другие сведения об озоне в Антарктиде и южных морях содержатся в работах [Варгин и др., 2020; Сибир и др., 2020; Смышляев и др., 2020]. В [Трошичев и др., 2021] обсуждается влияние космической погоды на свойства атмосферы. Показано, в частности, что высокоэнергичные солнечные протоны оказывают мощное воздействие на фотохимические процессы в полярных областях и, соответственно, на атмосферную циркуляцию и планетарную облачность. Вариации солнечного УФ-излучения моделируют скорость спуска зональных ветров в экваториаль-

ной стратосфере в ходе квазидвухлетней осцилляции и контролируют, таким образом, общую продолжительность цикла и, соответственно, вариации общего содержания озона в Антарктике. В работе [Пастухова и др., 2019] с помощью химико-климатической модели ИВМ РАН-РГГМУ (ХКМ ИВМ-РГГМУ) было проанализировано действие различных факторов на общее содержание озона и эритемную УФ радиацию на территории Северной Евразии за период с 1979 по 2059 гг. Среди модельных разработок назовем работу [Нусинов и др., 2019] по созданию спектра далекого ультрафиолетового излучения Солнца в области длин волн, ответственной за диссоциацию молекулярного кислорода.

В работе [Куминов и др., 2021], описывающей ракетные средства зондирования атмосферы, было показано, что в интервале высот от 25 до 75 км тренды температуры и скорости ветра над станцией ракетного зондирования атмосферы Волгоград в 1969–1995 гг. являются нелинейными и на большинстве высот немонотонными. Обнаружено увеличение значений размаха трендовых вариаций анализируемых параметров в обозреваемом периоде с высотой: температуры – до 15–19 K в нижней и средней мезосфере, зонального компонента скорости ветра – до 15 м/с в стратопаузе, меридионального компонента – до 10 м/с в нижней мезосфере. Наряду с работами модельного характера значительное внимание в последние годы уделялось наблюдениям за содержанием озона и его изменчивостью. В качестве примера можно привести работу [Дворецкая и др., 2020], в которой по спутниковым данным об общем содержании озона (ОСО) за 1979–2015 гг. исследована сезонная и долговременная изменчивость количества положительных и отрицательных аномалий ОСО для Земли в целом, Северного полушария, России и широтного пояса, которому она принадлежит. Было установлено, что долговременная изменчивость ОСО существенно превышает сезонную и обусловлена самым медленным из приливных колебаний с периодом 18.6 лет.

В [Беликович и др., 2020] сообщается о наблюдениях за озоном над Нижним Новгородом зимой 2017–2018 годов. В [Кропоткина и др., 2019] были представлены результаты наземных микроволновых профилей стратосферного озона над Москвой в холодные полугодия 2014–2015 и 2015–2016 гг., и рассмотрены причины наблюдавшихся изменений озона в верхней стратосфере. Зимой 2014–2015 гг. отмечались повышенная активность планетарных волн, большие перепады температуры в начале зимы и пониженные температуры с января по март. Полярный вихрь был неглубоким и долгоживущим, в феврале–марте холодный воздух вихря находился над Москвой. Это привело к сильной отрицательной корреляции измеренного содержания озона с температурой. Наибольшее содержание озона на уровне 2 мбар наблюдалось в середине марта. Напротив, в ноябре–декабре 2015 г. при меньшей активности планетарных волн возник интенсивный полярный вихрь, который был полностью разрушен мажорным финальным потеплением в начале марта 2016 г. В работе [Ларин, 2019в] излагается теория цепных процессов озоносферы, на основе которой рассчитываются время жизни нечетного кислорода и скорость разрушения озона в каталитических циклах [Ларин, 2019а, 2020б, 2020в, 2022]. Закончим раздел работой [Кашкин и др., 2022], в которой обсуждается воздействие ядерного взрыва на озон.

4. ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Работы в этой области были связаны с климатом, прогнозированием климатических изменений, парниковыми газами и сопутствующими вопросами. Хотя вопрос об антропогенных причинах изменений современного климата у большинства климатологов не вызывает сомнений, дискуссионным является вопрос о том, что происходит раньше – рост содержания парниковых газов или рост приповерхностной температуры? Этот вопрос уже обсуждался (см. 4-й раздел в [Ларин, 2019б]). Его обсуждение было продолжено в работе [Мурышев и др., 2019]. В этой работе в численных экспериментах с климатической моделью ИФА РАН и концептуальной климатической моделью климата с углеродным циклом исследован фазовый сдвиг между изменениями приповерхностной температуры и содержанием CO_2 при внешнем воздействии в виде синфазных по времени внешних эмиссиях углекислого газа и метана в атмосферу. Получено, что при достаточно большом временном масштабе внешнего воздействия изменения CO_2 запаздывают от соответствующих изменений температуры. К этому нужно добавить, что (как пишут авторы) фазовый сдвиг между изменениями глобальной приповерхностной температуры и содержания CO_2 в атмосфере в общем случае не характеризует причинно-следственные связи в земной системе. Вопросы теории климата освещаются в работе [Мохов, 2019]. Ее автор – сопредседатель Научного совета РАН по проблемам климата Земли академик РАН И. И. Мохов – подробно анализирует тенденции наблюдаемых температурных вариаций, их глобальные и региональные особенности. В работе отмечается, что повышение глобальной приповерхностной температуры сопровождается быстрым ростом числа природных катастроф, в первую очередь вследствие гидрологических и метеорологических аномалий. Утверждается, что климатические аномалии последних лет свидетельствуют не только об увеличении риска экс-

тремальных региональных событий, но и о новых процессах и явлениях, характеризующих достижение определенного критического уровня климатических изменений. Согласно результатам анализа современных изменений климата с использованием модельных оценок с учетом естественных и антропогенных факторов в результате быстрого потепления в последние десятилетия земная климатическая система достигла режима, сопоставимого с режимом оптимума голоцена.

В работе [Володин, 2019] по данным доиндустриального эксперимента продолжительностью 1200 лет с климатической моделью INM-CM5 был исследован механизм естественных колебаний климата в Арктике с периодом около 60 лет. Показано, что четверть периода, предшествующего арктическому потеплению, наблюдается более интенсивный, чем обычно, приток атлантической воды в Северный Ледовитый океан, вблизи побережья и границы шельфа соленость и плотность меньше, чем обычно. В результате адвекции атлантической воды после арктического потепления вода у побережья и границы шельфа становится более соленой и тяжелой, что приводит к ослаблению потока атлантической воды и изменению фазы колебаний. Выводы подтверждаются расчетом генерации аномалий температуры, солености и расхода по различным слагаемым, а также оценкой вклада различных слагаемых в изменение фазы колебаний. В работе [Денисов и др., 2019] анализировался вклад эмиссий углекислого газа и метана с территории России в изменение глобального климата. Было показано, что учет изменений климатических условий может сильно влиять на показатели воздействия выбросов различных парниковых газов на климатическую систему, особенно на больших временных горизонтах. При принятии решений следует учитывать, что в зависимости от горизонта планирования может изменяться роль естественных потоков парниковых газов в атмосферу из наземных экосистем. В настоящее время в российских регионах наземные экосистемы, поглощая CO_2 из атмосферы способствуют замедлению роста глобальной температуры, а эмитируя CH_4 в атмосферу ускоряют потепление. При этом общий эффект естественных потоков этих парниковых газов из российских регионов в современных условиях способствует замедлению потепления. Роль этого замедляющего потепление эффекта растет в первой половине XXI века, а после достижения максимума (зависящего от сценария антропогенных выбросов) уменьшается к концу века при всех рассмотренных сценариях антропогенных воздействий в связи с ростом естественных эмиссий CH_4 и уменьшением поглощения CO_2 наземными экосистемами. В [Мохов и Смирнов, 2022а] было рассмотрено влияние антропогенных и естественных факторов на климат полушария. На основе трехкомпонентных авторегрессионных моделей и имеющихся данных наблюдений с XIX в. оценена роль в формировании температурных трендов на разных временных горизонтах Атлантической мультидесятилетней осцилляции, Эль-Ниньо-Южного колебания, Тихоокеанской междесятилетней осцилляции и Антарктической осцилляции. Отмечен существенный вклад в температурные тренды ключевых мод климатической изменчивости на сравнительно коротких интервалах длительностью в пределах двух-трех десятилетий – сопоставимый с вкладом парниковых газов и даже превышающий его. Сравниваются оценки, характеризующие особенности полярных, средних и тропических широт в Южном (ЮП) и Северном (СП) полушариях. Согласно полученным оценкам на временных интервалах от полувека и более в формировании температурных трендов разных широтных зон и для Земли в целом доминирующий вклад связан с радиационным воздействием парниковых газов в атмосфере.

В работе [Аржанов и др., 2019] был рассмотрен вопрос об устойчивости метангидратов вечной мерзлоты. Были получены результаты численного моделирования теплового режима вечной мерзлоты Западной Сибири (полуостров Ямал) и зоны стабильности гидратов метана за последние 10 тыс. лет. Получены термобарические условия стабильности и диссоциации континентальных гидратов метана. Показано, что в настоящее время в толщах вечной мерзлоты Ямала на глубинах до 150 м могут существовать реликтовые гидраты метана, которые могли “пережить” потепление в голоценовом и сохраняться при минусовых температурах в вечной мерзлоте. В [Мохов, 2022] получены оценки изменений в течение последних семи десятилетий (1950–2019 гг.) частот переходов между разными фазами процессов. С положительными (фаза Эль-Ниньо) и отрицательными (фаза Ла-Нинья) аномалиями температуры поверхности в экваториальных широтах Тихого океана связаны сильнейшие межгодовые вариации глобальной приповерхностной температуры. Выявлены существенные различия тенденций для явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья разного типа, характеризуемых аномалиями температуры поверхности в экваториальных широтах восточной (Niño3) и центральной (Niño4) областей Тихого океана. В [Мохов и Парфенова, 2022] были получены количественные оценки связи внутригодовых и межгодовых вариаций площади снежного покрова в Северном полушарии, в том числе в Евразии и Северной Америке, с изменениями приповерхностной температуры на основе спутниковых данных и данных реанализа для периода 1979–2020 гг. В [Мохов и Смирнов, 2022б] получены количественные оценки вклада антропогенных воздействий, характеризуемых изменени-

ями радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере, и ключевых мод естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры разных широтных зон Северного (СП) и Южного полушария (ЮП) на различных временных горизонтах с использованием данных наблюдений. Результаты анализа свидетельствуют о существенной роли изменений радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере в формировании тренда глобальной приповерхностной температуры, усиливающейся с увеличением временного горизонта. При этом отмечены значительные различия для широтных зон ЮП и СП, связанные с влиянием разных мод естественной климатической изменчивости.

В [Анисимов и др., 2020] было рассмотрено влияние эмиссий метана из криолитзон России на глобальный климат. Установлены статистические связи их интенсивности с температурой воздуха, атмосферными осадками, мощностью сезонноталого слоя и температурой многолетнемерзлых грунтов. С использованием ансамблевого климатического сценария CMIP5 получен прогноз изменения эмиссии метана в криолитозоне на середину XXI в. При помощи модели земной системы INM-CM48 показано, что прогнозируемое увеличение эмиссии метана на 20 Тг/год приведет к повышению среднегодовой глобальной температуры не более чем на 0.05°С. Проведен анализ неопределенности полученных оценок и рассмотрена альтернативная концептуальная модель быстрых пороговых изменений эмиссии метана. В [Мохов и др., 2020] на основе численных расчетов с глобальной климатической моделью оценены глобальные и региональные изменения климата в голоцене. Согласно полученным результатам, современная среднегодовая глобальная приповерхностная температура в последние десятилетия превысила соответствующие значения для предыдущих 10 тыс. лет, в том числе в период так называемого “оптимума голоцена” (иначе – среднего голоцена, около 6 тыс. лет назад).

Глобальные и региональные климатические изменения и изменения характеристик углеродного цикла в последнее столетие по модельным расчетам (с учетом антропогенных воздействий) существенно отличаются от изменений в предыдущие столетия и тысячелетия, когда ключевую роль играли естественные воздействия на климатическую систему. В работе [Мохов, 2020] оцениваются особенности современных быстрых климатических изменений в Арктике и их последствий на основании результатов, полученных в последние годы. В [Мохов и Тимажев, 2019] были получены оценки изменения повторяемости атмосферных блокирований на основе ансамблевых расчетов CMIP5 с помощью современных климатических моделей общей циркуляции с использованием различных критериев детектирования атмосферных блокингов и разных RCP-сценариев антропогенных воздействий для XXI в. В [Володин и Грицун, 2020] представлены результаты моделирования изменений климата в 2015–2100 гг. с помощью климатической модели ИВМ РАН INM-CM5. Показано, что летом именно на территории России температура самого жаркого месяца может расти быстрее, чем среднесезонная температура. Рассматривается изменение площади морского льда в Арктике и показано, что, согласно данным моделирования, ни при каком сценарии не происходит полного освобождения Северного Ледовитого океана ото льда в XXI в.

В [Бикташ, 2019] представлены данные анализа вариаций потока полной солнечной радиации в 17–24-м циклах солнечной активности и их связи с глобальным потеплением климата. Рассмотрено влияние галактических космических лучей и вулканической активности на климат. Показано, что температура Земли в 17–20-м циклах испытывала вариации в соответствии с ходом солнечной активности без наблюдаемого тренда: температура росла с ростом солнечной активности и спадала в солнечных минимумах. Глобальное потепление началось в 1976 г. в 21-м цикле солнечной активности. С учетом наблюдаемого тренда в 21–24-м циклах солнечной активности, изменения глобальной температуры Земли, так же как и в 17–20-м циклах, были связаны с циклическими вариациями потока полной солнечной радиации. Галактические космические лучи, изменяя прозрачность атмосферы на фоне понижений потока полной солнечной радиации, дополнительно способствовали увеличению температурных минимумов. Сильные вулканические извержения сопровождались 1–2-х годичными понижениями температуры, которые не нарушали циклического процесса изменения климата Земли. В отсутствие трендов в космофизических факторах, влияющих на климат, процесс постепенного роста средней годовой температуры Земли в 21–24-м циклах солнечной активности объясняется антропогенным фактором. В [Володин, 2021] рассматривается изменение равновесной чувствительности модели климата INM-CM4-8 к учетверению концентрации CO_2 при изменениях в параметризации облачности в этой модели. Показано, что регулирование учета различных механизмов образования и диссипации облачности может приводить к изменению равновесной чувствительности модели в пределах от 3.6 до 8.1 град., что больше чем наполовину покрывает диапазон изменения этой величины для современных климатических моделей.

Климатические изменения, о которых говорилось выше, изменяют не только окружающую среду, но и условия жизни. Эти вопросы обсуждаются в работах [Гинзбург и Докукин, 2021; Голицын и Васильев, 2019; Клюева и др., 2020; Торжков и др., 2019]. В работе [Ларин, 2020а] рассматривается влияние глобального потепления на

скорость разрушения стратосферного озона в каталитических циклах. Другие климатические вопросы рассматриваются в работах [Володин, 2022; Гинзбург и др., 2019; Денисов и др., 2022; Зинченко и др., 2022; Куликова и др., 2022; Лысенко и др., 2022; Мохов и Тимажев, 2019; Порфирьев и др., 2022; Рыжакова и др., 2019; Семенов, 2022; Сирин и др., 2022].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агеев Б.Г., Пономарев Ю.Н. Оценка сечения поглощения запрещенной колебательной полосы в нанопористом аэрозоле // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 2. С. 85–87.

Агеев Б.Г., Сапожникова В.А., Груздев А.Н., Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Савчук Д.А. Сравнение характеристик остаточных газов в годичных кольцах деревьев сосны // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 2. С. 105–112.

Алоян А.Е., Арутюнян В.О., Ермаков А.Н. Моделирование формирования слоя Юнге в северных широтах: пространственно-временная структура и состав частиц // Метеорология и гидрология. 2019. № 5. С. 5–13.

Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Формирование ледяных частиц аэрозоля в нижней стратосфере // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 1. С.81–85.

Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Моделирование влияния ионов на динамику формирования аэрозоля // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 113–119.

Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Демин В.И., Дудорова Н.В., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Коновальцева Л.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Оболкин В.А., Постыляков О.В., Потемкин В.Л., Савкин Д.Е., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Ходжер Т.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широтов В.В., Шукуров К.А. Концентрация тропосферного озона над территорией России в 2021 г. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 7. С. 559–571.

Анисимов О.А., Зимов А.С., Володин Е.М., Лавров С.А. Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 131–143.

Аржанов М.М., Малахова В.В., Мохов И.И., Парфенова М.Р. Устойчивость реликтовых метангидратов при климатических изменениях в голоцене // CITES '2019. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. 2019. Сборник тезисов. Томск, 2019. С. 128–131.

Бабушкин П.А., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К. Спектральный анализ водного аэрозоля методом лазерно-индуцированного пробоя фемтосекундными импульсами // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 5. С. 356–360.

Баженов О.Е. Озоновые аномалии зимой-весной 2019–2020 гг. в Арктике и над севером Евразии по данным спутниковых (AURA MLS/OMI) наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 7. С. 524–529.

Баженов О.Е., Ельников А.В., Сысоев Е.М. Общее содержание озона над Томском в период 1994–2017 гг.: результаты статистического анализа // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 7. С. 556–561.

Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Скляднева Т.К. Исследование взаимосвязи ультрафиолетовой радиации с метеорологическими факторами и замутнением атмосферы. Часть I. Роль общего содержания озона, облачности и аэрозольной оптической толщи // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 8. С. 649–655.

Беликович М.В., Рыскин В.Г., Куликов М.Ю., Красильников А.А., Швецов А.А., Фейгин А.М. Микроволновые наблюдения атмосферного озона над Нижним Новгородом зимой 2017–2018 гг. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 3. С. 210–227.

Береснев С.А., Васильева М.С. Гипотеза о вулканогенной саже и возможности ее наблюдательного подтверждения // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 6. С. 463–470.

Бикташ Л.З. Влияние потока полной солнечной радиации на климат Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 3. С. 393–399.

Варгин П.Н., Никифорова И.П., Звягинцев А.М. Изменчивость Антарктической озоновой аномалии в 2011–2018 гг. // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 20–34.

Варгин П.Н., Калинникова И.А., Кострыкин С.В., Володин Е.М. Влияние аномалий температуры поверхности экваториальной и северной частей Тихого океана на стратосферу над Арктикой по расчетам климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 5–16.

Васильев Е.С., Волков Н.Д., Карпов Г.В., Морозов И.И., Особенности масс-спектрометрического анализа токсичных хлоруксусных кислот и пиридина// Химическая безопасность. 2019. Т. 3. № 9. С. 78–88.

Васильев Е.С., Карпов Г.В., Волков Н.Д., Морозов И.И., Савилов С.В. Общность процессов гидратации хлоруксусных кислот // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 3. С. 17–22.

Васильев Е.С., Волков Н.Д., Карпов Г.В., Морозов И.И., Нигматулин Д.Р., Сайгина Е.А., Савилов С.А., Уманский С.Я., Бутковская Н.Я. Определение константы скорости реакции бензола с атомарным фтором методом конкурирующих реакций // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 10. С. 30–35.

Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю., Ерёмина И.Д., Блудушкина Л.Б. Вариации значений ^{18}O и водорастворимых солей в осадках Москвы в 2014–2018 гг. // Вестник Московского университета. Серия География. 2021. № 2. С. 35–43.

Верес А.И., Екайкин А.А. Липенков В.Я., Туркев А.В., Ходжер Т.В. Первые данные о климатической изменчивости в районе ст. Восток (Центральная Антарктида) за последние 2000 лет по результатам

изучения снежно-фирнового керна // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. С. 482–500.

Власов Д.В., Еремина И.Д. Влияние параметров дождей на интенсивность вымывания из атмосферы потенциально токсичных элементов в Москве // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 25–27 ноября 2020 г. Иркутск: Издательство ИГУ, 2020. С. 380–388.

Володин Е.М. Механизм естественных колебаний климата в Арктике и Северной Атлантике по данным климатической модели ИВМ РАН // CITES '2019. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. 2019. Сборник тезисов. Томск, 2019. С. 39–41.

Володин Е.М. Равновесная чувствительность моделей климата к увеличению концентрации CO_2 в атмосфере при различных методах учета облачности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 139–145.

Володин Е.М. Вероятные изменения климата в XXI веке на территории России по данным модели климата INM-CM5-0 // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 5–13.

Володин Е.М., Грицун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 3. С. 255–266.

Габис И.П. Квазидвухлетние осцилляции зонального ветра в экваториальной стратосфере и их влияние на межгодовые изменения мощности озоновой дыры в Антарктике // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 5–15.

Гинзбург А.С., Александров Г.А., Чернокульский А.В. Климатические критерии необходимости превентивной адаптации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 58. № 6. С. 626–637.

Гинзбург А.С., Докукин С.А. Влияние теплового загрязнения атмосферы на климат города (оценки с помощью модели COSMO-CLM) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 53–66.

Голицын Г.С., Васильев А.А. Изменение климата и его влияние на частоту экстремальных гидрометеорологических явлений // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 9–12.

Головко В.В., Зуева Г.А., Киселева Т.И. Кластерный состав пыльцы анемофильных растений, поступающих в атмосферу // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35 № 6. С. 480–485.

Головушкин Н.А., Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Нахаев М.И., Козлов В.С., Beekmann M. Анализ содержания и эволюция коричневого углерода в дымах сибирских лесных пожаровпо данным AERONET // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 1. С. 68–74.

Голубков Г.В., Бычков В.Л., Готовцев В.О., Адамсон С.О., Дьяков Ю.А., Родионов И.Д., Голубков М.Г. Свечение тяжелых пылевых частиц при землетрясении // Химическая физика. 2020. Т. 39. № 4. С. 51–55.

Горбаренко Е.В. Радиационный климат Москвы // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 36–49.

Горбаренко Е.В. Экстремумы и основные тенденции в многолетней изменчивости радиационных параметров атмосферы в города Москвы // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. № 6. С. 90–103.

Горчаков Г.И., Доценко О.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Гущин Р.А., Горчакова И.А., Мирсаитов С.Ф., Пономарева Т.Я. Пыльная мгла на северо-китайской равнине // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 12. С. 948–955.

Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гущин Р.А., Доценко О.И., Бунтов Д.В. Вертикальное распределение алевритовых и песчаных частиц в ветро-песчаном потоке над опустыненной территорией // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 555–564.

Груздев А.Н. Учет автокорреляции в задаче линейной регрессии на примере анализа содержания NO_2 в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 73–82.

Груздев А.Н., Елохов А.С. Изменение общего содержания и распределения NO_2по результатам 30-летних измерений на научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 99–111.

Губанова Д.П., Чхетиани О.Г., Кудерина Т.М., Иорданский М.А., Максименков Л.О., Артамонова М.С. Многолетняя изменчивость состава приземного аэрозоля в опустыненных и засушливых зонах юга России // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6. С. 456–464.

Дворецкая И.В., Крученицкий Г.М., Статников К.А. Анализ распределения аномалий и долговременной изменчивости общего содержания озона по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2020. № 6. С. 19–24.

Дембелов М. Г., Башкуев Ю. Б., Оценка определения влагосодержания тропосферы по данным GPS-наблюдений, радиозондирования и измерений радиометром водяного пара // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 5. С. 25–31.

Дементьева С.О., Ильин Н.В., Шаталина М.В., Мареев Е.А. Прогноз конвективных явлений и его верификация по данным наблюдения атмосферного электричества // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 150–157.

Денисов Е.Т., Денисова Т.Г. Реакционная способность полярных соединений в реакциях с атомным кислородом // Кинетика и катализ. 2019. Т. 60. № 1. С. 3–10.

Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO_2 и CH_4 с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // Доклады Российской академии наук. 2019. Т. 488. № 1. С. 74–80.

Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Модельные оценки вклада в глобальные изменения климата в XXI в. естественных и антропогенных эмиссий

CO_2 и CH_4 в атмосферу с территории России, Китая, Канады и США // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 18–32.

Еланский Н.Ф., Голицын Г.С., Крутцен П.Й., Беликов И.Б., Бреннинкмайер К.А.М., Скороход А.И. Наблюдение состава атмосферы над Россией: эксперименты ТРОЙКА // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 79–98.

Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Пономарев Н.А., Захарова П.В., Качко М.Д., Поляков Т.И. Пространственно-временные вариации содержания загрязняющих примесей в воздушном бассейне Москвы и их эмиссии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 92–108.

Ерёмина И.Д. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденция его многолетних изменений // Вестн. Московского университета. Серия 5. География. 2019. № 3. С. 3–10.

Ермаков А.Н., Алоян А.Е., Арутюнян В.О. Источники сульфатов в карбонатных частицах аэрозоля в городской атмосфере на примере Иркутска // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 52–61.

Ермаков А.Н., Алоян А.Е., Арутюнян В.О. О сезонной изменчивости, фазового состояния и массовой концентрации аэрозоля в фоновой и городской атмосфере Бельгии (2001–2003 гг.) // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 66–76.

Завгородняя Ю.А., Поповичева О.Б., Кобелев О.В., Стародымова Д.П., Шевченко В.П., Касимов Н.С. Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове Ямало-Ненецкого автономного округа как индикаторы влияния источников техногенных эмиссий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. С. 261–279.

Захаров В.В., Зюзин В.В., Корсунский Б.Л., Ларикова Т.С., Термическое разложение 1-[2,2-бис(метокси-NNO-азокси)этил]-пиразола // Химическая физика. 2022. Т. 41 № 12. С. 7–12.

Зеленов В.В., Апарина Е.В. Вопрос о механизме захвата O_3 на покрытие из метановой сажи // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 5. С. 55–67.

Зеленов В.В., Апарина Е.В., Козловский В.И., Сулименков И.В., Карданский Д.А., Носырев А.Е. Твердые продукты захвата NO_3 на покрытие из метановой сажи // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 1. С. 86–92.

Зинченко А.В., Привалов В.И., Ивахов В.М., Парамонова Н.Н. Модельно-эмпирический расчет потоков метана и диоксида углерода из почв торфяных болот // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 59–77.

Зуев В.В., Зуева Н.Е., Куценогий П.К., Савельева Е.С. Вулканогенный нанодисперсный углеродный аэрозоль в стратосфере // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. Т. 22. С. 83–88.

Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С., Шелехов А.П., Шелехова Е.А. О роли вулканогенного разогрева тропической стратосферы в формировании очагов тепла в арктических регионах // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 1. С. 69–74.

Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С. Температурные и озоновые аномалии как индикаторы вулканогенной сажи в стратосфере // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 8. С. 698–704.

Иванова А.Р. Мировой опыт наукакастинга грозовой деятельности // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 71–83.

Ионов Д.В., Поберовский А.В. Изменчивость содержания оксидов азота в приземном слое атмосферы по данным наблюдений в Петергофе // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 73–81.

Калашник М.В. Волновые предвестники от движущихся осциллирующих источников // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 6. С. 617–625.

Карпов А.В., Горчаков Г.И., Гущин Р.А., Доценко О.И. Вертикальные турбулентные потоки пылевого аэрозоля // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 565–574.

Кашкин В.Б., Одинцов Р.В., Рублева Т.В. Влияние ядерного взрыва на озон // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 3. С. 212–216.

Клюева М.В., Школьник Ю.Л., Рудакова Ю.Л., Павлова Т.В., Катцов В.М. Летний туризм в контексте будущих изменений климата России: оценки по большому ансамблю условных прогнозов высокого разрешения // Метеорология и гидрология. 2020. № 6. С. 47–59.

Ковалев Н.А., Нетягин О.В., Сажин И.В. Опыт искусственного вызывания осадков в целях тушения лесных пожаров в Сибири и на Дальнем Востоке в 2017—2021 гг.: предварительные результаты и вопросы оценки эффективности // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 71–77.

Козлов С.Н., Жестков В.Е. Влияние состава газовой смеси на определение вероятности гетерогенной реакции H, O и N на кварце // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 11. С. 15–23.

Коленникова М.А., Варгин П.Н., Гущина Д.Ю. Влияние Эль-Ниньо на стратосферу Арктики по данным моделей CMP5 и реанализа // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 5–23.

Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.А., Черепанова Л.А., Банин М.В., Репнев А.И., Куколева А.А. Численные глобальные модели ионосферы, озоносферы, температурного режима и циркуляции для высот 0–130 км. Результаты и перспективы // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 5–16.

Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Лукин А.Н., Игнатьев А.Н., Соломонов С.В. Особенности изменения содержания озона в верхней стратосфере над Москвой в холодные полугодия 2014–2015 и 2015–2016 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 2. С. 227–235.

Крупнов А.А., Погосбекян М.Ю. Анализ экспериментальных данных взаимодействия COC с образованием CO_2 // Кинетика и катализ. 2019. Т. 60. № 2. С. 1811–1922.

Куликова И.А., Круглов Е.Н., Хан В.Н. Оценка практической предсказуемости блокирующих антициклонов с использованием современных гидродина-

мических моделей // Метеорология и гидрология. 2022. № 1. С. 5–23.

Куминов А.А., Юшков В.А., Гвоздев Ю.Н., Штырков О.В., Лыков А.Д., Балугин Н.В. Метеорологическое ракетное зондирование для атмосферных исследований и мониторинга геофизической обстановки // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 21–31.

Курятникова Н.А., Малыгина Н.С., Митрофанова Е.Ю., Атмосферное поступление и разнообразие биоаэрозолей в зимних осадках на юге Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35 № 1. С. 19–24.

Ларин И.К. Время жизни нечетного кислорода // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 10. С. 65–71.

Ларин И.К. Российские исследования в области атмосферной химии в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 66–78.

Ларин И.К. О теории цепных процессов озоносферы // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 5. С. 81–87.

