

УДК 504.3.054

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА СЕЗОННУЮ ДИНАМИКУ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ПЕЧОРО-ИЛЫЧСКОМ ЗАПОВЕДНИКЕ

© 2024 г. М. И. Василевич^а*, Н. С. Смирнов^б

^аИнститут биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
ул. Коммунистическая, 28, ГСП-2, г. Сыктывкар, Республика Коми, 167982 Россия

^бФГБУ «Печоро-Илычский государственный заповедник»,
ул. Ланиной, д. 8., п. Якша, Троицко-Печорский р-н, Республика Коми, 169436 Россия

*e-mail: mvasilevich@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 13.07.2023 г.

После доработки 05.12.2023 г.

Принята к публикации 15.12.2023 г.

Проведен анализ динамики химических параметров снега путем послойного отбора в Печоро-Илычском биосферном заповеднике (п. Якша, Республика Коми) в зимний период 2019–2020 гг. Показано, что на химический состав атмосферных осадков в большей степени влияет дальний перенос веществ. Особенности атмосферной циркуляции и регионы, с территорий которых происходит перенос воздушных масс, во многом определяют насыщение осадков теми или иными химическими компонентами. Расчет траекторий обратного переноса воздушных масс позволил выявить регионы, где формируются воздушные массы, приходящие в район исследования, определяющие химический состав осадков. Показано, что расчет траекторий позволяет достоверно оценить источники поступления поллютантов в атмосферу. В целом такой способ изучения химического состава снега весьма информативен и позволяет лучше понять факторы его формирования.

Ключевые слова: мониторинг в заповеднике, послойный отбор, снежный покров, количественный химический анализ, траектории обратного переноса воздушных масс

DOI: 10.31857/S0016752524040081, EDN: KLAGHJ

ВВЕДЕНИЕ

Состояние природной среды любого региона во многом зависит от процессов циркуляции атмосферы. Особо охраняемые природные территории (ООПТ) созданы для сохранения и изучения природной среды в ее естественном ненарушенном состоянии. Потенциально они должны быть ограждены от прямого воздействия человека в связи с запретом хозяйственной деятельности, поэтому дальний перенос поллютантов является основным видом техногенной нагрузки.

Однако известно, что многие загрязнители чрезвычайно устойчивы в атмосферных потоках и переносятся на большие расстояния, осажаясь даже на удаленных от промышленных центров территориях. В связи с этим насыщенные загрязняющими элементами воздушные потоки достигают границ ООПТ, осажаясь атмосферными осадками, могут оказывать негативное воздействие.

Территория, где проводились исследования, Печоро-Илычский биосферный заповедник, доста-

точно удалена от источников загрязнения, промышленных центров и крупных населенных пунктов. Такие условия должны обеспечивать некоторую геохимическую изолированность его ландшафтов, однако к югу от границ охраняемой территории расположены значимые промышленные регионы (Уральский промышленный регион). Кроме того, расположенные на восточной границе заповедника Уральские горы служат естественным геохимическим барьером, задерживающим западный перенос воздушных масс, способствующим интенсивной конденсации атмосферной влаги и выпадению переносимых из техногенных районов поллютантов (Антохин, 2010).

Наиболее доступным и информативным способом оценки аэрогенного поступления поллютантов путем дальнего переноса на заповедные территории является изучение химического состава снежного покрова (Ларионова, 2004; Хайрулина, 2007). Атмосферные осадки, и снег в частности, многократно показывали себя чувствительными индикаторами химического состава атмосферы – неустраняемого

геохимического фактора, действующего на все компоненты экосистем (Dong et al., 2015; Palamodova, 2021).

Изучению химического состава атмосферных осадков посвящено большое количество работ, однако анализ послонных изменений параметров в геохимических исследованиях снежной толщи применяется редко (Gabrielli et al., 2008; Hong Xu et al., 2011; Walker et al., 2003). Известно, что от начала снегонакопления к завершению на химический состав осадков воздействует огромное количество факторов: влияние атмосферной циркуляции со стороны континента либо морских акваторий, промышленных городов, эмиссии от объектов топливно-энергетического комплекса и прочие факторы. Поэтому направление переноса воздушных масс – фактор, определяющий накопление тех или иных элементов, в том числе тяжелых металлов в атмосферных осадках (Gao et al., 2018; Murphy et al., 2019; Shinkorenko, Smolyakov, 2004; Rodland et al., 2022). В настоящее время частым инструментом в экологических исследованиях является траекторный подход – анализ переноса воздушных масс, влияющих на геохимические свойства атмосферы территории исследования. Метод статистики траекторий дает возможность анализировать средние характеристики процессов циркуляции атмосферы с целью определения возможных источников поступления различных загрязнителей в окружающую среду (Кондратьев, 2014; Salvador, 2010). Подход, основанный на взвешенной по концентрации траектории (CWT) для рассмотрения потенциальных региональных источников вклада и определения характерных пространственных и временных масштабов, дает больший объем статистических данных и повышает вероятность полученных результатов определения (Ghosh et al., 2015).