Ларин И.К. Влияние глобального потепления на скорость разрушения стратосферного озона в каталитических циклах // Химическая физика. 2020. Т. 39. № 4. С. 44–50.

Ларин И.К. О разрушении атмосферного озона в O_x, HO_x, NO_x, ClO_x, BrO_x и IO_x каталитических циклах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 195–202.

Ларин И.К. О разрушении стратосферного озона в каталитических циклах в Северном полушарии в конце XX века// Химическая физика. 2020. Т. 39. № 3. С. 85–92.

Ларин И.К. О разрушении озона в мезосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 2. С. 172–181.

Ларин И.К., Спасский А.И., Трофимова Е.М. Измерение константы скорости реакции атомов хлора с CH_3Br в диапазоне температур 298–358 K методом резонансной флюоресценции атомов хлора // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 4. С. 16–22.

Ларин И.К., Белякова Т.И., Мессинева Н.А., Спасский А.И., Трофимова Е.М. Процессы УФ-фотолиза смеси $C_2H_2F_2BR_2$ с кислородом // Химическая физика. 2020. Т. 39. № 12. С. 3–9.

Ларин И.К., Спасский А.И., Трофимова Е.М. Кинетика гетерогенной реакции сероводорода с оксидом йода в диапазоне температур 273–368 K // Химическая физика. 2020. Т. 39. № 10. С. 29–34.

Ларин И.К., Алоян А.Е., Ермаков А.Н. Влияние сульфатного аэрозоля в нижней стратосферы на время жизни нечетного кислорода // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 3. С. 80–85.

Ларин И.К., Алоян А.Е., Ермаков А.Н. Влияние частиц слоя Юнге на скорость разрушения озона в нижней стратосфере // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 5. С. 86–90.

Ларин И.К., Белякова Т.И., Мессинева Н.А., Спасский А.И., Трофимова Е.М. Гетерогенная реакция диметилсульфида с оксидом йода в области температур 291–365 K // Кинетика и катализ. 2021. Т. 62. № 2. С. 187–197.

Ларин И.К., Белякова Т.И., Мессинева Н.А., Спасский А.И., Трофимова Е.М. Фотолиз смеси $C_2H_2F_2BR_2$ с O_2 в диапазоне давлений кислорода 1–3.5 торр // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 10. С. 36–41.

Лысенко С.А., Ф. Логинов В.Ф., Зайко П.О. Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в белорусско-украинском Полесье // Метеорология и гидрология. 2022. № 1. С. 59–71.

Малкарова А.М. Развитие работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы в Гидрометслужбе России // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 5–10.

Мирошниченко Е.А., Конькова Ю.Н., Матюшин Ю.Н., Воробьёв А.Б., Иноземцев Я.О., Иноземцев А.В. Энергии перестройки циклических радикалов // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 12. С. 3–6.

Морозов И.И., Васильев Е.С., Волков Н.Д., Морозова О.С., Нигматулин Д.Р., Сыромятникова А.Г., Савилов С.В. Реакции бензил- и гидроксиэтил-радикалов с оксидом азота // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 10. С. 16–22.

Мохов И.И. Всероссийская конференция “Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования”, 26–28 ноября 2019 года. Москва. Сборник тезисов докладов. М.: Физматкнига, 2019. 180 с.

Мохов И.И. Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. С. 446–462.

Мохов И.И. Изменение частот фазовых переходов типов явлений Эль-Ниньо в последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 3–9.

Мохов И.И., Парфенова М.Р. Взаимосвязь площади снежного покрова в Северном полушарии по спутниковым данным с приповерхностной температурой // Метеорология и гидрология. 2022. № 2. С. 32–44.

Мохов И.И., Смирнов Д.А. Эмпирические оценки вклада парниковых газов и естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры для различных широт // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022а. Т. 503. № 1. С. 53–59.

Мохов И.И., Смирнов Д.А. Оценки вклада мод естественной изменчивости и парниковых газов в тренды приповерхностной температуры в Южном полушарии на основе данных наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022б. Т. 58. № 2. С. 149–159.

Мохов И.И., Тимажев А.В. Атмосферные блокирования и изменения повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2019а. № 6. С. 5–16.

Мохов И.И., Тимажев А.В. Интегральный индекс активности атмосферных блокирований в Северном полушарии в последнее десятилетие // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019б. Т. 58. № 6. С. 638–647.

Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. Модельные оценки глобальных и региональных изменений

климата в голоцене // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 27–32.

Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Денисов С.Н., Мохов И.И., Аржанов М.М., Тимажев А.В. Фазовый сдвиг между изменениями глобальной температуры и содержанием CO_2 в атмосфере при внешних эмиссиях парниковых газов в атмосферу // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 11–19.

Ненайденко В.Г. На пути к молекулярной сложности. Многокомпонентные реакции, включающие пять и более компонентов // Успехи химии. 2020. Т. 89. Вып. 11. С. 1274–1336.

Неробелов Г.М., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н., Имхасин Х.Х., Наземные спектроскопимеские измерения общего содержания аммиака в районе Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 6. С. 658–668.

Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М. Аномалии содержания озона над территорией России в зимне-весенний период 2015/16 г. // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 36–49.

Нусинов А.А., Казачевская Т.В., Катюшина В.В. Модель потоков далекого ультрафиолетового излучения Солнца // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 3. С. 284–290.

Панов Д.Ю., Сахарова Е.Ю. Применение данных радиолокационной съемки при составлении прогнозов урожайности зерновых культур в Новосибирской области // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 88–97.

Панченко М.В., Кабанов М.В., Пхалагов Ю.А., Белан Б.Д., Козлов В.С., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н., Полькин В.В., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Яушева Е.П., Аршинов М.Ю., Симоненков Д.В., Шмаргунов В.П., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Полькин В.В., Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М. Комплексное исследование тропосферного аэрозоля в ИОА СО РАН (этапы развития) // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 9. С. 703–716.

Пастухова А.С., Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю., Галин В.Я., Смышляев С.П. Численное моделирование изменения содержания озона, эритемной ультрафиолетовой радиации и УФ ресурсов над территорией Северной Евразии в XXI веке// Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 20–28.

Порфирьев Б.Н., Колпаков А.Ю., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Оценка и прогноз издержек газодобывающего сектора Ямало-Ненецкого автономного округа, связанных с последствиями деградации многолетнемерзлых грунтов // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 96–106.

Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Джола А.В., Ракитина А.В., Шилкина А.В., Кириллова Н.С., Казаков А.В. Долговременные тенденции общего содержания окиси углерода Московского мегаполиса // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021 Т. 57. № 1. С. 126–136.

Рогачев А.С. Механическая активация гетерогенных экзотермических реакций в порошковых смесях // Успехи химии. 2019. Т. 88. № 9. С. 875–900.

Рыжакова Н.К., Рогова Н.С., Покровская Е.А., Тайлашева К.А. Влияние природно-климатических условий на значение вертикального коэффициента турбулентной диффузии для длительных периодов наблюдения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 58. № 6. С. 648–657.

Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Козлов В.С., Круглинский И.А., Макаров В.И., Макштас А.П., Попова С.А., Радионов В.Ф., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И., Чанкина О.В., Чернов Д.Г. Результаты измерения физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре “Ледовая база “Мыс Баранов” в 2018 г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 421–429.

Семенов С.М. Парниковый эффект и современный климат // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 5–17.

Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Русина Е.Н. Результаты многолетних наблюдений за общим содержанием озона в Антарктиде и над акваториями Атлантического и Южного океанов // Метеорология и гидрология. 2020. № 3 С. 33–43.

Сирин А.А., Медведева М.А., Иткин В.Ю., Макаров Д.А., Коротков В.Н. Выявление торфяных пожаров для оценки эмиссии парниковых газов // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 33–45.

Скороход А.И., Ракитин В.С., Кириллова В.С. Влияние мер по сдерживанию пандемии COVID-19 и метеорологических условий на состав атмосферного воздуха в Москве в 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 36–46.

Смышляев С.П., Блакитная П.А., Моцаков М.А. Численное моделирование влияния физических и химических факторов на межгодовую изменчивость содержания озона в Антарктике // Метеорология и гидрология. 2020. № 3 С. 21–32.

Торжков И.О., Кушнер Е.А., Константинов А.В., Королева Т.С. Ефимов С.В., Школьник И.М. Оценка ожидаемых изменений климата на лесное хозяйство // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 40–49.

Трошичев О.А., Габис И.П., Криволуцкий А.А. Влияние космической погоды на земную атмосферу // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 2. С. 177–207.

Федотов В.Х., Кольцов Н.И. Кинетические автономные инварианты линейных химических реакций // Кинетика и катализ. 2019. Т. 60. № 6. С. 756–762.

Федченко Л.М., Шаповалов В.А., Шериева Л.М., Лесев В.Н. Численное моделирование влияния структуры поля ветра в атмосфере на макро- и микроструктурные характеристики конвективных облаков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 58. № 6. С. 669–680.

Филей А.А., Андреев А.И., Кучма М.О., Успенский А.Б. Применение искусственных нейронных сетей для определения общего содержания водяного пара в атмосфере по данным микроволнового радиомет-

ра МТВЗА-ГЯ со спутника “Метеор-М” № 2-2 // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 34–45.

Филиппов С.П., Ярославцев А.В. Водородная энергетика: перспективы развития и материалы // Успехи химии. 2021. Т. 90. Вып. 6. С. 627–643.

Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хаттатов В.У. Исследование химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019/20 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 70–83.

Чеснокова Т.Ю., Макарова М.В., Ченцов А.В., Воронина Ю.В., Захаров В.И., Рокотян Н.В., Langerock B. Определение содержания монооксида углерода в атмосфере из атмосферных спектров высокого разрешения // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 4. С. 257–265.

Чистякова Н.Ф., Журавлева Н.Н., Андреев О.В., Мартюшова А.И. Природный механизм трансформации формальдегида в атмосферном воздухе города Тюмень // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 76–85.

Чэнсюнь Ю., Чжицзянь Л., Бычков В.Л., Бычков Д.В., Голубков М.Г., Маслов Т.А., Родионов И.Д., Степанов И.Г., Уманский С.Я., Голубков Г.В. Распределение концентраций положительных и отрицательных ионов в тропосфере // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 10. С. 28–37.

Шаталина М.В., Мареев Е.А., Клименко В.В., Кутерин Ф.А., Николл К.А. Экспериментальное исследование суточных и сезонных вариаций атмосферного электрического поля // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 3. С. 205–210.

Шаталина М.В., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Характеристики опасных метеорологических явлений в Нижнем Новгороде по данным натурных наблюдений электрического поля // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 107–111.

Шаталина М.В., Клименко В.В., Мареев Н.А. О корреляции температуры слоистой облачности и напряженности и электрического поля // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 1. С. 77–81.

Шилин А.Г., Шилина А.С., Андреев Ю.В., Иванов В.Н., Панов В.Н., Пузов Ю.А., Савченко А.В. Исследование режимов адсорбции молекулярного йода и возможности модификации льдообразующих характеристик аэрозолей силикатной и алюмосиликатной природы соединениями йода // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 86–93.

Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ярынич Ю.И. Оценка конвективной неустойчивости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5 // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6. С. 429–435.

Russian Research in the Field of Atmospheric Chemistry in 2019–2022

I. K. Larin*

Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics at Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, 38 Leninsky Ave., bld. 2, Moscow, 119334 Russia

**e-mail: iklarin@narod.ru*

A brief overview of the work of Russian scientists in the field of atmospheric chemistry in 20190–2022 is presented, including work on the chemistry of the troposphere, the chemistry of the ozone layer, work on the study of heterophase processes, as well as work on the chemical aspects of climate and its change. The review was prepared in the Commission on Atmospheric Chemistry of the Section of Meteorology and Atmospheric Sciences of the National Geophysical Committee.

Keywords: chemical processes, heterophase processes, troposphere, stratosphere, climate

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2023, том 59, № 7, с. 1021–1033

УДК 551.594

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В 2019–2022 гг.

© 2023 г. Е. А. Мареев[a], *, В. Н. Стасенко[b], М. В. Шаталина[a]

[a]Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

[b]Институт прикладной геофизики, ул. Ростокинская, 9, Москва, 129128 Россия

*e-mail: aries@ipfran.ru

Поступила в редакцию 02.09.2023 г.
После доработки 08.11.2023 г.
Принята к публикации 15.11.2023 г.

Обзор содержит систематизированное описание наиболее значимых результатов работ российских ученых в области исследований атмосферного электричества в 2019–2022 гг. Он является частью Национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам, подготовленного для Международной ассоциации по метеорологии и атмосферным наукам (IAMAS). Отчет был рассмотрен и одобрен на XXVIII Генеральной ассамблее Международного геодезического и геофизического союза (IUGG)[1]. К обзору прилагается список основных публикаций российских ученых за 2019–2022 гг., посвященных исследованиям атмосферного электричества.

Ключевые слова: атмосферное электричество, физика молнии, разряды в атмосфере, глобальная электрическая цепь, грозопеленгация, прогноз

DOI: 10.31857/S0002351523070088, **EDN:** EBWMAO

ВВЕДЕНИЕ

В данной статье представлен обзор результатов российских исследований в области атмосферного электричества в 2019–2022 гг. Атмосферное электричество было и остается одним из фундаментальных разделов физики атмосферы, привлекающих пристальное внимание в течение многих лет. В последние годы продолжали активно развиваться исследования электричества хорошей погоды, процессов электризации облаков и формирования их электрической структуры, взаимосвязи грозовой активности с другими опасными метеорологическими явлениями. Экспериментальные исследования по изучению атмосферного электричества, проводимые в российских научных центрах, ежегодно получают большой объем данных об электрическом состоянии атмосферы, вносят существенный вклад в улучшение теоретических и численных моделей различных атмосферных электрических процессов, а также моделей глобальной электрической цепи. Особое внимание привлекают экспериментальные и теоретические исследования физики молний, как, в том числе с точки зрения важных практических приложений. Получают развитие исследования высокоэнергичных процессов, такие как вспышки рентгеновского и гамма-излучения во время грозовых событий. Большое внимание уделяется наблюдениям за грозовыми явлениями с помощью региональных и глобальных систем грозопеленгации, всестороннему анализу данных глобальных систем. Более подробно основные результаты по каждому из направлений приведены в соответствующих разделах настоящей статьи.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ХОРОШЕЙ ПОГОДЫ

В 2019–2022 годах продолжались исследования электрического поля хорошей погоды в различных регионах России, в частности, большое внимание уделялось суточным и сезонным вариациям электрического поля. Экспериментально исследованы различные эффекты, влияющие на поведение атмосферного электрического поля хорошей погоды в городских и сельских условиях. Известно, что многолетние наземные наблюдения за вариациями параметров атмосферного электричества являются важной экспериментальной основой современных исследований глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Изменения электрического поля в приземном слое атмосферы в течение суток обусловлены как глобальны-

[1] Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences: 2019–2022: for the XXXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Berlin, Germany, July 11–20, 2023) / Ed.: I.I. Mokhov, A.A. Krivolutsky. Moscow: MAKS Press, 2023. 440 p. ISBN 978-5-317-07017-5. https://doi.org/10.29003/m3460.978-5-317-07017-5

ми, так и локальными факторами. В работе [Аджиев и др., 2019] представлены результаты анализа связи суточного хода характеристик солнечного ветра (скорости солнечного ветра, концентрации ионов) и напряженности электрического поля в приземной атмосфере. Для измерения суточных вариаций напряженности электрического поля атмосферы в данной работе использовался аппаратно-программный комплекс для измерения и передачи на центральный сервер значений напряженности электрического поля атмосферы на пике Чегет. Мониторинг в высокогорных регионах характерен почти полным отсутствием антропогенной составляющей в формировании электрического поля атмосферы. В [Аджиев и др., 2020, 2021] представлены данные многолетних наблюдений элементов атмосферного электричества в Приэльбрусье. Установлена глобальная репрезентативность данных измерений электрического поля. Пункты наблюдения в высокогорной зоне рекомендованы для мониторинга электрического поля атмосферы на глобальном и региональном уровнях. Показано [Аджиев и др., 2021], что локальные вариации электрического поля вызваны пространственным зарядом вблизи земной поверхности вследствие электродного эффекта и влиянием турбулентного перемешивания. Получены и исследованы аналитические решения уравнения для полного электрического тока в области формирования электродного эффекта.

С целью разделения глобальных и локальных эффектов атмосферного электричества был выполнен анализ данных измерений атмосферного электрического поля хорошей погоды в Нижнем Новгороде [Шаталина и др., 2019] и Томске [Нагорский и др., 2022]. Показано, что суточные вариации градиента потенциала электрического поля характеризуются колебаниями континентального типа с двойным максимумом и минимумом. Изучены суточные вариации атмосферного электрического поля хорошей погоды для разных сезонов года и дней недели (рабочих и выходных) в городских условиях. Наибольшие значения амплитуды поля достигаются в зимний период. Максимум напряженности поля в первой половине суток характерен для городской среды и показывает, что локальные эффекты, связанные с наличием в воздухе аэрозольных частиц, заметно влияют на формирование суточной вариации, особенно летом [Шаталина и др., 2019]. Получены оценки связи суточной и сезонной изменчивости градиента потенциала в Томске с изменчивостью некоторых геофизических величин. Показано, что доля вклада различных предикторов в изменчивость градиента потенциала, а также направление их корреляции меняется в течение суток [Нагорский и др., 2022; Pustovalov et al., 2022].

Большое внимание уделено влиянию атмосферных аэрозолей на электрическое поле атмосферы, измеряемое на земной поверхности. В [Зекореев, 2022] исследовано влияние выбросов при открытых горных работах. Показано, что интенсивное пылеобразование и связанная с ним электризация аэрозольных частиц различного размера приводят к накоплению избыточного объемного заряда в приземном слое атмосферы, что способствует формированию повышенных значений электрического поля вблизи земной поверхности. Среднее значение напряженности электрического поля составило 600–700 В/м, что существенно превышает результаты измерений, проведенных на таких высотах другими исследователями в невозмущенных погодных условиях.

В последние годы активизировались теоретические исследования электрического поля атмосферы в приземном слое. Построена математическая модель механизма генерации суточных вариаций электрического поля в турбулентном приземном слое. Изучена зависимость фазового сдвига колебаний поверхностного электрического поля относительно вариаций полного тока в атмосфере от степени турбулентного перемешивания [Зайнетдинов и др., 2020]. С учетом электродного эффекта развита электродинамическая модель нестационарного турбулентно-конвективного приземного слоя. Показано, что в безаэрозольной атмосфере время установления стационарного состояния в “приэлектродном” слое составляет около 5 мин для классического слоя (характерная высота около 4–5 м), и примерно 15 мин (высота порядка около 10 м) для турбулентного слоя. В случае сильного турбулентного перемешивания масштаб распределения электрических величин увеличивается до сотен метров [Svidelsky et al., 2020].

В работах [Anisimov et al., 2021; Анисимов и др., 2022, 2022а] рассмотрены в квазистационарном приближении с учетом турбулентности электрические процессы в пограничном слое атмосферы. Результаты теоретического моделирования сравниваются с различными натурными данными по измерению электрического поля и тока. В [Anisimov et al., 2021] трехмерная модель используется для изучения пространственно-временных статистических особенностей вариаций атмосферного электрического поля и пространственного заряда. Модель представляет собой комбинацию крупновихревого моделирования, дополненную подсеточной кинематической моделью для скаляра и трехмерным уравнением Пуассона для электрического потенциала. Показано, что взаимная корреляция электрического поля в пространственно разнесенных точках, расположенных на одной прямой вблизи земной поверхности, уменьшается с увеличением расстояния с характерным масштабом в несколько десятков метров и имеет зависимость от угла между этой линией и направлением ветра. Среднее крупномасштабное горизонтальное электриче-

ское поле, определяемое через положение и амплитуду экстремумов потенциала на одной и той же высоте, зависит от высоты немонотонно, имея максимальное значение около 5 В/м. Обнаружено, что масштабные показатели структурных функций для вариаций электрического поля существенно больше, чем для вариаций пространственного заряда.

Турбулентные электрические процессы в пограничном слое атмосферы и их измерение горизонтальной пассивной кольцевой антенной, выполняющей роль коллектора атмосферного электрического тока, исследованы в электростатическом и квазистационарном приближениях [Анисимов и др., 2022, 2022а]. На основе вихреразрешающего моделирования рассчитаны вариации электрических переменных, оценены пространственные корреляционные функции и спектральная плотность флуктуаций компонент плотности атмосферного тока, а также реакция тока в коллекторе на локальные турбулентные возмущения атмосферного тока, плотность тока проводимости и мгновенное изменение глобальной разности потенциалов между ионосферой и земной поверхностью. По результатам моделирования получена оценка отношения плотности полного вертикального атмосферного электрического тока и плотности тока проводимости на высоте установки антенны, которую можно использовать для экстраполяции результатов наземных измерений внутри и за пределами пограничного слоя [Анисимов и др., 2022]. Аналитически и численно исследованы характеристики горизонтальной кольцевой пассивной антенны, используемой в качестве коллектора для долговременных обсерваторских наблюдений плотности атмосферного электрического тока. В электростатическом приближении определены пространственные распределения потенциала и электрического поля в зависимости от геометрических характеристик антенны, находящейся в однородном электрическом поле атмосферы, и рассчитаны параметры движения атмосферных ионов в ее окрестности. Установлена зависимость времени осаждения атмосферных ионов с заданной подвижностью на коллектор в зависимости от прицельного параметра и начальной высоты, определяемой этим параметром. Результаты прямых наблюдений плотности атмосферного электрического тока коллектором сравниваются с результатами синхронных наблюдений напряженности атмосферного электрического поля и электропроводности в приземном слое [Анисимов и др., 2022а].

В [Шулейкин и Щукин, 2022] предложен метод бесконтактного мониторинга геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов с земной поверхности путем анализа результатов измерения электрического поля в приземном слое. Такие геологические неоднородности характеризуются чрезмерным выбросом почвенного радона в атмосферу, что является основной причиной ионизации воздуха в приземном слое. Это приводит к обратному электродному эффекту, что выявляется при анализе данных электрического поля. Аномалии градиента потенциала электрического поля наблюдались в приземном воздухе перед землетрясениями в различных регионах мира. Причиной таких аномалий, вероятно, является ионизация воздуха радоном. Влияние приземного электрического поля как предвестника землетрясений оценивалось по данным непрерывных наблюдений электрического поля на Камчатке в 1997–2002 гг. [Smirnov, 2019].

2. ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

Концепция глобальной электрической цепи (ГЭЦ) объединяет все электрические процессы, происходящие в атмосфере. В последние годы интерес к изучению ГЭЦ возрастает, при этом большое внимание уделяется численному моделированию динамики ГЭЦ и ее связи с другими глобальными процессами, прежде всего с различными климатическими модами и космической погодой и климатом.

В работах [Slyunyaev et al., 2019; Кутерин и Слюняев, 2020] исследованы некоторые аспекты численных моделей ГЭЦ и ее составляющих элементов. В [Кутерин и Слюняев, 2020] обсуждается последовательное включение источников ГЭЦ ионосферной и магнитосферной природы в ее распределенные численные модели. Показано, что наиболее естественным подходом к такому включению является введение в граничные условия на внешней границе модельной атмосферы соответствующего возмущения потенциала, заданного с точностью до неизвестной константы. Работа [Harrison R. Giles et al., 2020] посвящена влиянию протяженных слоистых облаков на вертикальное распределение заряда в ГЭЦ. Расчеты и измерения показывают, что заряд на верхней границе такого облака обычно положителен, суммарный заряд внутренней части облака также положителен, а заряд на нижней границе облака отрицателен, при этом плотность заряда верхней границы больше, но имеет ту же величину ($\sim$нКл м$^{-2}$), что и плотность заряда нижней границы облака. В глобальном масштабе общий положительный заряд, находящийся в слоистых облаках, составляет примерно 10^5 Кл, что в сочетании с положительным зарядом столба атмосферы над облаком (вплоть до высот ионосферы) уравновешивает общий отрицательный заряд на поверхности Земли в регионах с хорошей погодой. В работе [Slyunyaev et al., 2019] анализируется и обсуждается описание генераторов ГЭЦ различных типов в непрерывных численных моделях. Поскольку формальное включение облаков, работающих в режиме источника напряжения, в современные

трехмерные модели ГЭЦ оказывается труднореализуемым, предложены два альтернативных подхода, предполагающие замену генераторов – источников напряжения эквивалентными генераторами – источниками тока.

В работе [Морозов, 2022] сделан обзор работ по влиянию электрогенераторов, действующих на высотах ионосферы и магнитосферы, на электрические поля в приземном слое. На основе решения теоретических задач даны оценки этих полей как для стационарного, так и для нестационарного случая, сигнал, передаваемый вниз к земной поверхности, зависит от частоты. Наиболее эффективно ионосферные электрические поля проникают в поверхность при низких частотах (квазистационарный случай). При этом высокочастотные поля проникают в поверхностный слой с эффективностью 1% от величины квазистационарных полей. Исследования [Ильин и др., 2019; Ilin et al., 2020; Slyunyaev et al., 2019a, 2021, 2021a] посвящены изучению вариаций ГЭЦ и их связи с климатом и геофизическими параметрами. Суточная вариация ГЭЦ моделируется с использованием модели Weather Research and Forecasting model (WRF) путем оценки вклада столбцов сетки в ионосферный потенциал (ИП) [Ильин и др., 2019]. Модельный суточный ход ИП демонстрирует устойчивые сезонные тенденции. Выбранная параметризация ИП и подход к моделированию позволяют получить хорошее согласие с экспериментально наблюдаемыми значениями.

Вклады различных регионов суши и океана в суточный ход глобальной электрической цепи исследованы в работах [Ilin et al., 2020] и [Slyunyaev et al., 2019a]. Модель предсказывает, что вклады от регионов суши имеют максимумы примерно в 14:00–18:00 по местному времени, тогда как вклады от океанов имеют максимумы примерно в 02:00–06:00 по местному времени, а различные регионы океана показывают почти одинаковый относительный суточный ход. Примечательно, что вклады районов океана с большим количеством островов имеют максимумы как в 14:00–18:00, так и в 02:00–06:00 местного времени.

В работах [Slyunyaev et al., 2021, 2021a] исследовано влияние на ГЭЦ моды Эль-Ниньо–Южное колебание (ЭНЮК), которую можно количественно охарактеризовать температурами поверхности океана (ТПО) в регионе Ниньо 3.4. В работе [Slyunyaev et al., 2021] выявлено и детально изучено влияние ЭНЮК на региональные вклады в ГЭЦ. Моделирование показывает, что вклады в ГЭЦ со стороны суши и океана откликаются на цикл ЭНЮК противоположным образом: вклад океана положительно коррелирует с ТПО Ниньо 3.4, в основном из-за увеличения конвекции над Тихим океаном, а вклад суши демонстрирует отрицательную корреляцию с ЭНЮК из-за уменьшения конвекции над Юго-Восточной Азией и Южной Америкой. Наблюдаемые корреляции статистически значимы и хорошо заметны в десятилетнем временном масштабе; в то же время вклады в ИП за отдельные годы не всегда четко отражают соответствующие аномалии ТПО Ниньо 3.4. В работе [Slyunyaev et al., 2021a] проанализировано влияние ЭНЮК на суточную вариацию ГЭЦ. Анализ результатов моделирования показывает, что аномалии ТПО Ниньо 3.4, характеризующие фазу ЭНЮК, и аномалии относительного ИП положительно коррелируют в 09:00–15:00 UTC и отрицательно коррелируют в 18:00–23:00 UTC. Измерения электрического поля на станции “Восток” в Антарктиде показывают, что ЭНЮК действительно оказывает статистически значимое влияние на ГЭЦ, как и предсказывает моделирование. Анализ десяти зимних сезонов (октябрь–февраль 2006–2016 гг.) показывает, что форма кривой суточной вариации электрического поля на поверхности Земли существенно различается в годы Эль-Ниньо и Ла-Нинья, причем особенно выраженное отклонение наблюдается во время супер Эль-Ниньо 2015/2016 гг. Моделирование позволяет объяснить это и показывает, что наблюдаемые закономерности являются результатом изменений в глобальном распределении электрически активных облаков над Тихим океаном, Юго-Восточной Азией и Южной Америкой во время событий ЭНЮК.

В работе [Елисеев и др., 2019] авторы разработали модификацию схемы Прайса–Ринда для вычисления частоты молний, которая может быть использована при расчетах с большим шагом по времени и пространству. Продемонстрировано, что результаты расчетов характеристик молниевой активности с модифицированной схемой, проводимых с использованием климатической модели ИФА РАН, существенно лучше согласуются со спутниковыми данными по молниевой активности. Глобальное моделирование также показало, что чувствительность частоты молний к изменению приповерхностной температуры атмосферы составляет 10%/K.

Также в последние годы проводятся экспериментальные работы по изучению отдельных элементов ГЭЦ. В работе [Slyunyaev et al., 2021a] с помощью привязного аэростата, оснащенного инструментальной платформой, было исследовано высотное распределение основных величин в нижней атмосферной области ГЭЦ, объемной активности радона и концентрации аэрозольных частиц. Высотное зондирование охватывало примерно 0.5 км нижних слоев атмосферы и сопровождалось одновременными наземными измерениями. Этот метод разнесенных наблюдений позволил глубже, чем это было возможно ранее, проанализировать пространственные и временные изменения электрических величин в пограничном слое атмосферы (АПС). Оценки показы-

вают значительный вклад АПС в ГЭЦ, что необходимо учитывать при ее рассмотрении. Развитие сети мониторинга атмосферного электричества стимулирует исследования связи ГЭЦ с условиями окружающей среды [Anisimov et al., 2022].

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАКАХ

Теоретические и экспериментальные исследования электрических процессов в облаках традиционно являются очень важной частью изучения атмосферного электричества. К этому разделу можно отнести широкий круг задач, включая теоретические и экспериментальные исследования возникновения и эволюции конвективных систем, моделирование и прогноз развития грозовых облаков, поиск корреляций между регистрируемыми метеорологическими данными и наблюдаемой грозовой активностью, а также влияние микрофизики облаков на наблюдаемые электрические параметры.

Прогноз грозовых явлений с использованием численных мезомасштабных моделей является одним из важнейших практических приложений моделирования электрических процессов в облаках. Описание региональной системы краткосрочного прогнозирования опасных конвективных явлений на основе модели WRF-ARW представлено в [Дементьева и др., 2020]. Предложен метод прогнозирования опасных конвективных явлений, основанный на анализе расчетных пространственных и временных распределений радиолокационной отражаемости явления и их сравнении с характерными параметрами. Метод был проверен с использованием данных сети грозопеленгации World Wide Lightning Location Network (WWLLN) и полевых измерений квазистатического электрического поля.

Ряд работ посвящен численному моделированию конвективного облака в различных регионах. В [Lesev et al., 2021] представлена трехмерная модель конвективного облака с учетом электрических процессов. Исследованы новые аспекты механизма формирования электрического заряда и поля в облаках. В [Морозов, 2019] исследованы расчеты электрических полей, генерируемых точечными и пространственно протяженными источниками заряда, с учетом скачков электропроводности на границе “плоскопараллельная облачность–свободная атмосфера” как в стационарном, так и в нестационарном случаях. Получены асимптотические формулы, позволяющие рассчитать напряженность электрического поля в свободной атмосфере в зависимости от расстояния до источника.

Для выявления возможных связей между скоростью электризации и интенсивностью турбулентности в облаках были проведены одновременные измерения яркостной температуры и короткопериодных флуктуаций электрического поля. Для указанных типов событий впервые получены подробные статистические характеристики флуктуаций яркостной температуры и короткопериодических флуктуаций электрического поля. Показано, что измеренные спектральные плотности яркостной температуры атмосферы и флуктуаций электрического поля достаточно хорошо соответствуют в рассматриваемом диапазоне частот результатам представленного теоретического рассмотрения [Klimenko et al., 2022]. Разработана и реализована микроволновая диагностика разрядов, возникающих в искусственном облаке заряженных капель воды, имитирующем среду грозовых облаков. Затухание зондирующего СВЧ-излучения с длиной волны 8 мм при прохождении через искусственное электрифицированное облако измерялось с временным разрешением 10 нс. С помощью созданной микроволновой диагностики были изучены временные характеристики внутриоблачных разрядов [Богатов и др., 2022].

В [Смирнов и Сон, 2022] анализируются некоторые процессы атмосферного электричества, связанные с микрокаплями воды в атмосфере. Показано, что микрокапли приобретают заряд в процессе роста, а потеря заряда микрокаплями, происходящая на нижней границе кучевого облака, приводит к развитию пробоя в виде молнии и сопровождается быстрым (в течение нескольких минут) агрегирование микрокапель кучевого облака в капли дождя.

На основе данных MRL-5 и LS8000 о развитии 100 облаков разработана схема физико-статистической эмпирической модели развития грозовой активности в конвективных облаках. Модель может быть использована для проверки численных моделей и разработки новых методов прогнозирования и диагностики опасных погодных явлений, связанных с конвективными облаками [Михайловский и др., 2019]. Изучено развитие облака суперъячейки, существовавшего более 20 часов 19 августа 2015 г. Анализ доплеровских и поляриметрических характеристик позволил выделить область сильной конвергенции, характерной для смерча [Абшаев и др., 2020, 2022]. Рассчитана эволюция конвективного облака на Северо–Западе России (Санкт-Петербург). Получено пространственно-временное распределение основных характеристик облака, осадков и связанных с ними опасных погодных явлений в зависимости от заданного параметра. Результаты модельных расчетов для случая высоких начальных тепловых потоков удовлетворительно согласуются с данными натурных измерений [Веремей и др., 2022].

Исследованы данные о динамике напряженности электрического поля и пространственного заряда сильных гроз в разных регионах мира. Данные получены по результатам моделирования с использованием численной трехмерной неста-

ционарной модели конвективного облака, разработанной в ГГО им. А.И. Воейкова. Воспроизводится многослойная зарядовая структура облака с тонкими слоями "экранирующих" зарядов, представлена соответствующая структура напряженности электрического поля для каждой из стадий электризации [Михайловский и др., 2021]. Проведено сравнение характеристик грозовых облаков в Индии, Китае и в двух регионах России. Статистические характеристики облаков были сведены в таблицу на основе радиолокационных сканирований и сопоставлены с наблюдениями за молниями. Грозовые облака в Индии существенно отличаются от тех, что наблюдаются в других регионах. Проанализированы взаимосвязи между частотой ударов молний, объемом переохлажденных облаков и интенсивностью осадков. В большинстве случаев наблюдалась высокая корреляция между частотой ударов молнии и переохлажденным объемом [Синькевич и др., 2020; Sin'kevich et al., 2021].

4. ФИЗИКА МОЛНИЙ

Исследования физики молний в России, как экспериментальные, так и теоретические, дали существенный вклад в понимание физики развития грозовых разрядов. Расчетная модель сильноточного импульсного дугового разряда в воздухе предложена в [Bocharov et al., 2022]. В целом это 2D-модель, учитывающая газодинамику разрядного канала, реальную термодинамику воздуха в широком диапазоне давлений и температур, электродинамику разряда, включая пинч-эффект, и излучение. 1D-версия модели протестирована и проверена на основе нескольких численных и экспериментальных работ, опубликованных в последнее время. Сделан вывод, что разряды слабого и умеренного тока удовлетворительно описываются моделью. Затем модель была применена для моделирования электрического разряда в воздухе при токах 1–250 кА и характерных временах нарастания 13–25 мкс, и проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными. Продемонстрировано, что большинство характеристик разряда хорошо описывается теорией.

В серии работ [Булатов и др., 2020; Iudin et al., 2021; Syssoev and Iudin, 2021; Syssoev et al., 2020, 2021, 2022] разработана численная модель развития грозового разряда. Морфология и электрические параметры рассчитанного разрядного "дерева" зарождающегося модельного лидера молнии согласуются с современными данными о развитии грозового разряда. Численная модель с физическим временем и шагом сетки 3 м применяется для изучения развития (включая ступенчатость и ветвление) ступенчатого лидера отрицательной молнии. Асимметрия между положительными и отрицательными стримерами учитывается за счет использования зависящих от полярности порогов поля инициирования и распространения. Подтверждено, что ступенчатый характер негативного лидера обусловлен именно этой асимметрией [Syssoev et al., 2020]. Маломасштабная транспортная модель формирования электроразрядного дерева и анализ ее реализации для характерного случая грозовых условий, представленная в [Булатов и др., 2020; Syssoev and Iudin, 2021], можно охарактеризовать следующим инновационными особенностями: отсутствие привязки к пространственной сетке, высокое пространственно-временное разрешение, учет асимметрии развития положительных и отрицательных стримеров и временной эволюции параметров разрядного канала. Используемый в данной работе критерий стримерно-лидерного перехода сформулирован в терминах температуры канала и основан на известном механизме ионизационно-перегревной неустойчивости, универсальном для искрового разряда.

Рассмотрен шумовой кинетический переход в двухкомпонентной среде, где взаимодействующие компоненты имеют контрастные времена жизни и коэффициенты диффузии. Рассматриваемая система изучается методами направленной перколяции [Iudin et al., 2021]. Показано, что диэлектрическая прочность воздуха заметно падает по сравнению с ее обычным значением. Результаты исследования могут быть важны для решения проблем инициирования и распространения грозовых разрядов, голубых стартеров и голубых джетов [Syssoev et al., 2021].

В серии работ [Базелян, 2019, 2021; Базелян и Попов, 2020; Базелян и Александров, 2022] подробно рассмотрен процесс формирования нисходящей молнии и ориентация канала нисходящего лидера, необходимые для решения прикладных задач в области молниезащиты. Показано, что необходимо учитывать механизм формирования биполярного лидера в электрическом поле грозовой тучи, при котором грозовую ячейку нельзя рассматривать как проводящий заряженный электрод. Предложен алгоритм расчета высоты ориентации молнии, заряда на единицу длины ее канала и радиуса сжатия на основе значения тока основной ступени. Предложена структура натурных исследований молнии, позволяющая накопить необходимую статистику ее токов за обозримый период при реальных материальных затратах. Доказана необходимость изучения механизма конкурирующего развития встречных разрядов на заземлителях и предложен их метод. Установлена специфика развития встречного разряда с заземленного электрода в области отрицательного ступенчатого грозового лидера. Получены аналитические выражения для оценки условий запуска встречного разряда непосредственно в стримерной форме, минуя стадию

нестационарной ультракороны, а также для определения амплитуды управляющего импульса, способного возбудить восходящую молнию с электрода стримера на данной высоте в атмосфере, свободной от заряда ультракороны. Экспериментально доказано, что последствиями воздействия таких импульсов является задержка формирования контрлидера, а не его стимуляция. Установлена причина снижения эффективности громоотводов раннего стримерного инициирования по сравнению с традиционными такой же высоты.

В 2019–2022 гг. были продолжены и развиты лабораторные исследования инициации и формирования молниевого лидерного разряда. В стримерных коронах отрицательных лидеров длинных лабораторных искр наблюдались локализованные плазменные образования, получившие название “пространственные лидеры”. В [Куцык и Бабич, 2021] обсуждается механизм формирования локальных плазменных образований, способных инициировать объемный лидер. Проанализировано формирование положительного стримера вблизи заряженных игольчатых ледяных гидрометеоров во внешнем электрическом поле, имитирующем поле грозового облака. Представлены результаты численного моделирования стримерного разряда с учетом поляризации диэлектрика и проводимости льда. Требуемые для этого значения заряда находятся в диапазоне значений, измеренных в осадках [Бабич и Бочков, 2019]. Представлена упрощенная и наглядная электротехническая модель усиления электрического поля перед распространяющимся газоразрядным плазменным каналом. Критикуется теория, развитая некоторое время назад Яковленко, доказывающая, что смещение электрического поля за счет поляризации плазмы за фронтом плоского канала достаточно для усиления поля перед фронтом. В качестве аргумента в пользу этого мнения показано на основе разработанной электротехнической модели, что для значительного усиления поля, как давно известно, площадь поперечного сечения канала должна быть значительно меньше площади газоразрядного промежутка. Обсуждается поляризационное самоускорение электронов [Babich, 2020]. Стримерная зона положительного лидера в сквозной фазе длинных искр экспериментально исследовалась двумя методами: анализом изображений стримерной зоны, полученных с помощью высокоскоростной кадрирующей камеры с усилением изображения, и микроволнового зондирования, примененного к длинным искрам. Оба метода основаны на предположении о постоянстве электрического поля и подобии всех стримеров внутри стримерной зоны. Результаты данного исследования в целом согласуются с этим предположением [Bogatov et al., 2020].

В работе [Kostinskiy et al., 2022], направленной на выявление генезиса необычных плазменных образований (НПП) в искусственных облаках заряженных капель воды, были представлены НПП, возникшие внутри исходного коронного стримерного всплеска положительной полярности, генерируемого из заземленной плоскости, до образования (или при отсутствии) связанного с ним канала горячего лидера. Возникновение НПП может быть необходимым компонентом процесса возникновения грозы. НПП могут возникать внутри первоначального стримерного всплеска короны, до развития (или при отсутствии) горячего лидерного канала. НПП содержат сегменты горячих каналов, которые формируются, возможно, из-за термоионизационной неустойчивости, на временном масштабе 1 мкс или менее и возникают вблизи границы облака, где электрическое поле максимальное.

5. ВЫСОТНЫЕ РАЗРЯДЫ

“Транзиентные” световые явления (transient luminous events, TLE), такие как спрайты, голубые джеты и эльфы, интенсивно изучались в течение последних трех десятилетий, и теперь многое известно об их свойствах. Исследование этих высотных разрядов российскими учеными продолжается достаточно активно. Проводятся спутниковые наблюдения, лабораторное и численное моделирование. Глобальное распределение спрайтов на основе новой параметризации и WWLLN изучается в [Evtushenko et al., 2022]. Показано, что в среднем по всему миру может быть инициировано 870 ночных спрайтов за сутки, из них 41.4% над сушей и 58.6% над океаном. Исследована годовая динамика количества спрайтов над сушей и океаном, выявлена максимальная численность событий в августе и минимум в январе и феврале.

В [Surkov and Hayakawa, 2020] рассмотрены различные типы TLE, в том числе недавно обнаруженные танцующие спрайты, гномы, ультрафиолетовые атмосферные вспышки и другие эффекты. Обсуждаются инициация спрайтов, видимая эволюция, структура стримеров и их связь с внутриоблачным процессом,с привлечением некоторых аналитических результатов и простых физических моделей TLE. Авторы акцентируют внимание на свойствах ультрафиолетовых вспышек в мезосфере, которые наблюдались на борту российских микроспутников “Университетский-Татьяна” и “Вернов”. Такую разновидность оптической вспышки авторы называют транзиентным атмосферным событием, которое отличается от TLE оптической энергией, продолжительностью и другими параметрами.

Лабораторные исследования высотных разрядов – достаточно сложная и нетривиальная задача. Важнейшим фактором, определяющим дина-

мику и структуру высотных разрядов, является наличие значительной разницы атмосферного давления по их длине. В Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород) создана экспериментальная установка “Спрайт”. Это позволяет сформировать протяженный градиент концентрации нейтрального газа и зажечь в нем крупномасштабный электрический разряд. В работе [Евтушенко и др., 2020] представлены результаты лабораторных экспериментов, моделирующих некоторые свойства высотных разрядов, прежде всего спрайтов и гигантских джетов. Показано сходство лабораторных и натурных разрядов, обозначены физические проблемы и возможные пути их решения методами ограниченного лабораторного моделирования.

В работе [Тарасенко и др., 2022] изучено влияние материала электродов (алюминий и нержавеющая сталь) при формировании мини-джетов на цвет импульсно-периодического диффузного разряда в воздухе, азоте и аргоне. Показано, что цвет плазмы разряда в области мини-джета соответствует цвету высотных атмосферных разрядов (красные спрайты и синие джеты) и отличается от цвета диффузных разрядов в воздухе и азоте при том же давлении.

6. ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Исследование высокоэнергичных явлений в атмосфере Земли – молодая и быстро развивающаяся отрасль физики атмосферы, тесно связанная с изучением внутриоблачных и высотных разрядов. Явления возникновения потоков энергичных элементарных частиц в грозовых облаках делятся на два класса, взаимосвязь которых остается дискуссионным вопросом: гамма-вспышки земного происхождения (terrestrial gamma-ray flashes, TGF) и приземные грозы, увеличение потока энергичных частиц (thunderstorm ground enhancements, TGE). Лавины релятивистских убегающих электронов (relativistic runaway electron avalanches, RREA), возникающие в грозовых крупномасштабных электрических полях, являются одним из источников атмосферного гамма-излучения. Релятивистская обратная связь – это генерация RREA позитронами или обратным рассеянием гамма-лучей ранее произведенных RREA. В сильных электрических полях релятивистская обратная связь может сделать RREA самоподдерживающимися, что гипотетически может приводить к появлению TGF. В работе [Stadnichuk and Svechnikova, 2022] представлен кинетический подход к изучению позитронной релятивистской обратной связи, которая является преобладающей для непосредственно наблюдаемых условий внутри гроз. Выведен критерий самоподдерживающегося образования RREA по позитронной обратной связи в грозах. Показано, что полученные условия самоподдерживающегося развития RREA не достигаются для параметров электрического поля, наблюдаемых в реальных грозовых облаках.

Изучение атмосферных явлений высоких энергий требует анализа данных о распределении облачных частиц и образуемой ими электрической структуры. В [Свечникова и др., 2020] сопоставлена информация о метеорологических условиях формирования высокоэнергичного излучения грозовых облаков, полученная из спутниковых наблюдений в инфракрасном и оптическом диапазонах. Путем сравнения данных наблюдений с результатами моделирования с использованием микрофизической параметризации для модели WRF разработана методика оценки параметров распределения заряда [Svechnikova et al., 2021].

В работе [Shepetov et al., 2021] авторы сообщают о результатах наблюдения вспышек жесткого излучения, сопровождавших грозовые разряды над горами Северного Тянь-Шаня. На высоте 3700 м были получены временные ряды интенсивности скорости счета, численные оценки абсолютного потока и энергетического распределения ускоренных электронов и гамма-лучей (20–2000) кэВ в пределах грозовых облаков и в непосредственной близости ($\lesssim$100 м) от места сброса. Представлены два различных типа событий радиационного излучения: относительно длительный рост интенсивности гамма-излучения с минутной длительностью (TGE), который предшествовал отрицательному изменению поля, и короткий субмиллисекундный радиационный всплеск, который сопровождался близким разрядом молнии в грозовой туче. Обнаружены также признаки генерации позитронов в грозовых облаках в момент гамма-излучения, а также модуляция скорости счета нейтронов в Тянь-Шаньском нейтронном мониторе, работавшем на расстоянии порядка (1.5–2) км от района молниевой активности.

Обзор современных наблюдений усиления нейтронного потока в грозовых облаках и во время гроз, связанного с фотоядерными реакциями за счет тормозного излучения высокоэнергичных лавин убегающих электронов, которые могут развиваться в грозовом электрическом поле, выполнен в [Бабич, 2019]. Отмечается сложность отбора грозовых нейтронов, связанная с тем, что детекторы находятся в смешанном поле различных излучений, включающих не только нейтроны, но и первичные электроны высоких энергий и их тормозное излучение. Особое внимание уделено обнаружению в грозовом облаке и на поверхности Земли во время грозы линии аннигиляции позитрона и электрона с энергией фотона 0.511 МэВ, и фотоядерному происхождению грозовых нейтронов. Обсуждаются последствия этого открытия.

7. ИНТЕГРИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРОЗ

Фактических данных о влиянии опасных погодных явлений (ливней, гроз и т. д.), крупномасштабных атмосферных циркуляций и о влиянии солнечно-земных связей на суточные и сезонные вариации атмосферного электрического поля в регионах все еще недостаточно для организации надежного штормового предупреждения. В последние годы в России продолжают развиваться системы сбора и анализа данных инструментального непрерывного мониторинга грозовой активности. Мониторинг грозовой активности помогает решить множество задач: защита объектов инфраструктуры, предупреждение об опасных явлениях, связанных с интенсивными осадками, изучение условий возникновения гроз и степени их влияния на деятельность человека, а также воздействия грозы на формирование околоземного космического пространства.

В работах [Михайлов и др., 2020; Смирнов и др., 2019] обсуждаются изменения приземного электрического поля и других геофизических параметров во время зимних гроз на Камчатке. Результаты исследования особенностей спектра электромагнитных сигналов, индуцируемых вблизи разрядов между искусственной грозовой ячейкой и землей, представлены в [Temnikov et al., 2022]. Экспериментально установлено, что параметры импульсного тока, а также интенсивность, форма, спектральные характеристики наведенных электромагнитных сигналов зависят от варианта формирования разряда из искусственной грозовой ячейки (восходящий разряд, нисходящий разряд или ответный разряд). Рассмотрена роль мощных стримерных разрядов на этапе формирования главной стадии в возникновении сверхвысокочастотного диапазона наведенных электромагнитных сигналов. Рассматривается возможность применения полученных результатов для улучшения работы грозопеленгационных сетей.

Представлены результаты работ, направленных на создание многопозиционной экспериментальной сети мониторинга грозовой активности [Готюр и др., 2022]. Приведены расчеты зон равной точности для вариантов реализации угломерного и разностно-диапазонного методов определения координат. Пассивные радиотехнические средства контроля штормовой активности в ОНЧ-диапазоне рассмотрены в работе [Kononov et al., 2019]. Проведен сравнительный анализ характеристик современных российских и зарубежных систем грозопеленгации, имеющих широкое практическое применение. Оценены возможности улучшения прецизионных и вероятностных характеристик локации сильноточных составляющих молний различных типов в ОНЧ диапазоне.

Анализу данных локальных и глобальных грозопеленгационных сетей посвящено большое количество работ. Сравнение характеристик многоточечных грозопеленгационных систем показало, что грозопеленгационные сети с базовыми расстояниями до 400 км обеспечивают эффективность регистрации вспышек молний более 90%, а отдельных грозовых разрядов – от 50 до 90% [Снегуров и Снегуров, 2019]. Показано, что грозопеленгационные сети с малыми базами имеют более высокие точностные и вероятностные характеристики по сравнению с большими базами. Применение грозопеленгационных сетей с разными дальностями, с эффективным, удобным в выборе места установки и надежными датчиками, аналогичными показателям в структуре Росгидромета, использование отечественных разработок как аппаратного, так и программного обеспечения позволяет решать задачи штормового предупреждения с точностью и вероятностными характеристиками обнаружения гроз на уровне зарубежных аналогов [Снегуров и Снегуров, 2019].

В статье [Аджиев и др., 2021] представлены результаты использования грозорегистратора LS 8000 для определения параметров грозовых разрядов положительной и отрицательной полярности на территории Северного Кавказа, ограниченной 47° с.ш., большая часть которой относится к горным регионам. Для данной территории получены средние значения амплитуды тока в каналах грозовых молний положительной и отрицательной полярности в зависимости от орографии и высоты местности над уровнем моря. Показано, что пиковые значения тока уменьшаются с увеличением высоты местности. Рассмотрена длительность нарастания тока грозового разряда до пикового значения, полученная с помощью грозорегистратора LS 8000.

Инструментальный непрерывный мониторинг грозовой активности в Якутии осуществляется с 2000-х гг. Наиболее продолжительные грозовые сезоны часто наблюдаются в южной части Якутии [Tarabukina and Kozlov, 2020]. В центральной части Якутии до 2015 г. наблюдалось небольшое увеличение продолжительности грозового сезона. Межгодовые изменения общего числа ударов молний показали периодические колебания (с периодом около трех лет) на всей территории исследований. Периоды высокой грозовой активности смещались в течение сезона от года к году, о чем свидетельствует ежемесячный ход числа ударов. В центральной части Якутии к 2015 г. соотношение грозовых ударов молний и соотношение отрицательных ударов облако-земля несколько снизилось. Получены оценки изменчивости параметров широтно-долготного распределения грозовых разрядов в десятилетнем масштабе [Тарабукина и др., 2021].

Проведен сравнительный анализ натурных данных по отражательной способности метеолокаторов и грозовой активности за конвективный

сезон май–сентябрь 2016 г. Оценена точность алгоритма обнаружения грозы, реализованного в радарах ДМРЛ-С. Предложен новый алгоритм, основанный на сумме положительных значений отражательной способности. С точки зрения точности и надежности алгоритм работает лучше, чем более сложные модели. Алгоритм может быть использован для обнаружения грозы по натурным или модельным данным об отражательной способности конвективной системы [Ильин и Кутерин, 2020].

Сравнение пространственной и временной изменчивости грозовой активности, связанных с лесными пожарами в ряде природно-географических зон Западной Сибири в 2016–2021 гг., выполнено в работе [Нечепуренко и др., 2022]. Исследование было основано на данных WWLLN и системы пожарной информации для управления ресурсами для теплого (апрель–октябрь) сезона. Выявлено, что области горячих точек и грозовой активности чаще всего совпадают в юго-западной части территории (близ Ханты-Мансийска и Тюмени), в горных районах (Кузнецкий Алатау, Алтай) и в северной части Казахстана. Выявленная связь молний и пожаров позволяет понять характеристики этого процесса в регионе, что будет полезно при прогнозировании потенциальной пожарной опасности в различных природных зонах. Плотность грозовых разрядов над территорией Западной Сибири, по данным WWLLN, характеризуется пространственной неоднородностью с выделением пяти основных центров. Грозовая активность за период 2016–2020 гг. на юге Западной Сибири наблюдалась с мая по сентябрь с максимумом разрядов в июле (38.3%) и минимумом в сентябре (2.5%). Получена статистически значимая связь между полями с критическими значениями индекса нестабильности K-индексом и центрами высокой плотности грозовых разрядов [Нечепуренко и др., 2022; Kharyutkina et al., 2022]. На основе данных WWLLN за 2007–2009 гг. были построены глобальные карты грозовой активности [Денисенко и Ляхов, 2021]. Ключевые особенности пространственного распределения и сезонных трендов, полученные наземными и спутниковыми методами, согласуются удовлетворительно.

Характеристики опасных метеорологических явлений в Нижнем Новгороде получены на основе натурных наблюдений электрического поля. В результате анализа экспериментальных данных по приему и регистрации квазистационарного электрического поля совместно с данными метеорологического радиолокатора была получена статистика грозовых явлений и проведена их классификация. Данные натурных наблюдений сравниваются с результатами численных расчетов на основе модели WRF [Шаталина и др., 2021]. Результаты наблюдений радиоизлучения грозовых облаков в широком диапазоне частот с высоким временным разрешением, выполненные в Верхнем Поволжье вблизи Нижнего Новгорода, сравниваются с данными мировых и региональных сетей грозолокации [Karashtin et al., 2021].

В [Ткачев и др., 2021] характеристики грозовых ячеек изучались методом кластерного анализа. За основу были взяты данные грозопеленгационной сети “Верея-МР”, накопленные за период с 2012 по 2018 год. Сравнивалось поведение гроз на всей территории Российской Федерации и на Байкальской природной территории. Установлено, что мощность гроз над Прибайкальем меньше. По результатам работы разработаны предложения для новой конфигурации грозопеленгационной сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2019–2022 гг. исследования атмосферного электричества в Российской Федерации продолжали активно развиваться. Выполнен широкий комплекс экспериментальных и теоретических исследований электричества хорошей погоды и влияния на него атмосферных ионов и аэрозолей. Проведены экспериментальные и теоретические исследования глобальной электрической цепи, в том числе с использованием климатических и химико-климатических моделей. Выполнен комплекс экспериментальных исследований в области физики молнии и молниезащиты. В ряде регионов России успешно продолжаются исследования климатологии атмосферных электрических явлений, региональных метеорологических особенностей гроз, совершенствования методов моделирования и прогноза грозовых явлений. Проведены многочисленные лабораторные эксперименты по исследованию особенностей развития молниевых разрядов и построены новые теоретические модели различных стадий молниевого разряда и высотных разрядов.

За последние 4 года были успешно проведены конференции, посвященные проблемам атмосферного электричества: VII Международная конференция по молниезащите (Санкт-Петербург, 2022), Четвертая и Пятая Всероссийские конференции “Глобальная электрическая цепь” (Борок, Ярославская области, 2019 и 2021), VIII Открытая Всероссийская конференция по атмосферному электричеству (23–27 сентября, г. Нальчик 2019). Российские ученые приняли участие в XVII Международной конференции по атмосферному электричеству (ICAE2022, Тель-Авив, Израиль, июнь 2022 г.), которая проводится раз в 4 года и является основным международным форумом по атмосферному электричеству, а также в 27-ой Генеральной Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики “IUGG 2019”, которая прошла г. Монреаль, Канада, с 8 по 18 июля 2019 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФРАН (проект №FFUF-2021-0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Михайловский Ю.П. и др. Исследование особенностей развития процессов электризации и градообразования в суперячейковом облаке дистационными радиофизическими средствами // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2020. № 596. С. 96–130.

Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Синькевич А.А. и др. Об особенностях развития суперячейкового конвективного облака в стадии максимальной грозовой активности (19 августа 2015 г., Северный Кавказ) // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 96–110.

Аджиев А.Х., Керефова З.М., Клово А.Г. и др. Анализ данных многолетних атмосферно-электрических наблюдений на территории северо-кавказского региона Труды Военно-Космической академии им. А.Ф.Можайского // 2020. № S674. С. 75–79.

Аджиев А.Х., Керефова З.М., Кузьмин В.А. Определение значений токов наземных молниевых разрядов на Северном Кавказе с использованием грозорегистратора LS8000 // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 531–543.

Аджиев А.Х., Клово А.Г., Кудринская Т.В. и др. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана 2021. Т. 57. № 4. С. 452–461.

Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Керефова З.М. и др. Влияние солнечного ветра на динамику электрического поля в приземном слое атмосферы // Известия ЮФУ. Технические Науки. 2019. № 5. С. 114–122.

Анисимов С.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А. и др. Измерения плотности атмосферного электрического тока горизонтальной кольцевой пассивной антенной в приземном слое: электростатическое приближение // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2022. Т. 65. № 10. С. 801–819.

Анисимов С.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А. и др. Измерения плотности атмосферного электрического тока горизонтальной кольцевой пассивной антенной в приземном слое: квазистационарное приближение // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2022. Т. 65. № 11. С. 893–913.

Бабич Л.П. Грозовые нейтроны // Успехи физических наук. 2019. Т. 189. № 10. С. 1044–1069.

Бабич Л.П., Бочков Е.И. Роль заряженных ледяных гидрометеоров в инициировании молнии // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2019. № 24-1. С. 198–207.

Базелян Э.М. Механизм ориентировки и параметры молнии в молниезащите // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 3. С. 274–286.

Базелян Э.М. Проблема управляющих воздействий на разряд молнии //Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 3. С. 267–276.

Базелян Э.М., Александров Н.Л. Электрическое поле в положительном стримере в длинных воздушных промежутках // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 7. С. 639–647.

Базелян Э.М., Попов Н.А. Ступенчатое развитие положительной длинной искры в воздухе // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 3. С. 237–250.

Богатов Н.А., Сысоев В.С., Сухаревский Д.И. и др. Микроволновая диагностика разрядов в искусственном облаке заряженных водяных капель // Журнал Технической Физики. 2022. № 3. С. 294–299.

Булатов А.А., Иудин Д.И., Сысоев А.А. Самоорганизующаяся транспортная модель искрового разряда в грозовом облаке // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 2. С. 135–154.

Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Торопова и др. Влияние термических неоднородностей подстилающей поверхности на образование и развитие конвективных облаков и связанных с ними опасных явлений погоды // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2022. № 606. С. 32–49.

Готюр И.А., Коровин Е.А., Чернышев С.В. и др. Экспериментальная сеть датчиков мониторинга грозовой активности // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2022. № S685. С. 66–74.

Дементьева С.О., Ильин Н.В., Шаталина М.В. и др. Прогноз конвективных явлений и его верификация по данным наблюдений атмосферного электричества // Изв. РАН. Физика Атмосферы и Океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 123–129.

Денисенко В.В., Ляхов А.Н. Сравнение наземных и спутниковых данных о пространственно-временном распределении грозовых разрядов при низкой солнечной активности // Солнечно-Земная Физика. 2021. Т. 7. № 4. С. 104–112.

Евтушенко А.А., Гущин М.Е., Коробков С.В. и др. Моделирование высотных разрядов на большой плазменной установке // Геомагнетизм и Аэрономия. 2020. Т. 60. № 3. С. 345–354.

Елисеев А.В., Плосков А.Н., Чернокульский А.В. и др. Связь частоты молний со статистическими характеристиками конвективной активности в атмосфере // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485. № 1. С. 76–82.

Зайнетдинов Б.Г., Клово А.Г., Кудринская Т.В. и др. Формирование суточных вариаций атмосферного электрического поля вблизи поверхности земли в различных метеорологических условиях // Труды Военно-Космической Академии им. А.Ф. Можайского. 2020. № S674. С. 176–180.

Зекореев Р.Х. Исследование состояния электрического поля атмосферы в районе карьера открытых горных разработок // Наука. Инновации. Технологии. 2022. № 3. С. 139–158.

Ильин Н.В., Кутерин Ф.А. Оценка точности распознавания гроз по данным доплеровского метеорологического локатора ДМРЛ-С // Метеорология и гидрология. 2020. № 9. С. 104–112.

Ильин Н.В., Слюняев Н.Н., Шаталина М.В. Моделирование сезонной динамики суточной вариации глобальной электрической цепи // Известия Российской Академии Наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 76–84.

Кутерин Ф.А., Слюняев Н.Н. Учет ионосферных генераторов в численной модели глобальной электрической цепи // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 6. С. 768–780.

Куцык И.М., Бабич Л.П. Нагрев локальной области ветвящегося стримера как начало объемного лидера и ступени отрицательного лидера // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 3. С. 237–243.

Михайлов Ю.М., Смирнов С.Э., Михайлова Г.А. и др. Тропические циклоны и возможные зимние грозы

на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 5. С. 655–671.

Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Синькевич А.А. и др. Физико-статистическая эмпирическая модель развития молниевой активности конвективных облаков // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 595. С. 83–105.

Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Веремей Н.Е. и др. Динамика электрической структуры кучево-дождевых облаков // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 5. С. 341–353.

Морозов В.Н. Взаимодействие облачных зарядовых структур с окружающей проводящей атмосферой с неоднородной электрической проводимостью // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 592. С. 23– 79.

Морозов В.Н. Влияние генераторов электрического поля, действующих в верхних слоях атмосферы на электричество приземного слоя // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2022. № 605. С. 58–91.

Нагорский П.М., Пустовалов К.Н., Смирнов С.В. Суточные и сезонные вариации невозмущенного электрического поля и их связь с изменчивостью геофизических величин на юге Западной Сибири // Труды Военно-Космической Академии им. А.Ф. Можайского. 2022. № S 685. С. 213–222.

Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н. и др. Грозовая активность над Западной Сибирью // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 123–134.

Свечникова Е.К., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Метеохарактеристика энергичных атмосферных явлений // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17. № 6(231). С. 791–802.

Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л. и др. Строение грозового облака со смерчем и зависимость частоты молний от его характеристик // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 9. С. 705–709.

Смирнов С.Э., Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А. . и др. Особенности зимних гроз на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 6. С. 742–749.

Смирнов Б.М., Сон Э.Е. Электрические процессы в атмосферном воздухе // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60. № 4. С. 589–624.

Снегуров А.В., Снегуров В.С. Сравнение характеристик многопунктовых грозопеленгационных систем // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 595. С. 22–62.

Тарабукина Л.Д., Козлов В.И., Иннокентьев Д.Е. Анализ 11-летней динамики пространственного распределения плотности молний в Северной Азии// Вестник КРАУНЦ. Физико-Математические Науки. 2021. № 1. С. 159–173.

Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г.и др. Моделирование цвета высотных атмосферных разрядов с помощью импульсно-периодического разряда в воздухе, азоте и аргоне // Оптика Атмосферы и Океан. 2022. Т. 35. № 4. С. 279–283.

Ткачев И.Д., Васильев Р.В., Белоусова Е.П. Кластерный анализ молниевых разрядов по данным грозопеленгационной сети "Верея-МР" // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 4. С. 91–98.

Шаталина М.В., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Характеристики опасных метеорологических явлений в Нижнем Новгороде по данным натурных наблюдений электрического поля //Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 107–111.

Шаталина М.В., Мареев Е.А., Клименко В.В. и др., Экспериментальное исследование суточных и сезонных вариаций атмосферного электрического поля // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 3. С. 205–210.

Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г. Использование элементов приземного атмосферного электричества в задачах прикладной геофизики // Труды Военно-Космической Академии им. А.Ф. Можайского. 2022. № S 685. С. 236–244.

Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V et al. Mid-latitude atmospheric boundary layer electricity: A study by using a tethered balloon platform // Atmospheric Research. 2021. V. 250. P. 105355.

Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V. et al. Small air ion statistics near the earth's surface //Atmospheric Research. 2022. V. 267. P. 105913.

Anisimov S.V., Galichenko S.V., Prokhorchuk A.A. et al. Statistics of variations in atmospheric electrical parameters based on a three-dimensional model and field observations // Atmosheric Research. 2021. V. 259. P. 105660.

Babich L.P. Electrotechnique Interpretation of the Electric Field Amplification in Front of the Plasma Channel // IEEE Transactions on Plasma Science. 2020. V. 48. № 12. P. 4089–4092.

Bocharov A.N., Mareev E.A., Popov N.A. Numerical simulation of high-current pulsed arc discharge in air // J. Physic D Applied Physics. 2022. V. 55. № 11. P. 115204.

Bogatov N.A., Kostinskiy A.Yu., Syssoev V.S. et al. Experimental Investigation of the Streamer Zone of Long-Spark Positive Leader Using High-Speed Photography and Microwave Probing // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125. № 11. P. e2019JD031826.

Evtushenko A., Ilin N., Svechnikova E. Parameterization and global distribution of sprites based on the WWLLN data // Atmospheric Research. 2022. V. 276. P. 106272.

Harrison R. Giles, Nicoll Keri A., Mareev Evgeny et al. Extensive layer clouds in the global electric circuit: their effects on vertical charge distribution and storage // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2020. V. 476. № 2238. P. 20190758.

Ilin N.V., Slyunyaev N.N., Mareev E.A. Toward a Realistic Representation of Global Electric Circuit Generators in Models of Atmospheric Dynamics // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125. № 6. P. e2019JD032130.

Iudin D.I., Iudin F.D., Syssoev A.A. et al. Noise-induced kinetic transition in two-component environment // J. Comput Appl Math. 2021. V. 388. P. 113268.

Karashtin A.N., Shlyugaev Y.V., Karashtina O.S. Cloud-to-ground lightning discharge indicator in the radio frequency emission of thunderclouds as observed in the Upper Volga region of Russia //Atmospheric Research. 2021. V. 256. P. 105559.

Kharyutkina E., Pustovalov K., Moraru E. et al. Analysis of Spatio-Temporal Variability of Lightning Activity and Wildfires in Western Siberia during 2016–2021 // Atmosphere. 2022. V. 13. № 5. P. 669.

Klimenko V.V., Lubyako L.V., Mareev E.A. et al. Ground-based measurements of microwave brightness temperature and electric field fluctuations for clouds with a dif-

ferent level of electrical activity // Atmospheric Research. 2022. V. 266. P. 105937.

Kononov I.I., Korovin E.A., Shchukin G.G. et al. Current state and prospects of development of passive radio engineering monitoring of storm activity // IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2019. V. 698. № 4. P. 044046.

Kostinskiy A.Yu., Bogatov N.A., Syssoev V.S. et al. Unusual Plasma Formations Produced by Positive Streamers Entering the Cloud of Negatively Charged Water Droplets // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2022. V. 127. № 21. P. e2021JD035821.

Lesev V.N., Shapovalov V.A., Ashabokov B.A. et al. 3D model of a convective cloud: the interaction of microphysical and electrical processes // JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 23. № 1. P. 1–18.

Pustovalov K., Nagorskiy P., Oglezneva M., Smirnov S. The electric field of the undisturbed atmosphere in the south of Western Siberia: a case study on Tomsk // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 614.

Shepetov A., Antonova V., Kalikulov O. et al. The prolonged gamma ray enhancement and the short radiation burst events observed in thunderstorms at Tien Shan //Atmospheric Research. 2021. V. 248. P. 105266.

Sin'kevich A., Boe B., Pawar S. et al. Investigation of Thundercloud Features in Different Regions // Remote Sensing. 2021. V. 13. № 16. P. 3216.

Slyunyaev N.N., Frank-Kamenetsky A.V., Ilin N.V. et al. Electric Field Measurements in the Antarctic Reveal Patterns Related to the El Niño – Southern Oscillation // Geophysical Research Letters. 2021. V. 48. № 21. P. e2021GL095389.

Slyunyaev N.N., Ilin N.V., Mareev E.A. et al. The global electric circuit land–ocean response to the El Niño – Southern Oscillation //Atmospheric Research. 2021. V. 260. P. 105626.

Slyunyaev N.N., Ilin N.V., Mareev E.A. Modeling Contributions of Continents and Oceans to the Diurnal Variation of the Global Electric Circuit // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. № 10. P. 5516–5525.

Slyunyaev N.N., Kalinin A.V., Mareev E.A. Thunderstorm generators operating as voltage sources in global electric circuit models // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestial Physics. 2019. V. 183. P. 99–109.

Smirnov S. Negative Anomalies of the Earth's Electric Field as Earthquake Precursors // Geosciences. 2019. V. 10. № 1. P. 10.

Stadnichuk E., Svechnikova E. The criterion for self-sustaining production of relativistic runaway electron avalanches by the positron feedback in thunderstorms // Atmospheric Research. 2022. V. 277. P. 106329.

Surkov V.V., Hayakawa M. Progress in the Study of Transient Luminous and Atmospheric Events: A Review // Survey in Geophysics. 2020. V. 41. № 5. P. 1101–1142.

Svechnikova E.K., Ilin N.V., Mareev E.A. et al. Characteristic Features of the Clouds Producing Thunderstorm Ground Enhancements // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2021. V. 126. P. e2019JD030895.

Svidelsky S.S., Litvinova V.S., Kupovykh G.V. et al. Formation of the atmospheric electrode layer structure // Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 2020. № 5. P. 130–141.

Syssoev A.A., Iudin D.I., Bulatov A.A. et al. Numerical Simulation of Stepping and Branching Processes in Negative Lightning Leaders // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125. № 7. P. e2019-JD031360.

Syssoev A.A., Iudin D.I. On a possible mechanism of space stem formation at the negative corona streamer burst periphery // Atmospheric Research. 2021. V. 259. P. 105685.

Syssoev A.A., Iudin D.I., Iudin F.D. et al. On the Problem of Critical Electric Field of Atmospheric Air // Atmosphere. 2021. V. 12. № 8. P. 1046.

Syssoev A.A., Iudin D.I., Iudin F.D. et al. Relay charge transport in thunderclouds and its role in lightning initiation // Scientific Report. 2022. V. 12. № 1. P. 7090.

Tarabukina L., Kozlov V. Seasonal Variability of Lightning Activity in Yakutia in 2009–2019 // Atmosphere. 2020. V. 11. № 9. P. 918.

Temnikov A., Belova O., Chernensky L. et al. Peculiarities of spectrum of electromagnetic signals induced by discharges from artificial thunderstorm cell // Journal of Electrostatic. 2022. V. 115. P. 103660.

Russian Studies of Atmospheric Electricity in 2019–2022

E. A. Mareev[1], *, V. N. Stasenko[2], and M. V. Shatalina[1]

[1]Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

[2]Institute of Applied Geophysics, st. Rostokinskaya, 9, Moscow, 129128 Russia

**e-mail: aries@ipfran.ru*

This review contains the most significant results of Russian studies in the field of atmospheric electricity in 2019–2022. It is part of the Russian National Report on Meteorology and Atmospheric Sciencesto the International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences (IAMAS). The report was presented and approved at the XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)[2].The review is followed by a list of the main published works on the studies of atmospheric electricity of Russian scientists in 2019–2022.

Keywords: atmospheric electricity, physics of lightning, atmospheric discharges, global electric circuit, lightning direction finding, forecast

[2] Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences: 2019–2022: for the XXXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Berlin, Germany, July 11–20, 2023) / Ed.: I.I. Mokhov, A.A. Krivolutsky. – Moscow: MAKS Press, 2023. – 440 p.ISBN 978-5-317-07017-5. https://doi.org/10.29003/m3460.978-5-317-07017-5

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2023, том 59, № 7, с. 1034–1060

УДК 551.510

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА И ЕГО ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. В. В. Андреев[a], О. Е. Баженов[b], Б. Д. Белан[b, *], П. Н. Варгин[c], А. Н. Груздев[d], Н. Ф. Еланский[d], Г. С. Жамсуева[e], А.С. Заяханов[e], С. Н. Котельников[f], И.Н. Кузнецова[g], М. Ю. Куликов[h], А. В. Невзоров[b], В. А. Оболкин[i], О.В. Постыляков[d], Е. В. Розанов[j], А. И. Скороход[d, l], А. А. Соломатникова[k], Е. В. Степанов[a, f], Ю. М. Тимофеев[j], А. М. Фейгин[h], Т. В. Ходжер[i]

[a]Российский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия
[b]Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Академика Зуева, 1, Томск, 634055 Россия
[c]Центральная аэрологическая обсерватория, ул. Первомайская,3, г. Долгопрудный, Московской обл., 141701 Россия
[d]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, Москва, 119017 Россия
[e]Институт физического материаловедения СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047 Россия
[f]Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991 Россия
[g]Гидрометецентр России, Большой Предтеченский пер., д. 11–13, Москва, 123242 Россия
[h]Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950 Россия
[i]Лимнологический институт СО РАН, ул. Улан-Баторская-3, Иркутск, 664033 Россия
[j]Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия
[k]Главная Геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева, 7, Санкт-Петербург, 194021 Россия
[l]Институт метеорологии и геофизики, Венский университет, Йозеф Холаубек Плац 2, Вена, 1090 Австрия
*e-mail: bbd@iao.ru

Поступила в редакцию 30.08.2023 г.
После доработки 07.11.2023 г.
Принята к публикации 15.11.2023 г.

Обзор содержит наиболее значимые результаты работ российских ученых в области исследований атмосферного озона, выполненных в 2019–2022 гг. В нем рассмотрены наблюдения за тропосферным озоном, его распределение и изменчивость на территории РФ, взаимосвязь с атмосферными параметрами, моделирование процессов образования и влияние на здоровье населения. Проанализировано также состояние стратосферного озона над Россией, моделирование процессов в озоносфере, разрабатываемые методы и приборы. Обзор является частью национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам, который был подготовлен для Международной ассоциации по метеорологии и атмосферным наукам (IAMAS). Отчет был рассмотрен и одобрен на XXVIII Генеральной Ассамблее международного геодезического и геофизического союза (IUGG).

Ключевые слова: атмосфера, озон, озоновый слой, состав атмосферы, малые газовые примеси, качество воздуха, химия озона, процессы переноса

DOI: 10.31857/S0002351523070027, **EDN:** TVUPBQ

1. ТРОПОСФЕРНЫЙ ОЗОН И ЕГО ПРЕДШЕСТВЕННИКИ

1.1. Наблюдения

Российская сеть мониторинга приземной концентрации озона (ПКО) и его предшественников частично изменилась за последние четыре года относительно предыдущего периода [Еланский, 2020].

По распределению обязанностей между ведомствами основную информацию о содержании озона в приземном слое воздуха должен предоставлять Росгидромет, который осуществляет мониторинг его состава более чем в 240 городах России. Однако, в выпускаемых им ежегодно обзорах данные об озоне отсутствуют [Обзор, 2021; Обзор, 2022], хотя сеть в последние годы модернизируется.

В двух самых больших мегаполисах России – Санкт Петербурге и Москве имеются сравнимые с зарубежными аналогами системы мониторинга приземного озона и других загрязняющих веществ. В г. Москва, с 2002 г. функционирует сеть экологического мониторинга Государственного природоохранного бюджетного учреждения (ГПБУ “Мосэкомониторинг”), специально упол-

номоченной организации по осуществлению государственного экологического мониторинга [https://mosecom.mos.ru/]. Регулярные измерения концентрации приземного озона проводятся на 17 станциях автоматического контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ежечасно и круглосуточно. В базу данных записываются средние значения за 20 минутный интервал времени. На сети станций Мосэкомониторинга в Москве измерения проводятся газоанализаторами трех видов работающих на основе метода ультрафиолетовой фотометрии: Casella Monitor ME 9810B, Environnement S.A. O3 42M, HORIBA Ltd APXA-370 мод. APOA-370 и 1 прибором OPSIS AB AR500, основанном на методе дифференциальной оптико-абсорбционной спектроскопии.Приборы внесены в Государственный реестр средств измерений и поверены в Государственной метрологической службе. В ежегодном докладе публикуются аналитические материалы о состоянии окружающей среды в городе Москве [https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/], а также частично включаются в ежеквартальные обзоры [Иванова и др., 2019а, 2019б, 2019в, 2019г, 2020а, 2020б, 2020в, 2020г, 2021а, 2021б, 2021в, 2021г, 2022а, 2022б, 2022в, 2022г;].

На остальной территории РФ наблюдения за озоном проводятся в инициативном порядке в основном научными или вузовскими организациями. Сложившийся неформальный консорциум таких станций начал публиковать обзоры концентрации озона в тропосфере над территорией России [Андреев и др., 2020, 2021, 2022].

Согласно опубликованным в обзорах сведениям измерения в рассматриваемый период продолжались на Кисловодской высокогорной научной станции (КВНС);в Государственном природном заповеднике “Карадагский”; на 300-метровой вышке в Обнинске (Калужская область, НПО “Тайфун”); на 3 станциях в Санкт Петербурге: “ОРТЕС-N” расположенной в районе Александро-Невской Лавры, “ОРТЕС-Р” – на Васильевском острове и “ОРТЕС-PR” базирующейся в Ленинградской области, на станции Громово Приозерского района; на станции мониторинга приземного озона, его предшественников и основных метеопараметров в Российском университете дружбы народов при участии Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН в пределах Третьего транспортного кольца по адресу улица Орджоникидзе, д. 3; на станции Вятские Поляны, расположенной на юге Кировской области; на TOR-станции и обсерватории Фоновая в Томской области; в г. Улан-Удэ. Затем к этим пунктам добавились станции Апатиты, Мурманская область; Боярский, Бурятия; в 2021 г. были восстановлены измерения на станции Листвянка, Иркутская область и Таруса, Калужская область, открыта станция ОПТЭК – Карелия.Станции оснащены сетевыми приборами, рекомендованными Глобальной службой атмосферы (GAW WMO). Все приборы регулярно калибровались.

Кроме стационарных измерений проводились экспедиционные исследования озона и компонентов озоновых циклов, выполненные на территории оз. Байкал и прилегающей территории [Zayakhanov et al., 2019; Ходжер и др., 2019; Tcydypov et al., 2020; Zhamsueva et al., 2021, 2022; Obolkin et al., 2022], а также в Арктическом регионе [Панкратова и др., 2020].

Вертикальное распределение в тропосфере измерялось с помощью самолета-лаборатории Ту-134 “Оптик”. Современный состав оборудования представлен в [Belan et al., 2022]. В течение всего рассматриваемого периода выполнялись ежемесячные полеты над южными районами Западной Сибири. В сентябре 2020 г. был проведен уникальный эксперимент по измерению состава воздуха, включая озон, над всеми морями Российского сектора Арктики. Еще один эксперимент был проведен в сентябре 2022 г. Он заключался в измерении состава воздуха в меридиональном направлении. Маршрут начался вблизи 56° с.ш. и закончился над акваторией Карского моря, где поддержку приводными измерениями осуществляло научно-исследовательское судно “Академик Мстислав Келдыш”.

Измерения вертикального распределения озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере осуществлялись в Томске с помощью лазерного локатора (лидара) дифференциального поглощения. Лидар работает на длинах волн 299–341 и 308–353 нм и позволяет измерять вертикальное распределение озона в слое 5–45 км [Матвиенко и др., 2019].

В настоящее время регулярные измерения содержания двуокиси азота со спутников проводятся с помощью инструментов TROPOMI, OMI, GOME-2. Достигаемое ими горизонтальное пространственное разрешение при глобальном покрытии составляет десятки километров, что достаточно для исследования стратосферного NO_2. Коллективом ИФА РАН в 2016–2017 гг. были проведены первые эксперименты по высокодетальному зондированию тропосферного NO_2. При этом использовались измерения спектрометра ГСА, который устанавливается на космические аппараты серии Ресурс-П. На основе произведенной съемки разработан первый на мировом уровне алгоритм определения интегрального содержания NO_2 в тропосфере с пространственным разрешением около 2.4 км на сетке 120 м при типичной для спутниковых методов погрешности измерения 10^{15} молек/см^2. Для валидации крупномасштабных структур, выявляемых на восстановленных полях распределения NO_2, выполнены сравнения с данными аппаратуры TROPOMI и OMI [Postylyakov et al., 2019a, 2019б, 2020a, 2020б] и

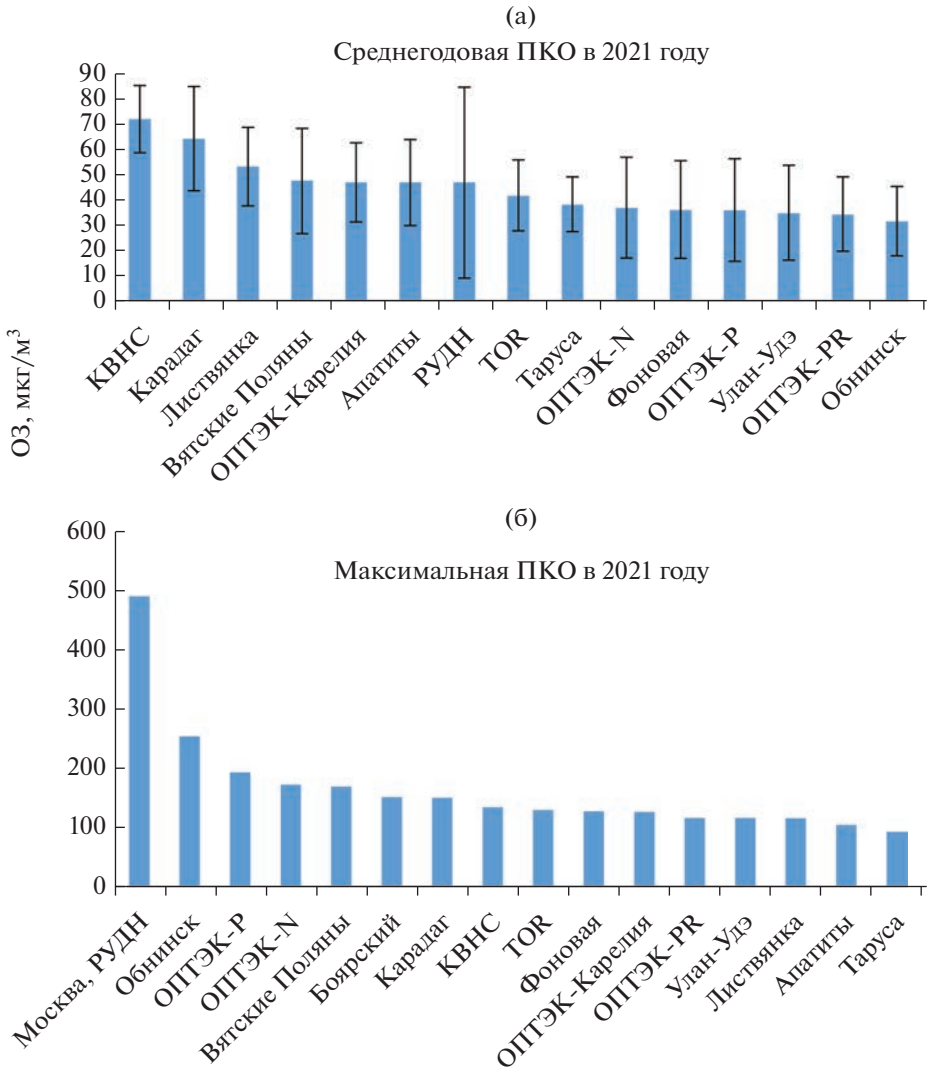

Рис. 1. Среднегодовая (а) и максимальная (б) концентрации озона в 2021 г. в России.

химико-транспортными моделями [Давыдова и др., 2021, Zakharova et al., 2021], которые подтвердили достоверность получаемых результатов.

1.2. Распределение и изменчивость

Данные, собранные в обзорах [Андреев и др., 2020, 2021, 2022], свидетельствуют о значительном разбросе в значениях концентрации озона в приземном слое воздуха в разных географических районах России. В качестве примера рассмотрим рисунок, на котором представлены среднегодовая и максимальная концентрации озона в 2021 г.

Из рис. 1а видно, что среднегодовые значения ПКО различаются между собой в 2.5 раза. Наибольшие значения фиксируются на высокогорной станции в Кисловодске, в Крыму и на берегу оз. Байкал, наименьшие – на городской станции в Обнинске.

Максимальные же концентрации (рис. 1б), наблюдаются в крупных городах, где имеются дополнительные выбросы газов-предшественников озона. При этом и порядок распределения станций изменяется.

Из рисунка также следует, что для среднегодовых значений отсутствует какая-либо долготная или широтная зависимость. Возможно, здесь нашло свое отражение действие местных источников предшественников озона и антропогенных факторов. А возможно многолетняя межгодовая изменчивость концентрации озона, когда среднегодовая концентрация может изменяться до 4 раз [Антохин и др., 2010]. Для ответа на этот вопрос требуется отдельное исследование.

В статье [Андреев и др., 2022] был выполнен подробный анализ причин высоких среднегодовых концентраций на КВНС. Для этого сделан траекторный анализ приходивших на КВНС воз-

душных масс. Методика расчета 7-суточных обратных траекторий описана в обзоре [Андреев и др., 2021]. Из-за пропусков в измерениях 2021 г. по техническим причинам, было смоделировано меньше траекторий, чем в 2020 г., – около 17000 траекторий. В отличие от городских условий, где падение концентрации озона до очень низких значений – признак сильного загрязнения окислами азота, на КВНС, расположенной в чистой местности и над пограничным слоем атмосферы, аномально низкие значения концентрации озона связаны не столько с дальним переносом, сколько с сухим осаждением на земной поверхности. Наиболее активно этот процесс идет в малоподвижной воздушной массе, когда контакт анализируемого воздуха с покрытой растительностью поверхностью наиболее продолжительный. Влияние переноса загрязнений с нижних уровней со стороны г. Кисловодска (высота над уровнем моря 750–850 м) в дни с благоприятными для развития горнодолинной циркуляции условиями, как было показано в [Сеник и др., 2005], приводит, наоборот, к увеличению дневного максимума озона, но очень незначительному. Кроме того, снижению концентрации озона способствуют туманы. В связи с этим из анализа были исключили обратные траектории для дней, характеризующихся высокой влажностью (более 80%) в конечной точке траектории на КВНС. Полученные результаты свидетельствуют, что экстремально высокие аномалии приземного озона на КВНС были связаны с переносом воздуха с южных направлений, экстремально низкие значения – с переносом воздуха с северо-западных направлений.

Анализ особенностей генерации озона в районе Карадага был выполнен в цикле работ [Шалыгина и др., 2019; Лапченко и др., 2022; Федорова и др., 2022; Борисов и др., 2022]. Установлено, что наиболее высокие ПКО наблюдаются в сухую жаркую погоду и имеют адвективную природу. Траекторный анализ показал, что весной движение воздушных масс происходит над акваторией Черного моря со стороны Украины, Турции, Румынии и Болгарии; в летние месяцы над территорией суши и в основном со стороны Украины и южных районов России. На режим ПКО также существенное влияние оказывает бризовая циркуляция, в ночное время – склоновые ветры.

В статье [Obolkin et al., 2022] анализируются особенности динамики озона в семи городах Байкальского региона (юго-восток Сибири). Выявлено, что существенные различия пространственно-временной изменчивости среднесуточных концентраций озона зависят от различных антропогенных нагрузок. В крупных городах с тяжелой промышленностью, расположенных в долине реки Ангары, концентрации озона были минимальными и мало изменялись в течение года: менее 5 мкг/м^3 в г. Ангарске и 20–30 мкг/м^3 в г. Иркутске. В населенных пунктах менее загрязненного района, долины реки Селенги, концентрации озона были значительно выше, а годовая изменчивость озона типична для Восточной Сибири: максимум весной (60–70 мкг/м^3), минимум осенью и зимой (от 10 до 30 мкг/м^3). Максимальные концентрации озона наблюдались в сельских условиях (ст. Листвянка, западное побережье Южного Байкала), до 80–100 мкг/м^3 в период весеннего максимума.

По результатам наблюдений на ЗНС ИФА РАН и в ИОА СО РАН (г. Томск) получены оценки временной изменчивости интегрального содержания формальдегида H_2CO в нижней тропосфере [Бручковский и др., 2019]. Показано существование статистически значимого положительного тренда интегрального содержания формальдегида в зависимости от температуры при $T > 5$°C в обоих пунктах. Наблюдаемый положительный тренд, по-видимому, связан с ростом биогенных выбросов изопрена и других неметановых ЛОС с ростом температуры, а также площадей лесных и торфяных пожаров. В воздушных массах, приходящих на ЗНС из Москвы, наблюдается устойчивое превышение ИС формальдегида в среднем на $0.4 \pm 0.1 \times 10^{16}$ мол/см^2 при положительных температурах и на $0.8 \pm 0.2 \times 10^{16}$ мол/см^2 при отрицательных температурах. Несмотря на значительную удаленность от Москвы, наблюдаемые на ЗНС значения в целом на 10% выше наблюдаемых в Томске.

1.3. Роль атмосферных процессов и явлений в изменении озона

В работе [Антохин др., 2020] исследовалась взаимосвязь между изменениями концентрации CH_4, CO, CO_2, NO, NO_2, O_3, SO_2 и счетной концентрации аэрозолей с диаметром частиц более 0.4 мкм и следующими метеовеличинами: температурой воздуха, атмосферным давлением, направлением и скоростью ветра, суммарной солнечной радиацией и ультрафиолетовой радиацией в диапазоне 295–320 нм, относительной влажностью и упругостью водяного пара. Для исследования использовались данные мониторинга состава воздуха (за период 1993–2018 гг.), осуществляемого на TOR-станции, расположенной в районе Томского Академгородка. На основе среднемесячных данных установлено, что у озона имеется значимая положительная или отрицательная корреляция почти со всеми анализируемыми метеовеличинами, за исключением направления ветра. Высокие значения отрицательной связи концентрации углекислого газа зафиксированы с солнечной и УФ-В радиацией, температурой воздуха и упругостью водяного пара. У диоксида азота, помимо положительной зависимости с атмосферным давлением,

фиксируется две значимых отрицательных связи с температурой воздуха и скоростью ветра. Атмосферный аэрозоль, также как и газовые примеси воздуха, имеет устойчивую положительную связь с давлением воздуха и отрицательные связи с солнечной радиаций, УФ-В радиацией, температурой воздуха и упругостью водяного пара. Не выявлено значимых связей метеовеличинс такими компонентами как SO_2, CO и NO.

Авторами [Котельников и др., 2019] исследовалась влияние водного аэрозоля на содержание озона в атмосферном воздухе. В натурных экспериментах резкое снижение содержания озона в приземной атмосфере наблюдалось во время кратковременного ливневого дождя в мегаполисе. Процесс разложения озона в присутствии воды был также изучен в лабораторных условиях в реакционной камере. Показано, что разложение озона в воздухе ускоряется при высоких значениях относительной влажности, а также в присутствии водного аэрозоля. Скорость деструкции озона зависит от размера аэрозоля – чем мельче частицы, тем выше скорость разложения. Это может свидетельствовать о существенной роли процессов гетерогенного связывания на поверхности аэрозоля. В [Аршинова и др., 2019] такой устойчивой взаимосвязи не обнаружено. Проведенное исследование показало, что при атмосферных осадках может происходить и рост и падение приземной концентрации озона независимо от их вида, интенсивности и района измерений. Наибольшие изменения связаны с фронтальными осадками и отражают “скачок” концентраций при смене воздушных масс. Во внутримассовых осадках знак изменения содержания озона зависит от периода суток, в который они выпадали. Если осадки наблюдаются на волне роста в суточном ходе O_3, то в большинстве случаев это приводит к увеличению содержания озона. Если осадки выпадают на волне уменьшения в суточном ходе, то регистрируется падение содержания озона.

В работе [Белан и др., 2019] исследовалась роль абсолютной влажности в образовании озона. Проведенный анализ выявил нейтральную зависимость при положительных температурах и неожиданно большую и знакопеременную изменчивость при отрицательных температуре. Абсолютная влажность оказывает отрицательные влияние на образование озона в приземном слое воздуха, вызывая уменьшение его концентрации при температурах 0...–30°C. При очень низких температурах (<ниже минус 30°C), эффект изменяется на положительный, со значительным увеличением вклада абсолютной влажности.

Работа [Khuriganova et al., 2022] посвящена исследованию роли солнечной радиации в фотохимической генерации приземного озона. Согласно представленным данным, она начинается утром при достижении интенсивности радиации более 200 Вт/м^2 и продолжается до тех же значений вечером, поэтому максимум озона обычно запаздывает по отношению к дневному максимуму солнечной радиации на несколько часов.

Авторами [Berezina et al., 2020, 2022] проанализированы вклад CO и 15 летучих органических соединений (ЛОС) в образование озона в приземном слое воздуха летом 2011–2013 гг. в Москве. Наибольшая концентрация O_3 наблюдалась в дневные периоды в антициклонических метеорологических условиях, при слабом перемешивании пограничного слоя атмосферы и высоких температурах (до 210 мкг/м^3). Напротив, содержание NO_x, CO и бензола уменьшалось с 8 утра до 17–18 часов вечера по местному времени. Высокая положительная корреляция дневного O_3 со вторичными ЛОС подтвердила важную роль фотохимического производства O_3 в Москве. Основным источником антропогенных ЛОС в Москве были местные выбросы от транспортных средств. Тем не менее, только около 5% наблюдаемого изопрена было отнесено к антропогенным, что свидетельствует о значительном вкладе биогенных источников в общие уровни прекурсоров озона. Была проведена оценка вклада различных антропогенных и биогенных ЛОС в измеренные значения озона. Озонообразующий потенциал (ОП) общего количества ЛОС составлял в среднем 31–67 мкг/м^3 и превышал 100 мкг/м^3 в 10% событий с высоким содержанием озона, достигая 136 мкг/м^3. Такие газы как ацетальдегид, 1,3-бутадиен и изопрен имеют самый высокий потенциал производства озона в Москве по сравнению с другими измеренными ЛОС.

В [Moiseenko et al., 2021] рассматриваются условия образования озона вблизи 300 м башни в Зотино. Высокие уровни O_3 и NO_x наблюдаются здесь в воздухе, поступающем из промышленных районов Западной Сибири и Уральских гор, тогда как фоновый воздух поступает из отдаленных районов Северной Евразии в пределах 55°–70° северной широты. Озон в континентальном воздухе имеет отчетливый максимум в апреле, как и в средних широт Северного полушария. Весной и в начале лета в жарких погодных условиях региональные антропогенные и выбросы лесных пожаров являются важным источником озона в континентальном пограничном слое над южной и центральной Сибирью. В течение оставшейся части года центральная Северная Евразия представляет собой поглотитель тропосферного озона в масштабах полушария.

Основываясь на масштабных измерениях озона и компонент его цикла, в [Thorp et al., 2021] оценивается влияние двух доминирующих секторов антропогенных выбросов (транспорт и энергетика) и растительных пожаров на приземные концентрации NO_x и O_3 над Сибирью и российской Арктикой. Полученные результаты говорят

о том, что региональный озон более чувствителен к антропогенным выбросам, особенно в транспортном секторе, и вклад выбросов от пожаров наблюдается в июне и в значительной степени ограничен широтами к югу от 60° с.ш.. Воздействие пожаров на сухое осаждение озона в пределах региона невелико по сравнению с антропогенными выбросами и незначительно к северу от 60° с.ш. Эти результаты свидетельствуют о том, что приземный озон в регионе контролируется взаимодействием между сезонностью в моделях атмосферного переноса, сухим осаждением на растительности и доминированием выбросов в транспортном и энергетическом секторах.

Работа коллектива авторов [Ракитин и др., 2021] посвящена исследованию долговременной изменчивости общего содержания (ОС) оксида углерода, как одного из прекурсоров озона и метеопараметров. В ней также получены характеристики накопления в штилевые дни в пограничном слое атмосферы оксида углерода в Московском мегаполисе. Установлено убывание среднегодовых величин ОС CO в 2000–2018 гг. в Москве ($-2.56 \pm \pm 0.52\%$/год) и на ЗНС ($-1.15 \pm 0.37\%$/год). Однако скорость убывания в обоих пунктах в разные сезоны и периоды различна. После 2007–2008 г. скорость убывания ОС CO уменьшилась в обоих пунктах. В период 2008–2018 гг. на ЗНС зафиксирован рост ОС CO в летние и осенние месяцы со скоростью около 0.7%/год. Наблюдается увеличение скорости ветра в атмосферном пограничном слое Москвы в разные периоды 2000–2018 гг. со скоростью 0.4–1.6%/год. При этом в Калужской области не обнаружено статистически значимых ее изменений. Повторяемость штилевых дней в Москве в период 2006–2017 гг. снижалась ($-7.06 \pm 3.96\%$/год) при уменьшении антропогенной части содержания CO в этот же период ($-6.72 \pm 3.48\%$/год). Полученные результаты свидетельствуют о влиянии климатического (метеорологических) факторов на качество воздуха в Москве, включая озон.

В работе [Zayakhanov et al., 2019] изучалось сухое осаждение озона в Прибайкальском регионе. На основе метода вихревой ковариации и градиентных, включая метод аэродинамического градиента, модифицированный метод Боуэна и метод модифицированного градиента, опираясь на экспериментальные данные, были получены для различных сред (луга, лес) количественные оценки потоков и сухого осаждения озона на подстилающей поверхности. Средние значения скорости сухого осаждения озона были равны 0.37 см/с в ночное время (0–3 ч) и 0.91 см/с в дневные часы (12–18 ч). Поток озона составлял 0.24 мкг $м^{-2}$ $с^{-1}$ ночью и 0.72 мкг $м^{-2}$ $с^{-1}$ днем. Количественные оценки показывают более высокую поглотительную способность лесов по сравнению с почвенной растительностью.

Недельный цикл и влияние выходных дней на концентрации O_3, NO, NO_2, CO, CH_4, SO_2, NMHC и PM10 были исследованы в московском мегаполисе с использованием натурных измерений с 1 января 2005 г. по 31 декабря 2014 г. на 49 станциях Московской сети мониторинга окружающей среды [Elansky et al., 2019]. Суточный цикл O_3 характерен для крупных городов. В будние дни его предрассветная минимальная концентрация наблюдается в 7:30, а максимальная – в 15:00–16:00. В выходные дни предрассветный минимум отсутствует, так как в это время сниженные выбросы NO на дорогах ослабляют разрушение озонового слоя. Суточные колебания концентраций CO, NO_x, NMHC и PM10 зависят главным образом от выбросов автотранспорта и вертикальной стратификации пограничного слоя атмосферы. Характерной особенностью Москвы является совпадение часов пик по времени и инверсия температуры поверхности в холодное время года, что приводит к накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. Было обнаружено, что приземные концентрации загрязняющих веществ (за исключением озона и метана) снижаются по выходным. Будний день (вторник–пятница)-воскресенье различия в дневных концентрациях (08:00–22:00 LT) NO, NO_2, CO, SO_2, NMHC и PM10 относительно концентраций в будний день, усредненных по всем станциям за 2005–2014 гг., составили 23.9 ± 5.8, 16.7 ± 2.8, 13.6 ± 3.3, 7.6 ± 6.5, 6.3 ± 2.2 и $14.5 \pm 5.1\%$ соответственно. Концентрация озона увеличилась в воскресенье на $16.5 \pm 4.8\%$. Концентрация метана в выходные была такой же, как и в будние дни. Воздействие выходных дней на все концентрации загрязняющих веществ было ослаблено в пределах зеленой зоны вокруг Москвы. В разных секторах Москвы воздействие загрязняющих веществ в выходные дни, за исключением SO_2, было примерно одинаковыми. Вертикальная структура выходных эффектов NO, NO_2 и CO была проанализирована на основе данных, полученных в результате измерений на телебашне высотой 500 м. Эти эффекты выходного дня нелинейно уменьшались с высотой. Оценки, полученные для основных критериев активности фотохимических процессов, определяющих формирование недельного цикла и влияние озона в выходные дни (отношение NMHC/NO_x, доля потерь радикалов в результате химического воздействия NO_x, концентрация O_x), показывают, что химический состав с ограниченным содержанием ЛОС характерен для Москвы.

1.4. Аномалии и экстремальные события

Несомненно, экстремальным событием в рассматриваемый период явилась пандемия коронавируса COVID-19. В [Skorokhod et al., 2022] были

исследованы изменения состава атмосферы в разные периоды 2020 г. в Москве, связанные с мероприятиями по предотвращению пандемии и соответствующим уменьшением выбросов загрязняющих веществ. Приземные концентрации диоксида азота NO_2, оксида углерода CO, озона O_3, аэрозольной фракции PM10 и метеорологические параметры в разные периоды 2020 г. сопоставлены с аналогичными данными за 5 предшествующих лет. Анализ данных наземных измерений, а также спутниковых данных высокого разрешения о распределении CO и NO_2 свидетельствует о том, что на содержание основных загрязняющих веществ и его пространственное распределение в Московском регионе существенно повлияли как ограничительные меры, так и аномальные метеорологические условия 2020 г.

В [Степанов и др., 2022] представлены результаты мониторинга приземного озона в атмосфере Москвы в 2020 и 2021 гг. в условиях строгих ограничений, связанных с пандемией COVID-19. Эти два года существенно различались метеорологическими условиями и уровнем антропогенной нагрузки на окружающую среду. В 2020 г. в Москве наблюдался относительно низкий для мегаполиса уровень приземных концентраций O_3. Среднегодовое значение составило 28 мкг/м^3, а максимальное за год – 185 мкг/м^3. Это обусловлено сочетанием относительно прохладной летней погоды с низким содержанием загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Летом 2021 г. наблюдались волны сильной жары в условиях блокирующего антициклона, дневные температуры поднимались до 35°C. В сочетании с более высокой загрязненностью атмосферного воздуха это стало причиной необычно высоких концентраций O_3. Среднегодовое значение составило 48 мкг/м^3, а максимальное годовое – 482 мкг/м^3.

При этом, в средней полосе России весной 2020 г. зафиксированы аномально низкие концентрации озона в приземной атмосфере [Котельников и др., 2021]. Обычный для весны рост содержания озона, обусловленный сезонным повышением температуры и освещенности, сменился монотонным падением. Усредненные за месяц максимальные суточные значения наблюдаемых величин в апреле 2020 г. были в 3 раза меньше величин, зафиксированных в это же время в 2019 г. Наблюдалось как снижение региональных фоновых концентраций озона в приземной атмосфере, так и уменьшение интенсивности фотохимического его образования. Наиболее вероятной причиной наблюдавшегося явления авторы считают уменьшение выбросов в атмосферу продуктов горения в Китае, Европе и России, обусловленное введением особых режимов в связи с пандемией COVID-19.

1.5. Моделирование процессов образования и трансформации ПКО

В работах [Штабкин и др., 2019, 2020а, 2020б] проведены расчеты чувствительности поля O3 к величинам суммарных эмиссий предшественников озона с помощью глобальной транспортно-химической модели GEOS-Chem с использованием баз данных по антропогенным (EDGAR) и биогенным (MEGAN, GFED) эмиссиям за 2007–2012 гг. с применением редукционного подхода. Получены подробные количественные оценки влияния отдельных факторов, определяющих сезонные вариации приземного содержания озона в Центральной Сибири. Количественная оценка антропогенного и биогенного сигналов в измеренных концентрациях O_3 проведена с использованием глобальной химико-транспортной модели GEOSChem с учетом всех основных источников и стоков данного соединения. Исследовано влияние климатически значимых региональных источников эмиссий окислов азота ($NO_x \equiv NO + NO_2$), CO и биогенных летучих органических соединений (ЛОС) на фотохимическую генерацию приземного озона (O_3) в регионах Европы и Сибири. Получено, что величина фотохимической наработки озона в летние месяцы хорошо коррелирует с возрастом воздушной массы, устанавливаемым по отношению к суммарному реактивному азоту, при среднем вкладе региональных источников ~10–15 млрд$^{-1}$. Полученные количественные оценки величины эффективности производства находятся в хорошем соответствии с выводами фотохимической теории тропосферного озона для условий слабо загрязненного воздуха.

Работы [Berezina et al., 2019; Safronov et al., 2019] посвящены оценке относительной важности изопрена и монотерпенов в формировании приземного озона в российских городах вдоль Транссибирской магистрали. Для этого был рассчитан потенциал его формирования в дневное время (ОФП). Расчетные ОФП по изопрену и монотерпенам вдоль Транссибирской магистрали составляют в среднем 15 ± 13 и 18 ± 25 млрд$^{-1}$ озона, соответственно. В большинстве городов вдоль Транссибирской магистрали, где наблюдалась высокая концентрация NO_x (10–20 млрд$^{-1}$) наряду с высокими дневными температурами (>25°C), основной вклад в формирование тропосферного озона внесли монотерпены. Только в дальневосточных городах, где произрастает крупнейшая лиственная растительность Транссибирской магистрали, изопрен играл главную роль в формировании тропосферного озона.

По измерениям концентраций озона и оксидов азота на высотной мачте ZOTTO (Zotino Tall Tower Observatory) в Центральной Сибири проведены оценки скоростей генерации (P и разрушения (L) озона, а также содержания пероксидных

радикалов (OX) с использованием фотостационарного приближения [Моисеенко и др., 2019, 2022]. Максимумы суточного хода рассматриваемых величин приходятся на период с 11:00 до 15:00 местного времени и составляют ~6 млрд$^{-1}$/ч (P), 1.4 млрд$^{-1}$/ч (L) и 115 трлн$^{-1}$ ([OX]). В диапазоне измеренных концентраций NO_x от 0.2 до 0.8 млрд$^{-1}$ имеет место линейная зависимость P от [NO_x], соответствующая NO_x-лимитирующему производству озона, с коэффициентом пропорциональности P (O_3)/[NO_x] ~ 13 (млрд$^{-1}$/ч)/млрд$^{-1}$. Высокое содержание пероксидных радикалов наряду с условием $P \gg L$ свидетельствует о процессах интенсивного окисления биогенных летучих органических соединений и фотохимической генерации озона. Полученные оценки выявляют значимую роль региональных эмиссий NO_x в балансе приземного озона и необходимость учета данного фактора при прогнозировании экологических рисков в регионах Сибири, традиционно относящихся к экологически чистым.

В серии публикаций [Borovski et al., 2019, 2020; Postylyakov et al., 2020; Пономарев и др., 2020] исследуется согласие результатов химически-транспортного моделирования NO_2 с использованием моделей SILAM и COSMO-ART в московском регионе и измерениями методом ДОАС. В работе [Пономарев и др., 2020] на основе сравнений моделирования с наблюдаемыми приземными концентрациями и ИС, определяемыми методом ДОАС, предложены корректировки пространственного распределения и мощности источников в г. Москве с целью улучшения модельных оценок качества воздуха в Москве.

Работы [Пономарев и др., 2019; Elansky et al., 2020; Ponomarev et al., 2021; Локощенко и др., 2021; Zakharova et al., 2022; Еланский и др., 2022] были посвящены уточнению источников эмиссий прекурсоров образования озона. Для оптимизации пространственного распределения источников и величины эмиссий в Московском мегаполисе проведены вычисления полей озона и других примесей для летнего и зимнего месяцев по химико-транспортным моделям SILAM и COSMO-ART с использованием как рассчитанных, так и взятых из базы данных инвентаризации TNO эмиссий. Сравнение данных наблюдений, полученных в Московской сети экологического мониторинга (МЭМ), с результатами численного моделирования на основе использования химико-транспортной модели SILAM показало, что ошибки при определении концентраций озона и других веществ в городской атмосфере имеют более сложную структуру, чем те, которые предполагаются при использовании обычных алгоритмов ассимиляции данных.

В ФГБУ "Гидрометцентр России" проводятся работы по созданию и усовершенствованию технологии прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на основе химических транспортных моделей (XTM), включая озон [Кузнецова и др., 2022; Нахаев и др., 2021]. На начальном этапе была реализована технология расчетов с использованием химической модели открытого доступа CHIMERE с усвоением данных модели WRF-ARW. На следующем этапе организовано обеспечение расчетов по XTM CHIMERE данными численной модели атмосферы COSMO-Ru07, что позволило обеспечить устойчивость и оперативность счета. Благодаря вычислительной модернизации и развитию численной модели атмосферы сегодня в экспериментальном режиме по XTM CHIMERE-COSMO-Ru2,2 проводятся расчеты полей концентраций загрязняющих веществ для части центрально-европейского региона России (36.6–44.2° в.д. и 55.1–56.5° с.ш.). Также на сетке с горизонтальным шагом 2 км для Московского региона выполняются расчеты XTM COSMO-Ru2.2-ART (COnsortium for Small-scaleMOdellling). Специфической особенностью COSMO-Ru2.2-ART (в отличие от XTM CHIMERE) является совместный расчет метеорологических величин и химических преобразований на каждом шаге по времени, что позволяет учитывать обратное влияние аэрозолей и газов на радиационные процессы и метеорологический режим атмосферы. Важнейшим звеном функционирующей автоматизированной технологии прогнозирования качества воздуха на основе двух XTM CHIMERE-COSMO-Ru2,2 и COSMO-Ru2.2-ART является верификация моделей по данным наблюдений за загрязнением. Верификация показала завышение концентраций XTM CHIMERE и их занижение COSMO-ART; обе XTM преимущественно недооценивают загрязнение на территориях транспортного типа. Коэффициент корреляции (R) между модельными и измеренными средними концентрациями NO_2 и CO составил 0.6–0.7, по расчетам концентрации O_3 XTM CHIMERE R = = 0.7–0.8, COSMO- Ru2ART R = 0.4–0.5. Выявлена сезонная изменчивость модельных отклонений со сменой знака для каждой модели и каждого загрязняющего вещества; наибольшие модельные отклонения наблюдались при аномальных погодных условиях – во время волн жары летом и при адвекции запыленного воздуха весной. С учетом установленных модельных ошибок каждой XTM сформулированы рекомендации для составления оперативного консолидированного прогноза с использованием комплексирования расчетов двух XTM.

1.6. Озон и здоровье

Увеличение содержания озона в приземном воздухе, обусловленное изменениями глобального климата и ростом загрязнения атмосферы, может приводить к повышению заболеваемости и

смертности населения. Авторами [Котельников и др., 2019] исследована связь аномально высоких ПКО в г. Москва с заболеваемостью и смертностью в различных возрастных группах населения летом 2010 г. и с частотой сердечно-сосудистых заболеваний и смертностью в малоурбанизированном районе на юге Кировской области. Показано, чтов группах мужчин и женщин в возрасте 31–60 лет и старше наблюдается статистически достоверная связь, а в соответствующих возрастных группах 15–30 лет такая связь отсутствует. На юге Кировской обл. при превышении среднесуточной предельно допустимой концентрации озона (ПДКсс) в течение нескольких суток достоверно увеличилась частота вызовов бригад скорой помощи, связанных с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Это подтверждает обоснованность установления отечественного стандарта ПДКсс для озона равного 30 мкг/м^3.

Они же предположили [Ивашкин и др., 2020], что в период COVID-19 при попадании с вдыхаемым воздухом в организм озон может пагубно действовать на основные системы организма – сердечно-сосудистую, нервную, респираторную и иммунную. В частности, как сильный окислитель, он вызывает образование в респираторном тракте свободных радикалов, провоцирующих перекисное окисление липидов, подавляющих иммунитет.

Дальнейшие исследования показали [Степанов и др., 2022], что летом 2021 г. в Москве наблюдалось редкое сочетание распространения очередной волны инфекции SARS-CoV-2 (штамм дельта) и метеорологических условий, способствующих образованию аномально высоких приземных концентраций озона. Помимо высокой частоты заражений в это время в Москве была зафиксирована и самая высокая за время пандемии смертность, обусловленная этим вирусом. Коэффициенты корреляции между частотой заражений и смертности с концентрацией приземного озона составили ~0.59 ($p < 0.01$) и ~0.60 ($p < 0.01$), соответственно. Наблюдаемая корреляция может быть обусловлена сочетанным патологическим действием на органы дыхания и кровообращения высоких концентраций озона и вируса SARS-CoV-2, которое может приводить как к более легкой передаче инфекции, так и к более тяжелому течению заболевания и повышению смертности.

В работе [Stepanov et al., 2019], эта же научная группа обращает внимание на тот факт, что наблюдающиеся на территории России приземные концентрации озона значительно превышают пороги отрицательного воздействия на растительность.

2. СТРАТОСФЕРНЫЙ ОЗОН

2.1. Наблюдения

Для контроля общего содержания озона (ОСО) в России создана и функционирует Государственная система мониторинга. ГГО продолжает обеспечение работы наземной озонометрической сети Росгидромета. Наблюдения на 28 станциях ведутся с 1973 г. Многолетние ряды данных позволяют производить анализ пространственной и временной изменчивости и выявлять взаимосвязь аномалий в поле ОСО с общей циркуляцией нижней стратосферы и верхней тропосферы. Результаты оценки долговременных изменений толщины защитного озонового слоя, основные тренды и тенденции, а также современное состояние представлены в ежегодных “Обзорах состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации” [Соломатникова и др., 2020, 2021, 2022а, 2022б]. Отдельно проводится анализ для станций Арктического региона. На 12 станциях продолжаются измерений эритемной УФ радиации. Значительную роль в обеспечении наземных измерений играет калибровка измерительной аппаратуры. Привязка приборов к мировой шкале осуществляется путем регулярных калибровок по эталону озонометрической сети Росгидромета (Спектрофотометр Добсона № 108).

Продолжаются работы по переоснащению озонометрической сети Росгидромета. В ходе опытной эксплуатации спектрометров УФОС, предназначенных для комплексных измерений спектрального состава суммарной УФР и общего содержания озона, усовершенствованы программное обеспечение, методы калибровки и расчета ОСО. По нескольким приборам накоплены ряды параллельных наблюдений с озонометрами М-124, демонстрирующие удовлетворительную согласованность и однородность рядов. В 2022г. изготовлены зенитные спектрометры для измерений ОСО, предназначенные для эксплуатации в регионах с тяжелыми климатическими условиями. В 2023 г. начинаются их испытания.

В 2022 г. сотрудниками ГГО и ААНИИ начаты совместные работы по организации сети регулярных автоматических наблюдений УФ радиации с высоким временным разрешением на полярных станциях (Арктика и Антарктика) и научно исследовательских судах ААНИИ. Ежегодно пополняется массив данных об ОСО, поступающий с российских антарктических станций Мирный, Новолазаревская и Восток и с научно-экспедиционных судов ААНИИ. До начала 2000-х гг. на антарктических станциях отмечалась устойчивая тенденция уменьшения общего содержания озона антарктической весной. В настоящее время наблюдается тенденция возвращения содержания озона к значениям, характерным для периода, предшествующего проявлению эффекта озоновой дыры [Сибир и др., 2020].

Продолжаются наблюдения интегральной оптической плотности атмосферы (ОПА), начатые в 1970-х годах. Результаты анализа данных представ-

лены в ежегодных “Обзорах состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации” [Русина и др., 2022а, 2022б]. Характер межгодовой изменчивости ОПА позволяет проследить последствия мощных вулканических извержений, периоды самоочищения атмосферы, сокращения промышленной активности в постперестроечные годы, снижения оптического замутнения атмосферы. С начала 2000-х гг. наблюдается относительно спокойное состояние атмосферы, статистически значимых трендов оптической плотности атмосферы не зарегистрировано.

Также продолжаются наблюдения аэрозольной оптической толщины атмосферы в Антарктиде. Значения, получаемые по результатам прямых спектральных солнечных фотометрических измерений, и интегральная оптическая толщина, определяемая по данным стандартных актинометрических наблюдений за прямой солнечной радиацией, являются показателями оптического состояния атмосферы. Сопоставление полученных данных с оценками для других природных регионов и условий свидетельствует о том, что в периоды без влияния вулканических извержений уровни аэрозольного замутнения атмосферы в Антарктиде на протяжении последних десятилетий являются минимальными на планете и могут рассматриваться в качестве глобальных фоновых характеристик [Радионов В.Ф. и др., 2020].

С учетом ощутимых изменений климата на планете в целом, особую роль приобретают базы и архивы данных основных климатообразующих характеристик атмосферы, собранных за длительные периоды времени в различных районах земного шара и, в частности, в полярных областях. Суммарная солнечная радиация входит в число важнейших параметров, влияющих на энергетический баланс системы Земля – атмосфера. В статье [Сибир и др., 2021] приведено описание созданной базы данных (БД) часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских станциях Антарктиды. БД предназначена для исследования радиационного режима Антарктики с начала актинометрических наблюдений и до настоящего времени. Она прошла процедуру государственной регистрации и зарегистрирована под № 2020621401. На основе содержащейся в ней информации были получены оценки характеристик изменчивости суточных, месячных и годовых сумм суммарной радиации на станциях Беллинсгаузен, Восток, Мирный, Новолазаревская и Прогресс за весь период наблюдений по 2019 г. Результаты их анализа свидетельствуют об отсутствии существенных изменений в поступлении суммарной солнечной радиации на антарктическую поверхность за более чем шестидесятилетний период актинометрических наблюдений.

В предыдущие годы, по инициативе озоновой комиссии ВМО, на станциях КВНС, Обнинск и Томск, оснащенных спектрофотометрами Брюера, проводились наблюдения общего содержания озона. Данные, полученные на этих станциях, регулярно передавались во Всемирный центр данных по озону и ультрафиолетовому солнечному излучению WOUDC. Спектрофотометры регулярно калибровались с использованием мобильного стандарта спектрофотометра Брюера № 17 [Dorokhov et al., 2015]. Из-за политических мотивов очередная калибровка не состоялась. Поэтому надежность получаемых сейчас данных под вопросом.

Помимо Государственной и международной сетей исследование ОСО и компонентов озоновых циклов проводилось на территории России в учебных и научных организациях СПбГУ, ИФА РАН, ИОА СО РАН и др.

Так, в СПбГУ на кафедре физики атмосферы и в лаборатории исследования озонового слоя и верхней атмосферы для изучения пространственно-временной изменчивости осуществляются измерения озона с использованием спутниковой и наземной аппаратур. Проводится усовершенствование методов обработки информации. В работах [Поляков и др., 2019; Тимофеев и др., 2021; Polyakov et al., 2020] предложен оригинальный алгоритм решения обратной задачи для получения общего содержания озона из спектров, измеренных Фурье-спектрометром ИКФС-2 на российском спутнике Метеор-М № 2. Алгоритм основан на использовании метода искусственных нейронных сетей, метода главных компонент и измерений ОСО прибором OMI на спутнике Aura. Погрешность определения ОСО составляет около 3%, метод позволяет анализировать глобальное распределение ОСО, в том числе, и в отсутствие солнечного излучения, например, в период полярных ночей. Авторы применили методику дифференциальной спектроскопии DOAS при интерпретации результатов измерений наземного ультрафиолетового озонного спектрометра УФОС для определения ОСО [Ионов и др., 2021]. Сопоставления рассчитанных величин ОСО с данными независимых измерений показали их систематическое расхождение, которое может быть устранено при более тщательной адаптации алгоритма DOAS к условиям задачи и характеристикам прибора УФОС. В [Виролайнен и др., 2021] представлена усовершенствованная методика обработки наземных спектральных измерений Фурье-спектрометра Bruker 125HR для получения информации об ОСО и других стратосферных газов и продемонстрировано использование наземных измерений для интерпретации процессов, происходящих в озоносфере.

ИФА РАН выполняло ежедневные измерения содержание NO_2 в вертикальном атмосферном

столбе, которое тесно связано с ОСО и которое необходимо для изучения изменений в состоянии озонового слоя, на КВНС, ЗНС и в Томске.

На Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в Томске (56.5 с.ш., 85.0 в.д.) продолжалось вертикальное зондирование для изучения динамики озона в районе тропопаузы и отслеживания глобальных изменений в озоносфере [Dolgii et al., 2019]. Зондирование проводится по дифференциальному поглощению на парах длин волн 299/341 и 308/353 нм с учетом температурной и аэрозольной поправок. Лидарная система охватывает диапазон высот ~5–45 км. Проведено тестирование и выбор наиболее оптимальных наборов сечений поглощения для восстановления вертикального распределения озона в верхних слоях тропосферы-стратосферы [Dolgii et al., 2022], разработана методика температурной коррекции, повышающая точность получения данных [Dolgii et al., 2020].

Продолжались измерения вертикального распределения озона микроволновым спектрорадиометром над Нижним Новгородом [Рыскин и др., 2012; Куликов, 2022], которые охватывали диапазон высот 25–60 км.

Регулярно производятся сравнения результатов наземных измерений ОСО разной аппаратурой, что дает возможность оценить однородность рядов данных и достоверность получаемой информации. В работе [Неробелов и др., 2022] сопоставлены результаты наземных измерений ОСО Спектрофотометром Dobson, фильтровым озонометром М-124 и Фурье-спектрометром Bruker 125HR расположенными вблизи Санкт-Петербурга на расстоянии около 50 км друг от друга. Сопоставление результатов среднедневных значений показало, чторазброс данных между разными ансамблями измерений ОСО не превышает измерительных погрешностей методов. Временное изменение среднемесячных ОСО по данным трех наборов наземных измерений в районе Санкт-Петербурга не показало явного постепенного межгодового увеличения или уменьшения содержания газа за период 2009–2020 гг.

Информация о пространственно-временных изменениях ОСО, полученная с помощью различных методов и моделей наблюдений, может значительно отличаться из-за ошибок измерения и моделирования, различий в алгоритмах поиска озона и т.д. Поэтому данные, полученные различными способами, должны регулярно проверяться. Сравнения рядов данных ОСО, полученных наземными приборами (Bruker IFS 125 HR, Dobson и М-124), спутниковыми (OMI, TROPOMI и IKFS-2) приборами и моделями (реанализ ERA5 и EAC4, модели EMAC и INM RAS–RSHU) вблизи Санкт-Петербурга (Россия) в период с 2009 по 2020 г. демонстрируют хорошую согласованность (коэффициенты корреляции 0.95–0.99). Все наборы данных воспроизводят выраженный сезонный ход ОСО с максимумом весной и минимумом осенью. Для периода 2004–2021 гг. характерна значительная положительная тенденция ОСО вблизи Санкт-Петербурга (~0.4 ± 0.1 ед. в год) по всем массивам [Nerobelov et al., 2022].

Данные по ОСО периодически сравниваются в ИОА СО РАН и ИМКЭС СО РАН с другими приборами. В работах [Баженов и др., 2022; Bazhenov et al., 2022] сопоставлялись измерения ОСО приборами М-124, а также спутникового датчика Aura OMI. Сравнение показало, что они хорошо коррелируют между собой в плане выраженных вариаций, возникающих во временных ходах, но амплитуды этих выбросов отличаются. В целом можно отметить, что прибор ИОА СО РАН превышает значения двух других приборов, а наименьшими являются значения ОСО AuraOMI.

В работах [Dolgii et al., 2020б, 2020в] сравниваются лидарные и спутниковые данные MLS/Aura и IASI/MetOp об озоне в стратосфере. Показано, что средняя относительная разность между измерениями LiDAR и MLS/Aura отрицательна в диапазоне высот 16–38 км и достигает –49.81% на 38 км. Средняя относительная разность между измерениями LiDAR и IASI/MetOp положительна в диапазонах высот 6–18 км, где она достигает 43.68% на 16.80 км, и отрицательна выше, где достигает – 43.86% на 20 км.

В [Dolgii et al., 2020a] сопоставлены измерения профилей содержания озона в атмосфере Санкт-Петербурга с помощью наземного ФС Bruker 125HR и спутникового микроволнового прибора (MLS) за временной период 2018–2020 гг. и исследовали вертикальный ход рассогласования двух типов измерений профиля озона. Сравнение показало удовлетворительные результаты.

Одной из главных задач наземных измерений является обеспечение валидации спутниковой аппаратуры. Спутниковые методы дистанционного зондирования вносят значительный вклад в анализ пространственного распределения и временной эволюции содержания озона и его аномалий. Разработанная в СПБГУ методика позволяет определять ОСОпо результатам измерений прибором IKFS-2 (инфракрасный фурье-спектрометр), расположенным на борту спутника Meteor-M N2 [Polyakov et al., 2021]. Сопоставление результатов спутниковых измерений с наземными наблюдениями в 2019–2020 гг. продемонстрировали согласованность глобальных полей распределения ОСО IKFS-2 с измерениями аппаратурой OMI, данными реанализа ECMWF ERA5 и результатами наземных измерений.

В работах [Chan et al., 2023; Трифонова-Яковлева и др., 2017] оцениваются возможности продуктов GOME-2. Установлено, что осредненные

значения наземных измерений и спутниковых оценок хорошо согласуются между собой для периода осреднения от тридцати дней. Также показано, что спутниковые оценки пригодны для описания регионального загрязнения, правдоподобно отражают как годовой ход, так и пространственное изменение концентрации, однако существуют ограничения на использование этих оценок для описания мгновенной концентрации, а также непосредственно городского загрязнения.

2.2. Исследование динамики стратосферного озона

В большом цикле статей представлены результаты многолетних измерений временной изменчивости общего содержания O_3 и NO_2 на Кисловодской высокогорной (КВНС) и Звенигородской (ЗНС) научных станциях ИФА им. А.М. Обухова РАН [Груздев и др., 2021, 2022а, 2022б; Gruzdev et al., 2021a, 2021б, 2022a, 2022б, 2022в; Savinykh et al., 2021a, 2021б]. Анализ многолетней изменчивости данных измерений выполнен с помощью метода множественной линейной регрессии. Получены годовые и сезонно-зависимые оценки линейных трендов O_3 и NO_2. Общей особенностью долговременных тенденций ОС O_3 на КВНС и ОС NO_2 на ЗНС и КВНС являются значительные тренды в зимне-весенний сезон. Они на обеих станциях отрицательные, и на КВНС сильнее, чем на ЗНС. Тенденция ОСО положительная в 1989–2002 гг. (1.6% за десятилетие) и отрицательная в 2003–2020 гг. (–1.2% за десятилетие). Полученные характеристики изменчивости озона свидетельствуют об особом характере межгодовой и долгосрочной эволюции ОСО над Северным Кавказом. В частности, тенденции ОСО в Северо-Кавказском регионе противоположны тенденциям зональных средних значений ОСО. Были получены зависимые оценки линейных тенденций и межгодовых вариаций во всем озоне, связанном с эффектами 11-летнего солнечного цикла, квазидвухлетнего колебания (QBO) в экваториальной стратосфере, North Atlantic Oscillation (NAO) и El Nino-Southern Oscillation (ENSO). Изменения общего озона в течение 11-летнего солнечного цикла на Кавказе особенно существенны летом и составляют около 4%. Связанные с QBO межгодовые колебания общего озона с амплитудой около 6% проявляются в холодное время года. Общие колебания озона, обусловленные NAO, выражены в зимне-весенний период. Воздействие ENSO на общий озон заметно летом и примерно на год отстает от изменений температуры поверхности моря в регионе, так что общий озон уменьшается после событий El Nino и увеличивается после событий La Nino. Полученные характеристики общей изменчивости озона указывают на особый характер многолетних и многолетних изменений общего озона на Северном Кавказе.

В цикле работ ИОА СО РАН проведено исследование распределения аэрозоля и озона лидарным методом с привлечением для интерпретации спутниковой информации [Баженов, 2021; Баженов и др., 2019, 2020, 2021; Bazhenov et al., 2021a, 2021б, 2022; Невзоров и др., 2021а, 2021б; Nevzorov et al., 2021, 2022]. Лидарные измерения на Сибирской лидарной станции показали наличие стратосферных аэрозольных слоев и дефицита ОСО над городом зимой 2017–2018 гг. Данные Aura OMI/MLS указывали на то, что в декабре 2017–январе 2018 г. общее содержание озона и содержание NO2 в стратосфере над севером Евразии, а также температура в стратосфере были значительно ниже нормы. Анализ обратных траекторий и интегрального (по профилю) ОСО выявил, что динамическое возмущение арктической стратосферы в декабре 2017 г. привело к вытеснению холодных воздушных масс с избыточным содержанием агрессивного хлора (ввиду дефицита NO_2) за пределы полярного круга и их вторжению в стратосферу Томска.

В работе [Bazhenov, 2019] исследовано влияние повышенной влажности в стратосфере Арктики на уровень разрушения озона. Анализ данных Aura MLS показал, что температура в стратосфере Арктики была намного ниже нормы в течение всего периода январь–март 2011 г. в интервале высот 20–35 км. Это привело к значительному распространению полярных стратосферных облаков (ПСО), которые формировались наиболее интенсивно на высотах и в периоды минимальных температур (максимального падения температуры ниже порога образования ПСО). Основные потери озона наблюдались в марте. Этому способствовало фотохимическое высвобождение хлора, избежавшего деактивации ввиду дефицита азота, вызванного денитрификацией в ходе частых явлений дегидратации, о чем могут свидетельствовать колебания высоты максимального отклонения влажности от многолетней нормы. Повышенная влажность в стратосфере увеличила пороговую температуру образования ПСО, наблюдавшихся до конца марта; в результате был повышен порог активации хлора и, таким образом, отсрочена его деактивация. Это еще более увеличило уровень суммарных потерь озона в марте 2011 г.

В работе [Belikovich et al., 2021] представлены результаты наземных микроволновых измерений эволюции вертикального распределения озона в средней атмосфере над Нижним Новгородом (56°20′ с.ш., 44° в.д.) зимой 2017–2018 гг. Выполнено их сопоставление с данными спутникового зондирования, полученными с помощью прибора MLS на спутнике Aura, и с данными реанализа

ERA5. В частности, установлена степень зависимости распределения озона в стратосфере от положения границы полярного вихря на разных высотах по отношению к пункту наблюдения. Зарегистрировано, что в январе 2018 г. вихрь приблизился к Нижнему Новгороду и далее вплоть до своего разрушения (12 февраля) его граница осциллировала над городом, так что внутри или снаружи вихря попеременно оказывались разные высотные эшелоны. Такая динамика вихря наиболее заметно повлияла на эволюцию стратосферного максимума содержания озона, положение которого отслеживало изменение границы вихря и квазипериодически менялось в диапазоне высот 30–35 км. Результаты наземного микроволнового зондирования в среднем дают меньшее относительное содержание озона, чем данные MLS с максимальным систематическим различием ~0.8 млн$^{-1}$ на высоте 38–39 км. Тем не менее, анализ наземных измерений позволил зарегистрировать более четкую реакцию озона на изменение структуры вихря над Нижним Новгородом, чем анализ спутниковых данных и данных реанализа.

Сотрудниками ИПФ РАН впервые в атмосфере Земли экспериментально зарегистрирован нелинейный фотохимический отклик на суточные вариации солнечной освещенности на второй субгармонике этого воздействия [Kulikov et al., 2021]. В результате теоретического исследования двухсуточных фотохимических осцилляций компонент семейств нечетного кислорода O_x (O, O($_1$D), O_3) и водорода HO_x (H, OH, HO_2) на высотах мезопаузы (80–90 км) с помощью моделей различной сложности были определены индикаторы присутствия этого феномена в данных ракетного и спутникового зондирования. Наиболее выраженной особенностью этих осцилляций является значительная (на несколько порядков величины) разница между двумя последовательными значениями концентрации H в конце ночи. Кроме того, установлено, что необходимыми условиями проявления этих осцилляций в профиле H перед восходом Солнца являются определенные ограничения на времена жизни семейства HO_x и O в соответствующие моменты локального времени. Обработка данных спутниковой кампании SABER/TIMED позволила получить первые экспериментальные свидетельства существования двухсуточных фотохимических осцилляций на высотах мезопаузы.

В атмосфере по-прежнему наблюдается дефицит озона над полярными районами [Киселев, 2020]. Это делает актуальным исследование “озоновых дыр”, чему посвящен целый ряд работ.

В работах [Варгин и др., 2020; Фролькис и др., 2021], выполненных для Антарктики показано, что гипотеза о возможном наличии связи между квазидвухлетним колебанием и состоянием антарктической “озоновой дыры” с большой долей вероятности не имеет под собой оснований. По данным спутникового мониторинга озонового слоя TOMS/OMI, реанализа MERRA-2 и баллонного зондирования вертикального распределения озона и температуры на Южном полюсе проведено исследование изменчивости параметров антарктической озоновой аномалии. Анализируются динамические процессы в стратосфере Антарктики, определяющие условия для сильного разрушения озонового слоя, которое за последние 8 лет, несмотря на уменьшение концентраций озоноразрушающих веществ, наблюдалось в Антарктике в 2011 и 2015 гг.

Озоновая аномалия в Арктике анализировалась в [Никифорова и др., 2019] и были установлены ее характерные особенности.

Продолжаются совместные исследования озона в Арктическом регионе с коллегами из Европейских институтов. Анализ наземных наблюдений на 38 европейских станциях позволил оценить реакцию озонового слоя над Европой на экстремальное истощение озонового слоя в Арктике в 2020 г. [Petkov et al., 2023] Влияние распространялось до средних широт Европы, но с уменьшением амплитуды и задержкой по времени до 20 дней. Развитие ситуации было аналогично тому, что наблюдалось после значительного разрушения озонового слоя в Арктике в 2011 г.

Зимой–весной 2019–2020 гг. наблюдалась самая значительная озоновая аномалия в Арктике за всю историю наблюдений [Баженов, 2021; Цветков и др., 2021]. Она была обусловлена необычайно сильным и продолжительным полярным вихрем, повлекшим беспрецедентное химическое разрушение озона. Анализ данных Aura OMI/MLS показал, что общее содержание озона неуклонно сокращалось и составило 230 е.Д. 18 марта в пункте Алерт, 222 е.Д. 18 марта в Эврике, 229 е.Д. 20 марта в Туле и 226 е.Д. 18 марта в Резольют. Минимальная температура была на 9–10% ниже нормы с декабря по апрель в стратосфере над Томском и Арктикой. Концентрация озона уменьшалась до 4 и 6% от многолетней средней на высоте 20 км 27 марта в пункте Эврика и на высоте 19 км 16 апреля в пункте Ню-Олесунн, соответственно. Такое явление вписывается в контекст климатических изменений, ведущих к охлаждению стратосферы.

В работе [Ситнов и др., 2021] появление озоновой дыры связывается с процессом блокирования. Аномалия ОСО была обусловлена главным образом уменьшением содержания озона в нижней стратосфере, достигавшим 50% вблизи уровня 70 гПа. При ключевом вкладе атмосферных динамических процессов в формирование озоновой “мини-дыры” отмечена возможность вклада разрушения озона в гетерогенных реакциях на поверхности полярных стратосферных облаков

вследствие сильного понижения температуры в стратосфере над областью блокирования.

К интересным явлениям, которые наблюдаются в средней атмосфере, относятся и стратосферные потепления. Одно из таких описано в [Варгин и др., 2019]. Оно зафиксировано над Канадой в конце декабря 2017 г. и в начале января 2018 г. Главное же внезапное стратосферное потепление в феврале 2018 г. сопровождалось изменением направления зонального ветра, разделением стратосферного полярного вихря, распространением аномалий циркуляции стратосферы до нижней тропосферы, похолоданием в мезосфере, изменением высоты стратопаузы и снижением температуры нижней стратосферы в тропиках.

2.3. Моделирование процессов в озоносфере

В [Криволуцкий и др., 2021] представлен обзор работ, выполненных в лаборатории химии и динамики атмосферы Центральной аэрологической обсерватории, по созданию и использованию глобальных численных моделей атмосферы. Среди них несколько относятся к теме данного обзора.

В [Иванова, 2021] для изучения изменчивости и взаимосвязи содержания полярного озона на основе данных о полярной температуре на уровнях 30, 70, 100 гПа и о среднем зональном ветре в полосе широт 45–75° на уровнях 10, 70 гПа построена модель полярного озона в Арктике и Антарктике для зимне-весеннего периода. Модель протестирована по данным измерений в 1979–2020 гг. и выполнена оценка погрешностей расчета полярного озона.

В работах [Smyshlyaev et al., 2021; Лукьянов и др., 2021] анализируются динамические процессы и изменения озонового слоя в арктической стратосфере зимой 2019–2020 годов. Анализ выполнен с помощью численных экспериментов с химико-транспортной моделью (ХТМ) и данных повторного анализа. Динамические условия зимы-весны 2019–2020 годов описывали снижение озона до 100 единиц Добсона (ДЕ) в Восточном полушарии и свыше 150 единиц ДУ в Западном полушарии. При этом, фотохимическое разрушение озона, как в западном, так и в восточном полушариях на максимуме составляло около 50 ДЕ с пиками в апреле в восточном и в марте - апреле в западном полушариях. Гетерогенная активация галогенных газов на поверхности полярных стратосферных облаков, с одной стороны, привела к резкому увеличению разрушения озона в каталитических циклах хлора и брома.С другой стороны, уменьшила его разрушение в азотных каталитических циклах. Анализ активности волн с использованием потоков 3D Plumb показал, что усиление распространения активности восходящих волн в середине марта над Аляскинским заливом наблюдалось на стадии развития незначительного внезапного стратосферного потепления событие, которое привело к смещению стратосферного полярного вихря на север Канады и уменьшению объема полярных стратосферных облаков.Вследствие низкой активности планетарных волн, полярный вихрь в 2019–2020 гг. оставался устойчивым вплоть до конца апреля, что создало условия для рекордного разрушения озона в Арктике.

Работы [Варгин и др., 2020; Криволуцкий и др., 2020; Tsvetkova et al., 2020] посвящены вопросам тестирования и усовершенствования моделей. С использованием данных пяти 50-ти летних расчетов по пятой версии климатической модели ИВМ РАН для современных условий анализируется межгодовая изменчивость характеристик стратосферного полярного вихря в Арктике и дат весенней перестройки циркуляции стратосферы по сравнению с данными реанализа. Ранние перестройки сопровождаются более сильной волновой активностью по сравнению с поздними. Зимние сезоны с максимальным объемом воздуха в полярной стратосфере и условиями, достаточными для формирования полярных стратосферные облаков, в среднем характеризуются ранними весенними перестройками. Выполнены численных сезонные прогнозы температуры по двум интерактивно работающим численным глобальным моделям: фотохимической модели ЦАО CHARM (0–90 км) и модели сезонного прогноза ГМЦ/ИВМ РАН ПЛАВ (0–30 км). Проведено сравнение результатов прогноза с данными реанализа. Установлено, что новая объединенная модель FOROZ (Forecastwith Ozone) показала устойчивость при реализации численных сценариев. Сезонные прогностические поля температуры модели ПЛАВ и объединенной модели FOROZ с данными реанализа близки в нижней тропосфере и отличаются в стратосфере. Объединенная модель FOROZ улучшает прогноз температуры в верхней тропосфере и стратосфере.

Для изучения изменений арктического полярного стратосферного вихря в ближайшем будущем в [Vargin et al., 2022] проведено моделирование по 5 версии климатической модели ИВМ РАН для периода 2015 2100 гг по двум сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 роста концентрации парниковых газов. Выявлено усиление распространения волновой активности и стационарной планетарной волны номер 1 в средней и верхней стратосфере, ускорение меридиональной циркуляции, увеличение зимнего среднего полярного стратосферного объема (Vpsc) и усиление межгодовой изменчивости арктической стратосферы после середины XXI века, особенно по сценарию SSP5-8.5. Мартовские месячные значения Vpsc в некоторые зимы могут быть примерно в два раза больше, чем наблюдаемые в арктической стратосфере весной 2011 и 2020 гг, что в свою очередь может привести к большому разрушению озонового

слоя. Комплексный анализ показывает, что "теплые" зимы с наименьшими средними значениями Vpck характеризуются усилением распространения волновой активности из тропосферы в стратосферу в декабре, но более слабым распространением в январе–феврале по сравнению с зимами, имеющими наибольшие значения Vpsc.

Моделирование поведения озонового слоя в прошлом и будущем активно осуществляется в Санкт-Петербургском государственном университете. Основой для исследований являются как ранее разработанные модели химии и климата семейства SOCOL [Muthers et al., 2014] и HAMMONIA [Schmidt et al., 2006], так и новая модель земной системы SOCOL4 [Sukhodolov et al., 2021], включающая в себя интерактивный океан, динамическую растительность, атмосферную химию и микрофизику сульфатного аэрозоля. Для дальнейшего совершенствования моделей было исследовано возможное влияние йодсодержащих примесей на озоновый слой [Karagodin-Doyennel et al., 2021]. Было показано, что разрушение озона йодсодержащими примесями естественного происхождения оказывает некоторое влияние на климатологию озонового слоя более заметное в тропосфере. В то же время, удвоение современных эмиссий йодсодержащих примесей, ожидаемое в будущем, оказывает слабое влияние на озоновый слой в нижней стратосфере и уменьшает общее содержание озона в столбе атмосферы на 1.5–2.5%. Полученные результаты демонстрируют сравнительно низкую чувствительность атмосферного озона к химии йода для будущих периодов, но неопределенность остается высокой из-за нехватки данных наблюдений соединений йода. Таким образом, для расчетов эволюции озонового слоя с 1980 по 2100 гг была использована базовая версия модели SOCOL4 [Sukhodolov et al., 2021] без учета йодсодержащих примесей. Расчеты изменений озонового слоя в исторический период проводились с использованием наблюдаемых параметров для всех факторов воздействия таких как: концентрации парниковых и озон разрушающих примесей, эмиссии газов источников, солнечной радиации, вулканических извержений. Рассчитанные тренды сравнивались с результатами анализа изменений озона, полученных из данных мультисенсорных композитов BASIC и MSRv2, и данных реанализа MERRA-2 и ERA-5. Анализ тенденций выполнялся отдельно для периода истощения (1985–1997 гг.) и восстановления озонового слоя (1998–2018 гг.). В период 1998–2018 гг. SOCOLv4 показывает статистически значимые положительные тренды содержания озона в мезосфере, верхней и средней стратосфере и устойчивое увеличение тропосферного озона. Результаты SOCOLv4 [Karagodin–Doyennel, 2022a] также указывают на некоторые негативные тенденции в нижних слоях тропической и среднеширотной стратосферы, которые, не согласуются с данными BASIC с позиции величины и статистической значимости. Несмотря на несколько меньшую значимость и масштабность результатов моделирования, в работе делается вывод о том, что современные CCM, такие как SOCOLv4, в целом способны воспроизводить наблюдаемые изменения концентрации озона. Этот вывод обосновывает использование таких моделей для прогнозирования будущей эволюции озонового слоя.

Оценки изменений озонового слоя в будущем проводились по модели SOCOLv4 с использованием сценариев изменений концентрации парниковых и озоноразрушающих примесей, эмиссий газов источников, солнечной радиации, вулканических извержений [Karagodin-Doyennel, 2022б]. Моделирование было выполнено на основе двух потенциальных IPCC сценариев: SSP2-4.5 и SSP5-8.5. В обоих сценариях модель показывает снижение содержания тропосферного озона в будущем, которое начнется в 2030-х годах в SSP2-4.5 и после 2060-х годов в SSP5-8.5 и связано с уменьшением концентраций прекурсоров озона, таких как NO_x и CO. Результаты также указывают на весьма вероятное увеличение содержания озона в мезосфере, верхней и средней стратосфере, а также в нижней стратосфере в высоких широтах. В соответствии с SSP5-8.5 увеличение содержания озона в стратосфере выше из-за более сильного охлаждения (>1 K за десятилетие), вызванного парниковыми газами, которое замедляет циклы каталитического разрушения озона. Напротив, в тропической нижней стратосфере концентрации озона уменьшаются, но возрастают над средними и высокими широтами обоих полушарий за счет усиления меридионального транспорта, который сильнее для сценария SSP5-8.5. Признаков снижения уровня озона в SOCOLv4 предполагает, что эволюция стратосферного озона на протяжении 21 века будет в значительной степени определяться не только снижением в концентрации галогенов, но и за счет будущих выбросов парниковых газов. Поэтому, хотя проблема антропогенного выброса галогенов на сегодняшний день поставлена под контроль, будущие изменения озона в глобальном и региональном масштабе, все еще неясны и во многом зависят от развития будущей деятельности человека.

Полученные оптимистические в целом оценки изменения озонового слоя в будущем резко контрастируют с ситуацией, когда меры по защите озонового слоя не были бы приняты. Новые оценки, выполненные с помощью модели SOCOLv4 [Egorova et al., 2022], включающей интерактивный океан и динамическую растительность подтвердили драматическое разрушение озонового слоя в этом случае, рассчитанное ранее с менее сложными моделями. Также в этой работе было показано, что введение ограничений на производство озоноразрушающих примесей поз-

волило не допустить дополнительного потепления глобального климата более чем на 2 K.

Большое внимание было посвящено воздействию на озоновый слой факторов связанных с космической погодой. Использование химико-климатической модели HAMMONIA [Schmidt et al., 2006] позволило оценить влияние солнечных вспышек в сентябре 2017 года на химический состав атмосферы [Pikulina et al., 2022]. Показано, что солнечные вспышки в начале сентября 2017 г. привели к значительному увеличение концентраций активных оксидов азота и водорода в экваториальных и южных высоких широтах. Однако это увеличение не повлияло на изменение содержание озона в тропической стратосфере, поскольку процесс разрушение озона окислами (NO_x) азота не эффективен в верхней мезосфере и нет нисходящих потоков воздуха, которые могли бы переносить дополнительные NO_x в стратосферу. Окислы водорода (HO_x) не оказывают существенного влияния на озон в течение рассматриваемых сезонов, однако некоторые небольшое разрушение озона, коррелированное с увеличением HO_x, моделируется в южном полушарии. В работе делается вывод о слабом влиянии электромагнитного излучения на атмосферу Земли во время солнечных вспышек. Как показано в работах [Mironova et al., 2022] и [Grankin et al., 2023] значительно большее влияние на озон могут иметь высыпающиеся из магнитосферы энергичные электроны.

Моделирование последствий экстремального события над Москвой в декабре 2009 г. с помощью модели HAMMONIA показало почти полное разрушение озонового слоя в мезосфере и нижней термосфере северного полушария. В работе [Grankin et. al., 2023] рассматривались высыпания энергичных электронов над городом Апатиты и рассчитывалось вызванные этими событиями изменения концентраций озона, электронов, окислов азота и водорода. Для событий 9.10.1998 и 01.09.2000 рассчитанное падение концентрации озона составило 14 и 30% на высоте 75 км. Полученные результаты указывают на потенциально существенное влияние энергичных электронов на химию атмосферы.

Условие химического равновесия ночного озона широко используется для восстановления пространственно-временных распределений ночных O, H и некоторых других характеристик в диапазоне высот 80-100 км по спутниковым данным. В работе [Kulikov et. al., 2019] с помощью ранее созданного аналитического критерия была найдена граница, ниже которой равновесие ночного озона существенно нарушается. Проведена обработка годовой (за 2004 г) базы данных SABER/TIMED одновременных ночных измерений профилей температуры, давления, концентрации озона и объемной скорости эмиссии OH* вблизи 2 мкм в результате переходов (9–7) и (8–6) в диапазоне высот 75–100 км. Было обнаружено, во-первых, что положение границы равновесия ночного озона варьируется в диапазоне 77–86 км в зависимости от сезона и широты, что в целом подтверждает выводы теоретических работ [Belikovich et al., 2018; Kulikov et al., 2018]. Кроме того, было обнаружено, что эта граница является чувствительным индикатором эволюции средней атмосферы. В частности, результаты обработки данных SABER в 2003–2005 годах показали, что аномальные широтные зависимости положения границы равновесия озона выше 60° N в январе-марте 2004 связаны с очень необычной динамикой стратосферного полярного вихря в течение арктической зимы 2003–2004 гг., которая была “remarkable winter in the 50-year record of meteorological analyses” и сопровождалась явлением приподнятой (до 80 км) стратопаузы [Manney et al., 2006]. Во-вторых, проведено восстановление пространственно-временных распределений ночных концентраций O и H по данным SABER за 2004 г. Было обнаружено, что применение условия равновесия озона ниже границы его равновесия приводит к значительной (до 5–8 раз) недооценке концентрации O в диапазоне высот 80–86 км, но практически не сказывается на качестве восстановления H. В недавней работе [Kulikov et al., 2023a] указанный критерий был улучшен, в результате чего положение границы равновесия ночного озона, найденное с помощью критерия практически идеально соответствует результатам химико-транспортного моделирования. Кроме того, в данной работе представлена общая теория фотохимического/химического равновесия малых примесей атмосферы и строго математически выведен набор условий, обеспечивающих близость концентрации конкретной примеси к своему мгновенно-равновесному значению.

В работе [Kulikov et al., 2020a] новый источник $O(^1D)$ в области мезопаузы за счет процесса $OH(v \geq 5) + O(^3P) \rightarrow OH(0 \leq v' \leq v-5) + O(^1D)$ впервые применен для восстановления пространственно-временного распределения ночного $O(^1D)$ по данным SABER/TIMED за 2003-2005 гг. С помощью условия ночного химического равновесия озона показано, что в течение года в зависимости от месяца среднемесячные распределения $O(^1D)$ имеют от 2 до 4 максимумов со значениями до 340 $см^{-3}$, которые локализованы по высоте (~92–96 км) и широте (на ~20–40°S, N и ~60–80°S, N). Среднегодовые распределения в 2003–2005 гг. имеют один слабый максимум на ~93 км и ~65°S со значениями 150–160 $см^{-3}$ и 3 ярко выраженных максимума (со значениями до 230 $см^{-3}$) на ~95 км и ~35°S, на ~94 км и ~40°N, на ~93 км и ~65–75°N, соответственно. В целом, в северном полушарии несколько больше $O(^1D)$, чем в южном. Полученные результаты представляют собой уникальную на данный момент базу данных для последующей

оценки влияния ночного $O(^1D)$ на химический состав области мезопаузы.

В работе [Kulikov et al., 2020б] впервые проведено аналитическое исследование механизма генерации реакционно-диффузионных волн в области мезопаузы (80–90 км). Эти волны представляют собой нелинейные фазовые фронты осцилляций концентраций O, O_3, H, OH и HO_2 с периодом 2 суток, двигающие в зональном направлении (строго на восток) с постоянной скоростью. Они появляются, когда фотохимия мезосферы субгармонично (с периодом 2 дня) откликается на суточные вариации солнечной радиации (внешнее периодическое воздействие) с учетом горизонтальной турбулентной диффузии. Фотохимическая система в области мезопаузы представляет собой нелинейный осциллятор, который описывается системой двух дифференциальных неавтономных уравнений со степенной нелинейностью, которая была выведена в более ранних работах авторов. Установлено, что реакционно-диффузионные волны обусловлены специфическим переносом «ветрового» типа, возникающим в уравнениях для амплитуд двухсуточных фотохимических колебаний концентраций O и H вследствие зональной неоднородности внешнего воздействия. Полученное выражение для скорости распространения волны полностью подтвердило ранее полученные численные результаты о том, что величина скорости пропорциональна коэффициенту диффузии и градиенту фазы внешнего воздействия. Направление распространения волны определяется специфическими фазовыми соотношениями и зависит только от внутренних параметров системы. Проведенное исследование имеет фундаментальное значение, например, с точки зрения предсказания возникновения подобных явлений в фотохимии атмосферы в других регионах вследствие как суточных вариаций солнечной радиации, так и присутствия множества других периодических воздействий. С практической точки зрения, данный результат позволяет определить основные индикаторы реакционно-диффузионных волн, необходимые для их последующего экспериментального обнаружения в реальных условиях мезопаузы и количественной оценки величины коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии – одного из важнейших, но не измеряемых параметров переноса на высотах данной области атмосферы.

В работе [Kulikov et al., 2022a] проведен анализ качества восстановления дневных распределений O, H, OH, HO_2 и скорости химического нагрева на высотах 77-100 км по многолетней (2003–2015) базе данных SABER/TIMED с помощью условия фотохимического равновесия дневного озона. Обнаружено, что общепринятое отбрасывание в этом условии реакции $O_3 + H \rightarrow O_2 + OH$ приводит к недооценке (до 35–40%) концентрации O и скорости химического нагрева и значительной переоценке (до ~50–85%) концентраций HO_2 и OH. В последующей работе [Kulikov et al., 2022б] улучшенная модель возбужденного OH с константами, соответствующими опубликованным данным, применена для восстановления дневных распределений O, H, OH, HO_2 по этим же данным SABER/TIMED. Обнаружено, что изменения параметров процедуры восстановления приводят к заметному (до 80%) возрастанию концентрации O ниже 85–86 км, к значительному (до 170%) возрастанию концентраций H, OH и HO_2 ниже 90 км и заметному (до 40%) их уменьшению вблизи 100 км.

В работе [Kulikov et al., 2023б] с целью снижения неопределенности в определении резонансной частоты линии излучения озона вблизи 110.836 ГГц (вращательный переход J = 61.5–60.6), широко используемой для пассивного измерения вертикальных профилей концентрации озона на высотах стратосферы и нижней мезосферы, проведен анализ результатов длительных наземных измерений спектров атмосферного микроволнового излучения в данном спектральном диапазоне. Использование созданной в ИПФ РАН модернизированной аппаратуры с высоким спектральным разрешением (~12 кГц) позволило с недоступной ранее точностью определить резонансную частоту данной линии излучения озона, которая оказалась равной 110835.909 ± ± 0.016 МГц. Было показано, что доплеровский сдвиг частоты горизонтальным ветром, а также вариации тропосферного поглощения не влияют на полученный результат. Найденное значение на 130 кГц меньше лабораторно измеренного и отличается от результатов расчетов с помощью современных спектроскопических моделей, но близко к результатам первых полуэмпирических расчетов, проведенных более 40 лет назад.

3. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ

Применяемые методы для исследования озона в различной степени выше уже освещались в тексте. Остались не затронутыми в основном методы, которые разработаны для обработки данных.

На основе траекторной модели NOAAHY-SPLIT_4 и реанализа NCEP/NCAR в Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН разработан метод расчета сверхбольших наборов (миллионов траекторий) прямых и обратных траекторий [Shukurov et al., 2019]. С помощью массивов и траекторных методов выявляются поля потенциальных источников аэрозольных и газовых частиц. Проанализированы распределения потенциальных районов источников аммиачной селитры, сульфата аммония и силиката, вносящих вклад в приземный аэрозоль, а также тропосферного формальдегида и стратосферного диоксида

азота на Звенигородской научной станции, стратосферного озона на Кисловодской высокогорной научной станции, аэрозольного содержания столба на станциях АЭРОНЕТ в Томске и Уссурийске. Метод также применяется для выявления труднодоступных регионов, связанных с аномалиями зимней приземной температуры воздуха в Москве и аномалиями осадков в бассейне оз. Байкал.

В [Груздев, 2019; Gruzdev, 2019] предложен метод учета сериальной корреляции (автокорреляции) данных в задаче множественной линейной регрессии. Метод эффективный при анализе долговременных трендов и временных вариаций атмосферных примесей. Он позволяет учитывать актокорреляцию данных на больших масштабах. Остаточный ряд представляется в виде процесса авторегрессии, порядок которой k может быть намного больше единицы, и автокорреляционная функция процесса рассчитывается путем решения системы уравнений Юла–Уокера. По автокорреляционной функции конструируется автокорреляционная матрица, которая входит в формулы для оценок регрессионных коэффициентов и их стандартных ошибок. Эффективность метода демонстрируется на основе множественного регрессионного анализа данных 26-летних измерений общего содержания NO_2 на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы. Оценки регрессионных коэффициентов и их ошибки зависят от порядка авторегрессии k. Сначала ошибка увеличивается с увеличением k. Затем она достигает максимума и после этого начинает уменьшаться. В случае NO_2 ошибка в максимуме возрастает более чем вдвое по сравнению с ее начальным значением. Уменьшение ошибки после достижения максимума прекращается, если k достигает значения, при котором авторегрессионный процесс позволяет описать важные особенности автокорреляционной функции остаточного ряда. Получены оценки сезонно зависимых трендов и эффектов воздействия на NO_2 природных факторов, таких как 11-летний солнечный цикл, квазидвухлетняя цикличность, Североатлантическое колебание и других.

В статье [Stepanov, 2022] описывается новый подход к обработке длинных рядов данных мониторинга озона в приземной атмосфере, который получил название Data Parallel Processing in Block Streams. Предлагаемая методика основана на разбиении последовательного ряда начальных данных на блоки, заполняемые результатами мониторинга приземного озона в течение одних суток. Далее из таких блоков формируется цепочка, длина которой определяется общей протяженностью процесса наблюдений. Вдоль этой цепочки блоков проводится параллельная обработка начальных данных, направленная на сглаживание быстрых флуктуаций. Сглаженные данные затем используются для определения дневной наработки озона за счет фотохимических реакций, его минимальных ночных уровней, а также величины ночных максимумов. Возможности предлагаемого подхода демонстрируются на примере анализа данных мониторинга приземного озона в Москве в 2020 г.

В ИФА РАН продолжалось развитие и усовершенствование наземного метода многоугловой дифференциальной спектроскопии (ДОАС) определения содержания NO_2, H_2CO и других химически активных газов в пограничном слое атмосферы. В 2016 г. группа ИФА РАН приняла участие в международных сравнениях приборов и методик измерения NO_2 и других газов методом ДОАС – CINDI-2. На сравнениях CINDI-2 были представлены 36 спектральных приборов от 26 различных научных групп. В статьях [Kreher et al., 2020; Wang et al., 2020] приведены результаты сравнений методик восстановления таких химически активных веществ, влияющих на химию озона, как NO_2, O_4, O_3, H_2CO, HNO_2. По результатам сравнений сформулированы рекомендации по режимам измерений и параметрам обработки измерений метода ДОАС.

В ИОА СО РАН разработан новый лидар для измерения тропосферного озона и аэрозоля [Nevzorov et al., 2022]. Лидарная система создана на базе лазера QX 500 (“СОЛАР ЛС”, Беларусь) и телескопа Кассегрена с диаметром приемного зеркала 0,35 м и фокусным расстоянием 0.7 м. Она работает на длинах волн 299/341 нм и должна перекрывать диапазон высот от ~0.1 до 12 км. Там же существенно расширена возможность мониторинга УФ солнечной радиации в обсерватории “Фоновая” [Белан и др., 2022] и разработан новый детектор УФ излучения [Тентюков и др., 2021].

В АО “ОПТЭК” (Санкт-Петербург, Россия) создан газоанализатор синглетного кислорода [Iasenko et al., 2019]. Принцип прибора основан на хемилюминесцентной реакции 9,10-дефилантрацена. Новый газоанализатор предназначен для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных задач, связанных с процессами и явлениями на границе между биогенной и абиогенной природой. Его возможности, продемонстрированные на примерах мониторинга концентраций загрязнителей в атмосферном воздухе, на экспериментах *in vivo* и *in vitro* по регистрации синглетного кислорода на поверхности снега и вблизи растений, зараженных патогенным грибом, а также на испытаниях фотокаталитических материалов, разработанных для использования в медицине и в охране архитектурных и скульптурных памятников от биодетериорации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2019–2022 гг. на территории России продолжались исследования атмосферного озона, как в

рамках Государственных системам мониторинга, так и инициативными группами в вузовских и научных организациях. Заметно расширилась сеть станций, проводящих измерения приземной концентрации озона. Начат выпуск обзоров о ПКО в Российской Федерации.

Совершенствовались методики обработки данных, разрабатывались новые приборы. Выполнен большой объем исследований по пространственно-временной изменчивости концентрации озона и факторах ее определяющих

С помощью численного моделирования сделаны оценки компонентов озоновых циклов, а также тенденций изменения озона до 2100 г.

Следует также отметить выход монографии посвященной истории исследования озона, охватывающей период от открытия кислорода до настоящего времени [Ларин, 2022].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственных заданий РУДН, ИОА СО РАН, ЦАО, ИФА РАН, ИФМ СО РАН, ИОФ РАН, ГМЦ, ИПФ РАН, ЛИН СО РАН, СПбГУ, ГГО, при поддержке проектов Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение 075-15-2021-583), Российского научного фонда (проеты № 20-17-00200и 21-17-210).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Постыляков О.В., Савкин Д.Е., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Тихонов Н.А., Захарова С.А., Давыдова М.А. Приземная концентрация озона на территории России в первом полугодии 2020 г. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 9. С. 710–721.

Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Демин В.И., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Постыляков О.В., Савкин Д.Е., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широтов В.В., Шукуров К.А. Приземная концентрация озона на территории России во втором полугодии 2020 г. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 4. С. 292–301.

Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Демин В.И., Дудорова Н.В., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Коновальцева Л.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Оболкин В.А., Постыляков О.В., Потемкин В.Л., Савкин Д.Е., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Ходжер Т.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широтов В.В., Шукуров К.А. Концентрация тропосферного озона на территории России в 2021 г. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 7. С. 559–571.

Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Взаимосвязь динамики газового состава и метеорологических величин в районе Томска. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 7. С. 529–537.

Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Многолетняя изменчивость озона и аэрозоля в районе Томска и оправдываемость прогноза их среднегодовых концентраций на десятилетие. // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 9. С. 772–776.

Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Лапченко В.А., Лапченко Е.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Изменение приземной концентрации озона в осадках // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т.32. № 8. С. 657–664.

Баженов О.Е. Озоновая аномалия зимой-весной 2019–2020 гг. в Арктике и над севером Евразии по данным спутниковых (Aura MLS/OMI) наблюдений. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 7. С. 524–529.

Баженов О.Е., Невзоров А.В., Долгий С.И., Ельников А.В., Сысоев С.М. Анализ годовых вариаций общего содержания озона и интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния в стратосфере над Томском // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Тезисы докладов XXV Международного симпозиума. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2019. С.145.

Баженов О.Е., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Долгий С.И., Макеев А.П. Возмущение стратосферы над Томском зимой 2017/2018 гг. по данным лидарных и спутниковых (Aura MLS/OMI) наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 7. С. 509–515.

Баженов О.Е., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Долгий С.И., Макеев А.П. Возмущение стратосферы над Томском зимой 2017–2018 гг. по данным лидарных и спутниковых (Aura MLS) наблюдений // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Тезисы докладов XXVII Международного симпозиума. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2021. С.54.

Баженов О.Е., Невзоров А.В., Смирнов С.В., Ельников А.В., Логинов В.А. Сравнение результатов наблюдений общего содержания озона над Томском (2006–2020 гг.), полученных тремя спектрофотометрами // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы [Электронный ресурс]: Материалы XXVIII Международного симпозиума, г. Томск, 4–8 июля 2022 г. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022.

Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Скляднева Т.К., Фофонов А.В. Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории “Фоновая”. Часть I. Методические аспекты и технические характеристики. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 9. С. 759–765.

Белан Б.Д., Савкин Д.Е. Роль влажности в изменении приземной концентрации озона // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 5. С. 395–398.

Бордовская Ю.И., Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М. Сравнение наземного и спутникового методов определения вертикальных профилей содержания озона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 225–231.

Борисов Д.В., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А. Исследование сезонной и суточной изменчивости концентраций приземного озона // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 122–135.

Бручковский И.И., Боровский А.Н., Джола А.В., Еланский Н.Ф., Постыляков О.В., Баженов О.Е., Романовский О.А., Садовников С.А., Капауа Y. Наблюдения интегрального содержания формальдегида в нижней тропосфере в городских агломерациях Москвы и Томска методом дифференциальной спектроскопии // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 1. С. 11–19.

Варгин П.Н., Кирюшов Б.М. Внезапное стратосферное потепление в Арктике в феврале 2018 г. и его влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 41–56.

Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Ракушина Е.В., Володин Е.М., Погорельцев А.И. Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и объема полярных стратосферных облаков в Арктике по данным моделирования и реанализа. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 5. С. 1–13.

Варгин П.Н., Никифорова М.П., Звягинцев А.М. Изменчивость антарктической озоновой аномалии в 2011–2018 гг. // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 20–34.

Виролайнен Я.А., Поляков А.В., Тимофеев Ю. М. Анализ изменчивости стратосферных газов по данным наземных спектроскопических наблюдений в районе Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С.163–174.

Груздев А.Н. Учет автокорреляции в задаче линейной регрессии на примере анализа общего содержания NO_2 в атмосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 73–82.

Груздев А.Н., Еланский Н.Ф., Арабов А.Я., Елохов А.С., Савиных В.В., Сеник И.А., Боровский А.Н. Проявление 11-летнего солнечного цикла в общем содержании O_3 и NO_2 по результатам многолетних измерений на научных станциях Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН // Семнадцатая ежегодная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”, 7–11 февраля 2022а г., г. Москва. Тезисы докл. Институт космических исследование РАН, Москва. С. 207.

Груздев А.Н., Арабов А.Я., Елохов А.С., Савиных В.В., Сеник И.А., Боровский А.Н., Еланский Н.Ф. Многолетние наблюдения стратосферных примесей в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН: Анализ трендов и межгодовых вариаций общего содержания O_3 и NO_2 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022б. Т. 58. № 3. С. 318–332.

Груздев А.Н., Елохов А.С. Изменения общего содержания и вертикального распределения NO_2 по результатам 30-летних измерений на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 99–112.

Давыдова М.А., Еланский Н.Ф., Захарова С.А., Постыляков О.В. Применение численно-асимптотического подхода в задаче восстановления параметров локального стационарного источника антропогенного загрязнения // Доклады РАН, сер. Математика, 2021. Т. 496. С. 34–39.

Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Пономарев Н.А., Захарова П.В., Качко М.Д., Поляков Т.И. Пространственно-временные вариации содержания загрязняющих примесей в воздушном бассейне Москвы и их эмиссии // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 92–108.

Еланский Н.Ф. Российские исследования атмосферного озона и его предшественников в 2015–2018 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. т. 56. № 2. С. 170–185.

Иванова Н.С. Статистическая модель полярного озона в зимне-весенний период // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 16–24.

Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н. Содержание озона над территорией Российской Федерации во втором квартале 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2020. № 8. с. 138–143.

Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н. Содержание озона над территорией Российской Федерации в третьем квартале 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 140–144.

Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Статников В.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2018 г. // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 136–142.

Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Широтов В.В. Содержание озона над территорией Российской Федерации в первом квартале 2019 г. // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 136–141.

Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Широтов В.В. Содержание озона над территорией Российской Федерации во втором квартале 2019 г. // Метеорология и гидрология. 2019. № 9. С. 137–140.

Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Демин В.И. Содержание озона над территорией Российской Федерации в первом квартале 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2020. № 6. С. 135–143.

Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Широтов В.В. Содержание озона над территорией Российской Федерации в третьем квартале 2019 г. // Метеорология и гидрология. 2019. №12. С. 130–134.

Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лапченко В.А., Демин В.И. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2019 г. // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 127–134.

Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А Содержание озона над территорией Российской Федерации в 1

квартале 2021 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 136–142.

Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А Содержание озона над территорией Российской Федерации во 2 квартале 2021 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 8. С. 135–141.

Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2021 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 134–142.

Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 1 квартале 2022 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 137–143.

Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации во 2 квартале 2022 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 138–142.

Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации во 3 квартале 2022 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 11. С. 138–142.

Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2021 № 2. С. 131–140.

Иванова Н.С., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в третьем квартале 2021 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 136–142.

Ивашкин В.Т., Котельников С.Н., Степанов Е.В. Возможное усиление тяжести протекания COVID-19 за счет сочетанного действия вируса Sars-CoV-19 и озона при сезонном повышении содержания озона в приземной атмосфере // Экология и Мир. 2020. № 4.

Ионов Д.В., Привалов В.И. Методика дифференциальной спектроскопии DOAS в задаче определения общего содержания озона из измерений наземного ультрафиолетового спектрометра УФОС // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 842–848.

Киселёв А.А. Дефицит озона напоминает о себе // Российские полярные исследования. 2020. № 2 (40). С. 52–54.

Котельников С.Н., Степанов Е.В. Аномальная динамика содержания озона в тропосфере весной 2020 г. в средней полосе России // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2021. Т. 48. № 3. С. 44–51.

Котельников С.Н., Степанов Е.В. Роль водного аэрозоля в разложении озона в приземной атмосфере // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2019. Т. 46. № 9. С. 23–30.

Котельников С.Н., Степанов Е.В., Ивашкин В.Т. Приземные концентрации озона и здоровье различных возрастных групп населения в г. Москва летом 2010 г. // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18. № 4. С. 26–38.

Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Банин М.В., Толстых М.А. Опытные глобальные прогнозы параметров атмосферы на основе экспериментальной технологии, учитывающей фотохимию озона (модель Foroz) // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. № 2. С. 250–260.

Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Банин М.В., Репнев А.И., Куколева А.А. Численные глобальные модели ионосферы, озоносферы, температурного режима и циркуляции для высот 0–130 км. Результаты и перспективы // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 56–69.

Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Лезина Е.А. Тестирование и перспективы технологии прогнозирования загрязнения воздуха с применением химических транспортных моделей CHIMERE и COSMO-Ru2ART. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 147–170.

Куликов Ю.Ю., Кириллов А.С., Поберовский А.В., Имхасин Х.Х. Микроволновый мониторинг содержания озона в средней атмосфере в Апатитах и Петергофе зимой 2021/22 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 99–107.

Лапченко В.А., Кузнецова И.Н. Мониторинг приземного озона в природном заповеднике “Карадагский” в период 2017–2021 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 2 (384). С. 113–125.

Ларин И.К. История озона. М.: РАН, 2022. 478 С.

Локощенко М.А., Богданович А.Ю., Еланский Н.Ф., Лезина Е.А. Температурные инверсии в Москве и их влияние на состав приземного воздуха // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 6. С. 641–650.

Лукьянов А.Н., Варгин П.Н., Юшков В.А. Исследование с помощью лагранжевых методов аномально устойчивого арктического стратосферного вихря, наблюдавшегося зимой 2019–2020 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 3. С. 278–285.

Матвиенко Г.Г., Бабушкин П.А., Бобровников С.М., Боровой А.Г., Бочковский Д.А., Галилейский В.П., Гришин А.И., Долгий С.И., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Коношонкин А.В., Крючков А.В., Кустова Н.В., Невзоров А.В., Маричев В.Н., Морозов А.М., Ошлаков В.К., Романовский О.А., Суханов АЯ., Трифонов Д.А., Яковлев С.В., Садовников С.А., Невзоров А.А., Харченко О.В. Лазерное и оптическое зондирование атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 9. С. 726–740.

Моисеенко К.Б., Васильева А.В., Скороход А.И., Штабкин Ю.А., Беликов И.Б., Репин А.Ю. Фотостационарное равновесие в системе O_3–NO_x и генерация озона по данным измерений на фоновой высотной мачте ZOTTO // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 10. С. 850–857.

Моисеенко К.Б., Березина Е.В., Васильева А.В., Штабкин Ю.А., Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б. NO_x-лимитирующий режим фотохимической генерации озона в слабо загрязненном конвективном пограничном слое: наблюдения на высотной мачте ZOTTO в центральной Сибири в 2007–2015 гг. // Доклады РАН. 2019. Т. 487. № 6. С. 669–673.

Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Борисов Д.В., Кирсанов А.А. Прогнозирование концентраций загрязняющих веществ с использованием химических транспортных моделей // Тезисы на-

учно-практической конференции по проблемам гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири (к 50-летию образования ФГБУ “СибНИГМИ”), г. Новосибирск. 20–22 октября 2021 г.

Невзоров А.В., Баженов О.Е., Ельников А.В., Логинов В.А. Взаимодействие интегрального содержания аэрозоля в стратосфере и общего содержания озона // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Тезисы докладов XXVII Международного симпозиума. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2021а. С.46.

Невзоров А.В., Баженов О.Е., Ельников А.В., Логинов В.А. Сравнение временных рядов интегрального содержания аэрозоля в стратосфере и общего содержания озона // Оптика атмосферы и океана. 2021б. Т. 34. № 5. С. 358–363.

Неробелов Г.М., Аль-Субариа О.Х., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Поберовский А.В., Соломатникова А.А. Сравнения результатов наземных измерений общего содержания озона вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 5. С. 1–7.

Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М. Аномалии озонового слоя над территорией России в зимне-весенний период 2015/2016 г. // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 36–49.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год. Росгидромет, 2021 г. 205 С.

Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2021 г. Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, 2022 г. 115 С.

Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Копейкин В.М., Скороход А.И., Штабкин Ю.А., Малафеев Г.В., Флинт М.В. Концентрация метана, озона, черного углерода, оксидов азота, углерода и содержание $\delta^{13}C_{CH4}$ над морями российской Арктики (судовые наблюдения) // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 685–695.

Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Козлов Д.А. Мониторинг общего содержания озона в атмосфере с использованием российской аппаратуры ИКФС-2 // Журн. прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86. №4. С. 597–601.

Пономарёв Н.А., Еланский Н.Ф., Захаров В.И., Веревкин Я.М. Оптимизация эмиссий загрязняющих примесей для моделирования качества воздуха в Москве. // Процессы в геосредах. 2019. № 1 (19). С. 65–73.

Пономарев Н.А., Еланский Н.Ф., Кирсанов А.А., Постыляков О.В., Боровский А.Н., Веревкин Я.М. Применение химико-транспортных моделей атмосферы для валидации эмиссий загрязняющих примесей в Москве // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 2. С. 119–126.

Радионов В.Ф., Русина Е.Н., Сибир Е.Е. Многолетние изменения интегральной и спектральной прозрачности атмосферы по данным наблюдений в обсерватории Мирный (Антарктида) // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 35–40.

Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Джола А.В., Ракитина А.В., Шилкин А.В., Кириллова Н.С., Казаков А.В. Долговременные тенденции общего содержания окиси углерода в атмосфере Московского мегаполиса // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 126–136.

Русина Е.Н., Боброва В.К. Оптическая плотность и прозрачность атмосферы // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 г. Росгидромет, 2022а. С. 31–34.

Русина Е.Н., Боброва В.К. Оптическая плотность и прозрачность атмосферы в Арктической зоне Российской Федерации // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год. Росгидромет, 2022б. С. 184–185.

Рыскин В.Г., Зинченко И.И., Красильников А.А. Об особенностях распределения озона в стратосфере по результатам одновременных наземных микроволновых измерений в Нижнем Новгороде и Кыргызстане // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. С. 24–32.

Сеник И.А., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Лисицына Л.В., Галактионов В.В., Кортунова З.В. Основные закономерности временной изменчивости приземного озона на высотах 870 и 2070 м в районе г. Кисловодска. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 1. С. 78–91.

Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Русина Е.Н. База данных часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских антарктических станциях: анализ изменения суммарной радиации за весь период наблюдений в Антарктиде // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67(3). С. 249–260.

Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Русина Е.Н. Результаты многолетних наблюдений за общим содержанием озона в Антарктиде и над акваториями Атлантического и Южного океанов // Метеорология и гидрология. 2020. Т. 3. С. 33–43.

Ситнов С.А., Мохов И.И. Связь озоновой “мини-дыры” над Сибирью в январе 2016 г. с атмосферным блокированием // Доклады РАН. 2021. Т. 500. № 1. С. 90–95.

Соломатникова А.А., Волохина Д.Ю., Жукова М.П. Особенности состояния озонового слоя над регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год. Росгидромет, 2022. С. 36–39.

Соломатникова А.А., Волохина Д.Ю., Жукова М.П. Состояние озонового слоя над Арктическими регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год. Росгидромет, 2022. С. 182–183.

Соломатникова А.А., Ромашкина К.И., Волохина Д.Ю. Особенности состояния озонового слоя над регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2019 год. Росгидромет, 2020. С. 36–39.

Соломатникова А.А., Ромашкина К.И., Волохина Д.Ю., Особенности состояния озонового слоя над регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год. Росгидромет, 2021. С. 36–39.

Степанов Е.В., Андреев В.В., Коновальцева Л.В., Касоев С.Г. Приземный озон в атмосфере Москвы во время пандемии COVID-19. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 8. С. 655–663.

Степанов Е.В., Андреев В.В., Чупров Д.В., Ивашкин В.Т. Корреляция частоты заражений и смертности от COVID-19 с аномально высоким содержанием озона в приземной атмосфере Москвы летом 2021 года // Рос. Журн. гастроэнтерол., гепатол., колопроктол, 2022. Т. 32. № 3. С. 18–22.

Тентюков М.П., Лютоев В.П., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Головатая О.С. Детектор ультрафиолетового излучения на основе ультрадисперсного оксида магния с кристаллической структурой периклаза // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 916–923.

Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поляков А.В., Виролайнен Я.А. Спутниковый мониторинг озоносферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 71–79.

Трифонова-Яковлева А.М., Громов С.А., Ходжер Т.В., Потемкин В.Л., Оболкин В.А. Оценка возможности использования профиля озона высокого разрешения по данным прибора GOME-2 для оценки концентраций приземного озона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 239–247.

Федорова Е.И., Лапченко В.А., Еланский Н.Ф., Скороход А.И. Изменчивость приземного озона в Карадагском природном заповеднике // Труды IV Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти академика А.М. Обухова "Турбулентность, динамика атмосферы и климата 2022", Москва, 22–24 ноября 2022.

Фролькис В.А., Кароль И.Л., Киселёв А.А. Существует ли связь между квазидвухлетними колебаниями атмосферы и изменениями содержания озона и температуры в Антарктиде? // Труды ГГО. 2021. Вып. 601. С. 19–34.

Ходжер Т.В., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Дементьева А.Л., Цыдыпов В.В., Балин Ю.С., Пеннер И.Э., Кохаченко Г.П., Насонов С.В., Клемашева М.Г., Голобокова Л.П., Потемкин В.Л. Результаты корабельных исследований аэрозольно-газовых примесей над акваторией оз. Байкал летом 2018 г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 4. С. 289–295.

Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хаттатов В.У. Исследование химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019–20 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 70–83.

Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Режим приземного озона на станции Карадаг в Крыму по наблюдениям в 2009–2018 гг // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2 (372). С. 102–113.

Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В. Природные и антропогенные факторы сезонной изменчивости приземного озона в Центральной Сибири // V Международная научно-практическая конференция "Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий". 20–24 мая 2019 г., Майкоп, Россия. Сборник трудов. С. 291–298.

Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В. Сезонные вариации приземного содержания озона в Северной Евразии: наблюдения и численное моделирование // Всероссийская конференция с международным участием "Турбулентность, динамика атмосферы и климата, посвященная памяти академика А.М. Обухова", Москва, 10–12 ноября 2020 г.: Тезисы докладов. М.: Физматкнига. 2020. С. 133.

Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В., Васильева А.В. Влияние дальнего переноса воздушных масс на сезонные вариации и региональный баланс тропосферного озона // Всероссийская конференция с международным участием "Турбулентность, динамика атмосферы и климата, посвященная памяти академика А.М. Обухова", Москва, 10–12 ноября 2020 г.: Тезисы докладов. М.: Физматкнига, 2020. С. 134.

Bazhenov O.E. Increased humidity in the stratosphere as a possible factor of ozone destruction in the Arctic during the spring 2011 using Aura MLS observations // International Journal of Remote Sensing. 2019. V. 40. № 9. P. 3448–3460.

Bazhenov O.E., Nevzorov A.A, Nevzorov A.V., Dolgii S.I., Makeev A.P. Disturbance of the stratosphere over Tomsk in winter 2017-2018 using lidar and satellite (Aura MLS) observations // Proceedings SPIE. 2021a. V. 11916. P. 119162J-1–119162J-6.

Bazhenov O.E., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Dolgii S.I., Makeev A.P. Disturbance of the Stratosphere over Tomsk prior to the 2018 Major Sudden Stratospheric Warming: Effect of ClO Dimer Cycle // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2021б. V. 30. № 2. P. 146–156.

Bazhenov O.E., Nevzorov A.V., Smirnov S.V., Elnikov A.V., Loginov V.A. Comparison of observations of total ozone content over Tomsk (2006–2020) obtained using three spectrophotometers // Proceedings SPIE. 2022. V.12341.

Belan B.D., Ancellet G., Andreeva I.S., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y., Balin Y.S., Barsuk V.E., Belan S.B., Chernov D.G., Davydov D.K., Fofonov A.V., Ivlev G.A., Kotel'nikov S.N., Kozlov A.S., Kozlov A.V., Law K., Mikhal'chishin A.V., Moseikin I.A., Nasonov S.V., Nédélec P., Okhlopkova O.V., Ol'kin S.E., Panchenko M.V., Paris J.-D., Penner I.E., Ptashnik I.V., Rasskazchikova T.M., Reznikova I.K., Romanovskii O.A., Safatov A.S., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Yakovlev S.V., Zenkova P.N. Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian sector of the Arctic // Atmos. Meas. Tech., 2022. V.15. №13. P.3941–3967.

Belikovich M.V., Kulikov M.Y., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M. Ozone chemical equilibrium in the extended mesopause under the nighttime conditions // Advances Space Research. 2018. V. 61. № 1. P. 426–432.

Belikovich M.V., Ryskin V.G., Kulikov M.Yu., Krasilnikov A.A., Shvetsov A.A., Feigin A.M. Microwave observations of atmospheric ozone over Nizhny Novgorod in winter of

2017–2018 // Radiophysics and Quantum Electronics. 2021. V.63. P. 191–206.

Berezina E., Moiseenko K., Skorokhod A., Elansky N., Belikov I., Pankratova N. Isoprene and monoterpenes over Russia and their impacts in tropospheric ozone formation // Geography, Environment, Sustainability. 2019. V.12. № 1. P. 63–74.

Berezina E.V., Moiseenko K.B., Skorokhod A.I., Pankratova N.V., Belikov I.B., Belousov V.A., Elansky N.F. Impact of VOCs and NO_x on ozone formation in Moscow // Atmosphere. 2020. V. 11. 1262.

Berezina E., Moiseenko K.,Vasileva A., Pankratova N., Skorokhod A., Belikov I., Belousov V. Emission Ratios and Source Identification of VOCs in Moscow in 2019–2020 // Atmosphere. 2022. V. 13. 257.

Borovski A.N., Elansky N.F., Ponomarev N.A., Postylyakov O.V. Comparison of measured and simulated by SILAM NO_2 integral content in atmospheric boundary layer in Moscow region // Proceedings SPIE. 2019. V.11152. P. 111520.

Borovski A.N., Elokhov A.S., Kirsanov A.A., Postylyakov O.V. Measured and simulated integral content of NO_2 in the atmospheric boundary layer in Moscow region in summer // Proceedings SPIE. 2020. V. 11531. P. 1153108.

Chan K.L., Valks P., Heue K.-P., Lutz R., Hedelt P., Loyola D., Pinardi G., Van Roozendael M., Hendrick F., Wagner T., Kumar V., Bais A., Piters A., Irie H., Takashima H., Kanaya Y., Choi Y., Park K., Chong J., Cede A., Frieß U., Richter A., Ma J., Benavent N., Holla R., Postylyakov O., Rivera Cárdenas C., Wenig M. Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2) daily and monthly level-3 products of atmospheric trace gas columns // Earth Syst. Sci. Data. 2023. V. 15. P. 1831–1870.

Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Gridnev Yu.V., Kharchenko O.V. Measurements of Ozone Vertical Profiles in the Upper Troposphere–Stratosphere over Western Siberia by DIAL, MLS, and IASI // Atmosphere. 2020a. V. 11. № 2. 196.

Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Gridnev Yu.V., Kharchenko O.V. Temperature Correction of the Vertical Ozone Distribution Retrieval at the Siberian Lidar Station Using the MetOp and Aura Data // Atmosphere. 2020б. V. 11. № 11. P. 1139.

Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Comparison of ozone vertical profiles in the upper troposphere–stratosphere measured over Tomsk, Russia (56.5° N, 85.0° E) with DIAL, MLS, and IASI // International Journal of Remote Sensing. 2020в. V.41. № 22. P. 8590–8609.

Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Lidar differential absorption system for measuring ozone in the upper troposphere–stratosphere // Journal of Applied Spectroscopy. 2019. V. 85. № 6. P. 1114–1120.

Dolgii S.I., Nevzorov A.V., Nevzorov A.A., GridnevYu.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Influence of Absorption Cross-Sections on Retrieving the Ozone Vertical Distribution at the Siberian Lidar Station // Atmosphere. 2022. V.13. N2. 293.

Dorokhov V., Yushkov V., Makshtas A., Ivlev G., Tereb N., Savinykh V., Shepelev D., Nakajima H., McElroy C.T., Tarasick D., Goutail F., Pommereau J.-P., Pazmino A.Brewer, SAOZ and ozonesonde observations in Siberia // Atmosphere-Ocean. 2015. V. 53. № 1. P. 14–18.

Egorova T., Sedlacek J., Sukhodolov T., Karagodin-Doyennel A., Zilker F., Rozanov E. Montreal Protocol's impact on the ozone layer and climate // Atmospheric Chemistry and Physics Discuss., 2022.

Elansky N.F., Shilkin A.V., Ponomarev N.A., Semutnikova E.G., Zakharova P.V. Weekly patterns and weekend effects of air pollution in the Moscow megacity // Atmospheric Environment. 2020. V. 224. 117303.

Elansky N.F., Shilkin A.V., Semutnikova E.G., Zaharova P.V., Rakitin V.S., Ponomarev N. A., Verevkin Y.M., Weekly Cycle of Pollutant Concentrations in Near-Surface Air over Moscow // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. V. 32. № 1. P. 85–93.

Grankin D., Mironova I., Bazilevskaya G., Rozanov E., Egorova T. Atmospheric Response to EEP during Geomagnetic Disturbances // Atmosphere. 2023. V. 14. 273.

Gruzdev A.N. Accounting for long-term serial correlation in a linear regression problem // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. 012020. P. 1–10.

Gruzdev A.N., Elokhov A.S. Comparison of the results of ground-based and satellite (OMI) measurements of the NO_2 contents in the stratosphere and troposphere over Zvenigorod: Sensitivity to cloud cover and tropospheric pollution // Proceedings SPIE. 2021a. v. 11916. P. 1191628.

Gruzdev A.N., Elokhov A.S. Long-term trends and interannual variations of the NO_2 contents in the troposphere and stratosphere of the western Moscow region according to results of remote spectrometric measurements of the vertical NO_2 profile // Proceedings SPIE. 2021б. V. 11916. P. 1191627.

Gruzdev A.N., Elansky N.F., Elokhov A.S., Savinykh V.V., Arabov A.Ya., Borovski A.N., Senik I.A. Long-term measurements of total NO_2 and O_3 column contents at stations of the A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences: Observational methods, long-term trends and interannual variations of the species // Proceedings SPIE. 2022a. V. 12341. P. 1234172-1–1234172-6.

Gruzdev A.N., Elokhov A.S. Three decades of remote sensing of NO_2 vertical distribution and column content at the A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2022б. V. 1040. 012027. P. 1–8.

Gruzdev A.N., Elokhov A.S. Trends in total, tropospheric and stratospheric NO_2 contents based on results of ground-based and satellite (OMI) measurements // Proceedings of SPIE. 2022в. V. 12341. P. 123412G-1–123412G-6.

https://mosecom.mos.ru.

https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/.

Iasenko E.A., Marugin A. M., Chelibanov V.P., Chelibanov I.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Pinchuk O.A. Chapter 8 Singlet Oxygen in the Lower Atmosphere: Origin, Measurement and Participation // In Processes and Phenomena at the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature. Springer Nature, Switzerland AG. 2019. P. 137–153.

Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., Egorova T., Saiz-Lopez A., Cuevas C.A., Fernandez R.P., Sherwen T.

Volkamer R., Koenig T.K., Giroud T., Peter T. Iodine chemistry in the chemistry–climate model SOCOL-AERv2-I // Geosci. Model Dev. 2021. V. 14. P. 6623–6645.

Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., Egorova T., Sedlacek J., Ball W., Peter T. The historical ozone trends simulated with the SOCOLv4 and their comparison with observations and reanalyses // Atmospheric Chemistry and Physics. 2022a. V. 22. № 23. P. 15333–15350.

Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., Egorova T., Sedlacek J., Peter T., The future ozone trends in changing climate simulated with SOCOLv4 // Atmospheric Chemistry and Physics Discuss., 2022b.

Khuriganova O., Obolkin V., Akimoto H., Ohizumi T., Khodzher T., Potemkin V., Golobokova L. Long-Term Dynamics of Ozone in Surface Atmosphere at Remote Mountain, Rural and Urban Sites of South-East Siberia, Russia // Open Access Library Journal. 2022. V. 3. e2578.

Kreher K., Van Roozendael M., Hendrick F., Apituley A., Dimitropoulou E., Frieß U., Richter A., Wagner T., Lampel J., Abuhassan N., Ang L., Anguas M., Bais A., Benavent N., Bösch T., Bognar K., Borovski A., Bruchkouski I., Cede A., Chan K. L., Donner S., Drosoglou T., Fayt C., Finkenzeller H., Garcia-Nieto D., Gielen C., Gómez-Martín L., Hao N., Henzing B., Herman J.R., Hermans C., Hoque S., Irie H., Jin J., Johnston P., Khayyam Butt J., Khokhar F., Koenig T.K., Kuhn J., Kumar V., Liu C., Ma J., Merlaud A., Mishra A.K., Müller M., Navarro-Comas M., Ostendorf M., Pazmino A., Peters E., Pinardi G., Pinharanda M., Piters A., Platt U., Postylyakov O., Prados-Roman C., Puentedura O., Querel R., Saiz-Lopez A., Schönhardt A., Schreier S.F., Seyler A., Sinha V., Spinei E., Strong K., Tack F., Tian X., Tiefengraber M., Tirpitz J.-L., van Gent J., Volkamer R., Vrekoussis M., Wang S., Wang Z., Wenig M., Wittrock F., Xie P.H., Xu J., Yela M., Zhang C., Zhao X. Intercomparison of NO_2, O_4, O_3 and HCHO slant column measurements by MAX-DOAS and zenith-sky UV–visible spectrometers during CINDI-2 // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. P. 2169–2208.

Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M. Nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region // Journal of Geophysical Research. Atmospheres. 2018. V. 125, JD026717.

Kulikov M.Yu., Nechaev A.A., Belikovich M.V., Vorobeva E.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Feigin A.M. Boundary of nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region from SABER data: Implications for derivation of atomic oxygen and atomic hydrogen // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. № 2. P.997–1004.

Kulikov M.Yu., Belikovich M.V. Nighttime O(^{1}D) distributions in the mesopause region derived from SABER data // Ann. Geophys. 2020a. V. 38. P. 815–822.

Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Fegin A.M. Analytical investigation of the reaction-diffusion waves in the mesopause photochemistry // Journal of Geophysical Research. Atmospheres. 2020б. V. 125. JD033480.

Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Feigin A.M. The 2-day photochemical oscillations in the mesopause region: the first experimental evidence? // Geophysical Research Letters. 2021. V. 48. e2021GL092795.

Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Fegin A.M. The revised method for retrieving daytime distributions of atomic oxygen and odd-hydrogens in the mesopause region from satellite observations // Earth Planets Space. 2022a. V. 74, 44.

Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Fegin A.M. Retrieving daytime distributions of O, H, OH, HO2, and chemical heating rate in the mesopause region from satellite observations of ozone and OH* volume emission: The evaluation of the importance of the reaction $H + O_3 \rightarrow O_2 + OH$ in the ozone balance // Advances in Space Research. 2022b. V. 69. № 9. P. 3362–3373.

Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Chubarov A.G., Dementeyva S.O., Fegin A.M., Boundary of nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region: improved criterion of determining the boundary from satellite data // Advances in Space Research. 2023a. V. 71. № 6. P. 2770–2780.

Kulikov M.Y., Krasil'nikov A.A., Belikovich M.V., Ryskin V.G., Shvetsov A.A., Skalyga N.K., Kukin L.M., Feigin A.M. High Precision Measurements of Resonance Frequency of Ozone Rotational Transition J = 61.5–60.6 in the Real Atmosphere // Remote Sensing. 2023b. V. 15, 2259.

Manney G.L., Santee M.L., Froidevaux L., Hoppel K., Livesey N.J., Waters J.W. EOS MLS observations of ozone loss in the 2004–2005 Arctic winter // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L04802.

Mironova I., Sinnhuber M., Bazilevskaya G., Clilverd M., Funke B., Makhmutov V., Rozanov E., Santee M., Sukhodolov T., Ulich T. Exceptional middle latitude electron precipitation detected by balloon observations: implications for atmospheric composition // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22. P. 6703–6716.

Moiseenko K.B., Vasileva A.V., Skorokhod A.I., Belikov I.B., Repin A.Y., Shtabkin Y.A. Regional Impact of Ozone Precursor Emissions on NO_x and O3 Levels at ZOTTO Tall Tower in Central Siberia // Earth and Space Science. 2021. V. 8. № 7. e2021EA001762.

Muthers S., Anet J.G., Stenke A., Raible C.C., Rozanov E., Brönnimann S., Peter T., Arfeuille F.X., Shapiro A.I., Beer J., Steinhilber F., Brugnara Y., Schmutz W. The coupled atmosphere–chemistry–ocean model SOCOL-MPIOM // Geosci. Model Dev. 2014. V. 7. P. 2157–2179.

Nerobelov G., Timofeyev Yu., Virolainen Y., Polyakov A., Solomatnikova A., Poberovskii A., Kirner O., Al-Subari O., Smyshlyaev S., Rozanov E. Measurements and Modelling of Total Ozone Columns near St. Petersburg, Russia // Remote Sensing. 2022. V. 14. № 16. 3944.

Nevzorov A.V., Bazhenov O.E., Dolgii S.I., Elnikov A.V., Sysoev S.M. Analysis of annual variations in total ozone content and integrated aerosol backscattering coefficient in the stratosphere over Tomsk // Proceedings SPIE. 2019. V. 11208. P. 112088P-1–112088P-4.

Nevzorov A.V., Bazhenov O.E., Elnikov A.V., Loginov V.A. Interaction of integrated aerosol content in the stratosphere and total ozone content // Proceedings SPIE. 2021. V. 11916. 11916 29.

Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Kharchenko O.V., Makeev A.P. Development of mobile lidar system for monitoring of tropospheric ozone and aerosol // Proceedings SPIE. 2022. V. 12341.

Obolkin V., Potemkin V., Khuriganova O., Khodzher T. Ozone Monitoring in the Baikal Region (East Siberia): Spatio-temporal Variability under the Influence of Air Pollutants and Site Conditions // Atmosphere. 2022. V. 13. 519.

Petkov B.H., Vitale V., Di Carlo P., Drofa O., Mastrangelo D., Smedley A.R.D., Solomatnikova A.A., Pavlova K.G. An unprecedented Arctic ozone depletion event during spring 2020 and its impacts across Europe // Journal of Geophysical Research. Atmosphere. 2023. V. 128. e2022JD037581.

Pikulina P., Mironova I., Rozanov E., Karagodin A. September 2017 Solar Flares Effect on the Middle Atmosphere // Remote Sensing. 2022. V. 14. 2560.

Polyakov A., Virolainen Ya., Nerobelov G., Timofeyev Yu., Solomatnikova A. Total ozone measurements using IKFS-2 spectrometer aboard Meteor M N2 satellite in 2019–2020 // Int. J. Rem. Sens. 2021. V. 42. № 22. P. 8709–8733.

Polyakov A., Virolainen Ya., Nerobelov G., Timofeyev Yu., Solomatnikova A. Total ozone measurements using IKFS-2 spectrometer aboard MeteorM N2 satellite in 2019–2020 // Int. J. Rem. Sens. 2021. V. 42. № 22. P. 8709–8733.

Ponomarev N., Yushkov V., Elansky N. Air Pollution in Moscow Megacity: Data Fusion of the Chemical Transport Model and Observational Network // Atmosphere. 2021. V. 12. 374.

Postylyakov O.V., Borovski A.N., Davydova M.A., Makarenkov A.A. Preliminary validation of high-detailed GSA/Resurs-P tropospheric NO_2 maps with alternative satellite measurements and transport simulations // Proceedings SPIE. 2019a. V. 11152. P. 111520F.

Postylyakov O.V., Borovski A.N., Elansky N.F., Davydova M.A., Zakharova S.A., Makarenkov A.A. Comparison of space high-detailed experimental and model data on tropospheric NO_2 distribution // Proceedings SPIE. 2019б. V. 11208. P. 112082S.

Postylyakov O.V., Borovski A.N., Shukurov K.A., Mukhartova I.V., Davydova M.A., Makarenkov A.A. On validation high-detail mapping of tropospheric NO_2 using GSA/Resurs-P observations with simulated data // Proceedings SPIE. 2020a. V. 11531. P. 1153109.

Postylyakov O., Borovski A., Kirsanov A., Vasileva A., Elansky N. Comparison of measured and simulated NO_2 integral content in the lower troposphere in Moscow region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020б. V. 489, 012035.

Safronov A.N., ShtabkinYu.A., Berezina E.V., Rakitin V.S., Skorokhod A.I., Belikov I.B., Elansky N. F. Isoprene, methyl vinyl ketone and methacrolein from TROICA-12 measurements and WRF-CHEM and GEOS-CHEM simulations in the Far East region // Atmosphere. 2019. V. 10. 152.

Savinykh V.V., Elansky N.F., Gruzdev A.N. Interannual variations and long-term trends in total ozone over the North Caucasus // Atmospheric Environment. 2021a. V. 251. 118252. P. 1–10.

Savinykh V.V., Gruzdev A.N., Elansky N.F. Trends and variations in total ozone over the North Caucasus // Proceedings SPIE. 2021б. V. 11916. P. 119162S.

Schmidt H., Brasseur G.P., Charron M., Manzini E., Giorgetta M.A., Diehl T., Fomichev V.I., Kinnison D., Marsh D., Walters S. The HAMMONIA Chemistry Climate Model: Sensitivity of the Mesopause Region to the 11-Year Solar Cycle and CO_2 Doubling // J. Climate. 2006. V. 19. 3903.

Shukurov K.A., Postylyakov O.V., Borovski A.N., Shukurova L.M., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Savinykh V.V., Mokhov I.I., Semenov V.A., Chkhetiani O.G., Senik I.A. Study of transport of atmospheric admixtures and temperature anomalies using trajectory methods at the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, V. 231(1). 012048.

Skorokhod A.I., Rakitin V.S., and Kirillova N.S. Impact of COVID-19 Pandemic Preventing Measures and Meteorological Conditions on the Atmospheric Air Composition in Moscow in 2020 // Russian Meteorology and Hydrology. 2022. V. 47. № 3. P. 183–190.

Smyshlyaev S.P., Vargin P.N., Motsakov M.A. Numerical modeling of ozone loss in the exceptional Arctic stratosphere winter-spring of 2020 // Atmosphere. 2021. V. 12. 1470.

Stepanov E., Kotelnikov S. Tropospheric ozone as a risk factor for crop production in central regions of Russia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 390. 012033.

Stepanov E.V. Data parallel processing in block streams for analysis of long-term series of ozone content in ground atmosphere // Laser Phys. 2022. V. 32. N8. 084011.

Sukhodolov T., Egorova T., Stenke A., Ball W. T., Brodowsky C., Chiodo G., Feinberg A., Friedel M., Karagodin-Doyennel A., Peter T., Sedlacek J., Vattioni S., Rozanov E. Atmosphere-Ocean-Aerosol-Chemistry-Climate Model SOCOLv4.0: description and evaluation // Geosci. Model Dev. 2021. V. 14. P. 5525–5560.

Tcydypov V.V., Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Dementeva A.L., Balzhanov T.S., Sungrapova I.P., Naguslaev S.A. Features of the spatial distribution of gaseous impurities in the atmosphere of the South-Eastern coast of Lake Baikal by route measurements in the summer period 2018-2019 // Limnology and Freshwater Biology. 2020. № 4. P. 892–893.

Thorp T., Arnold SR., Pope R.J., Spracklen D.V., Conibear L., Knote C., Arshinov M., Belan B., Asmi E., Laurila T., Skorokhod A.I., Nieminen T., and Petäjä T. Late-spring and summertime tropospheric ozone and NO_2 in western Siberia and the Russian Arctic: regional model evaluation and sensitivities // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21. P. 4677–4697.

Tsvetkova N.D., Vyzankin A.S., Vargin P.N., Lukyanov A.N., Yushkov V.A. Investigation and forecast of Sudden Stratospheric Warming events with chemistry climate model SOCOL // IOP Conf. Series, Earth Environmental Science. 2020. V. 606. 012062.

Vargin P.N., Kostrykin S.V., Volodin E.M., Pogoreltsev A.I., Wei K. Arctic Stratosphere Circulation Changes in the 21st Century in Simulations of INM CM5 // Atmosphere. 2022. V. 13. 25.

Wang Y., Apituley A., Bais A., Beirle S., Benavent N., Borovski A., Bruchkouski I., Chan K.L., Donner S., Drosoglou T., Finkenzeller H., Friedrich M.M., Frieß U., Garcia-Nieto D., Gómez-Martín L., Hendrick F., Hilboll A., Jin J., Johnston P., Koenig T. K., Kreher K., Kumar V., Kyuberis A., Lampel J., Liu C., Liu H., Ma J., Polyansky O.L., Postylyakov O., Querel R., Saiz-Lopez A., Schmitt S., Tian X., Tirpitz J.-L., Van Roozendael M., Volkamer R., Wang Z., Xie P., Xing C., Xu J., Yela M., Zhang C., Wagner T. Inter-comparison of MAX-DOAS measurements of tropospheric HONO slant column densities and vertical profiles during the CINDI-2 campaign // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. P. 5087–5116.

Zakharova S.A., Elansky N.F., Verevkin Y.M., Davydova M.A. Determination of Emissions in the City by the Rate of Change in the Integral Content of Impurities in the Atmospheric Boundary Layer // Doklady Earth Sciences. 2022. V. 504. № 1. P. 326–331.

Zakharova S., Davydova M., Borovski A., Shukurov K., Mukhartova Y., Makarenkov A., Postylyakov O. Experiments on high-detailed mapping of tropospheric NO_2 using GSA/Resurs-P observations: results, validation with models and measurements, estimation of emission power // Proceedings SPIE. 2021. V. 11859. P. 1185905.

Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Tsydypov V.V., Balzhanov T.S., Balin Yu.S., Penner I.E., Kokhanenko G.P., Nasonov S.V. Specific features of transport and transformation of atmospheric aerosol and gas admixtures in the coastal zone of Lake Baikal // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. V. 32 № 2. P. 158–164.

Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Tcydypov V.V., Balzhanov T.S., Dementeva A.L., Khodzher T.V. Investigation of Transport and Transformation of Tropospheric Ozone in Terrestrial Ecosystems of the Coastal Zone of Lake Baikal // Atmosphere 2019. V. 10. P. 739.

Zhamsueva G., Zayakhanov A., Tcydypov V., Dementeva A., Balzhanov T. Spatial-Temporal Variability of Small Gas Impurities over Lake Baikal during the Forest Fires in the Summer of 2019 // Atmosphere. 2021. V. 12. P. 188.

Zhamsueva G., Zayakhanov A., Khodzher T., Tcydypov V., Balzhanov T., Dementeva A. Studies of the Dispersed Composition of Atmospheric Aerosol and Its Relationship with Small Gas Impurities in the Near-Water Layer of Lake Baikal Based on the Results of Ship Measurements in the Summer of 2020 // Atmosphere 2022. V. 13. P. 139.

Russian Investigations of Atmospheric Ozone and its Precursors in 2019–2022

V. V. Andreev[1, *], O. E. Bazhenov[2], B. D. Belan[2], P. N. Vargin[3], A. N. Gruzdev[4], N. F. Elansky[4], G. S. Zhamsueva[5], A. S. Zayakhanov[5], S. N. Kotel'nikov[6], I. N. Kuznezova[7], M. Yu. Kulikov[8], A. V. Nevzorov[2], V. A. Obolkin[9], O. V. Postylyakov[4], E. V. Rozanov[10], A. I. Skorokhod[4, 12], A. A. Solomatnikova[11], E. V. Stepanov[1, 6], Yu. M. Timofeyev[10]A. M. Feigin[8], and T. V. Khodzher[9]

[1]RUDN, Miklukho-Maklaya str.6, Moscow, 117198 Russia

[2]Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuevsquare,Tomsk, 634055 Russia

[3]Central AerologicalObservatoty, 3,Pervomayskaya str., Dolgoprudnii, Moscowregion, 141701 Russia

[4]Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3, Pyzhyovskiypereulok, Moscow, 119017 Russia

[5] Institute of Physical Materials Science SB RAS, 6, Sakh'yanova str., Ulan-Ude, 670047 Russia

[6]Prokhorov General Physics Institute RAS, 38, Vavilova str., Moscow, 119991 Russia

[7]Hydrometcenter of Russia, 13, building 1, BolshoyPredtechensky lane, Moscow, 123242 Russia

[8]Gaponov-Grekhov Institute of Applied PhysicsRAS, 46 Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

[9]Limnological InstituteSB RAS, 3, Ulan-Batorskaya, Irkutsk, 664033 Russia

[10] St. Pererburg university, 7-9 Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, 199034 Russia

[11]Voeikov Main Geophysical Observatory, 7, Karbysheva str., St. Petersburg, 194021 Russia

[12]Department of Meteorology and Geophysics, University of Vienna, 2, Josef-Holaubek-Platz, Vienna, 1090 Austria

**e-mail: bbd@iao.ru*

The review contains the most significant results of the work of Russian scientists in the field of atmospheric ozone research performed in 2019–2022. It considers observations of tropospheric ozone, its distribution and variability in the territory of the Russian Federation, the relationship with atmospheric parameters, modeling of education processes and the impact on public health. The state of stratospheric ozone over the region, modeling of processes in the ozonosphere, developed methods and instruments were also analyzed. The review is part of Russia's national report on meteorology and atmospheric sciences, which was prepared for the International Association for Meteorology and Atmospheric Sciences (IAMAS). The report was reviewed and approved at the XXVIII General Assembly of the International Geodetic and Geophysical Union (IUGG).

Keywords: atmosphere, ozone, ozone layer, atmosphere composition, small gas impurities, air quality, ozone chemistry, transport processes