Результаты послонного исследования снежной толщи путем механического изъятия слоев в конце зимнего сезона встречаются в публикациях (Тентюков, 2023; Gabrielli et al., 2008; Khodzher et al., 2014). Однако вследствие слеживаемости и смерзания слоев снега, перемешивания или смещения ветром относительно профиля, нельзя четко выделить периоды снегонакопления и корректно оценить факторы, которые обуславливают формирование химического состава снежного покрова в конкретный временной период. Поэтому послонное изъятие снега в течение зимы через равные промежутки времени дает более корректное представление о динамике поступления веществ из атмосферы. Исследования проводились в течение 1 зимнего периода 2019–2020 гг. с целью выявления сезонных колебаний режимов переноса воздушных потоков и их влияния на изменчивость химического состава осадков на экспериментальной площадке в районе

п. Якша (Печоро-Илычский заповедник) путем периодического отбора образцов снега.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Территория заповедника состоит из двух частей, расположенных в северо-восточной части европейской территории России, приуроченных к Северному Уралу, в юго-западной и восточных частях междуречья Верхней Печоры и Илыча. Климат территории континентальный, характеризуется прохладным летом и холодной снежной зимой. В зимний период в регионе преобладают ветры юго-западного и южного направлений. Площадкой для проведения эксперимента была выбрана территория ($61,824^\circ$ с.ш., $56,868^\circ$ в.д.) вблизи п. Якша в равнинной части Печоро-Илычского заповедника. Площадкой для проведения исследования выбрана удаленная от поселка, свободная от растительности территория – поверхность озера, окруженного лесом (рис. 1). В ноябре, в начале периода установления снежного покрова, были выставлены три короба размером ($50 \times 40 \times 60$) см³, которые изнутри были выстелены пластиковыми пакетами, тщательно промытыми бидистиллятом для исключения возможной контаминации проб. Изъятие пробы осуществляли вместе с пакетом, чтобы избежать потерь и загрязнения. Послойное исследование снега проводили с 20 ноября 2019 г. по 11 марта 2020 г. В течение 112 дней с интервалом 7 дней было проведено 16 отборов проб ($N = 48$).

Пробы взвешивали с точностью ± 5 г и хранили в твердом состоянии при температуре -20°C до начала анализа. Масса проб варьировала от 1 до 6 кг. Все исследования, включая отбор, хранение проб снежного покрова и их химический анализ были выполнены в соответствии с аттестованными методиками в экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ Уро РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511257 от 26.02.2014). Пробы снега растапливались при комнатной температуре, после чего сразу проводился анализ физико-химических показателей (рН и удельной электропроводности κ), определялось содержание анионов HCO_3^- и NO_3^- . Затем пробы фильтровали через ацетат-целлюлозные фильтры «Владипор» (47 мм) для анализа элементов (SO_4^{2-} , $\text{S}_{\text{общ.}}$, Ca, Na, Mg, V, Pb, Mn, Zn, Al, Ni, Cu) и через стекловолоконные фильтры «Sartorius» (MGD, 47 мм) для определения ТОС (общего органического углерода). Таким образом, определение большинства показателей выполнено в растворимой фазе талых вод, в которой содержится преобладающая доля химических элементов, поступающих со снегом (Василевич, 2015).

Для более корректной интерпретации результатов эксперимента полученные данные пересчитывали в соответствующие значения уровней

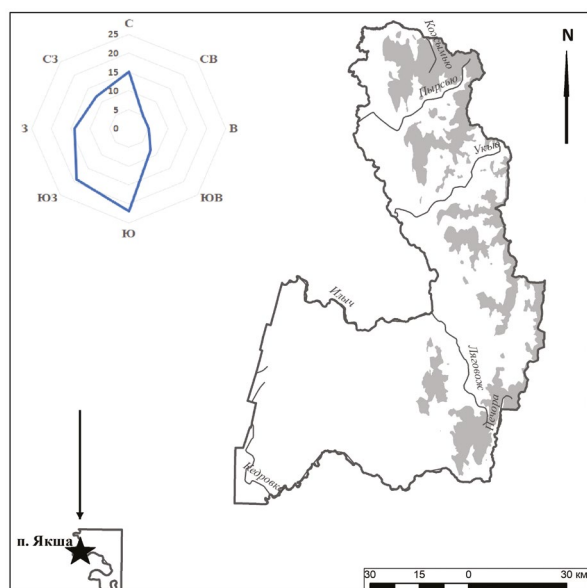


Рис. 1. Расположение экспериментальной площадки на территории заповедника в 2019–2020 гг.

поступления веществ на поверхность в $\text{г}/\text{м}^2$ или $\text{мг}/\text{м}^2$ по формуле:

$$P = \frac{C_m \times V}{S} \times 10,$$

где P – масса определяемого компонента, поступившего на единицу площади поверхности земли за период, $\text{мг}/\text{м}^2$ или $\text{мкг}/\text{м}^2$ ($\text{мкг}/\text{м}^2$);

C_m – массовая концентрация компонента в талой воде, $\text{мг}/\text{дм}^3$ или $\text{мкг}/\text{дм}^3$;

V – объем талой воды всей пробы, дм^3 ; условно взята масса (г) с допущением, что плотность равна $1 \text{ кг}/\text{дм}^3$;

S – площадь внутреннего поперечного сечения ко-роба для отбора проб снега, 2000 см^2 ;

10 – коэффициент для согласования размерности. Для того чтобы избавиться от лишних нулей и низких значений и не перегружать таблицу, данные были приведены в $\text{мг}/\text{м}^2$ и $\text{мкг}/\text{м}^2$.

Формирование снежного покрова в период исследования в 2019–2020 гг. проходило неравномерно в связи постоянными колебаниями температуры (табл. 1).

Первый снег выпал в самом конце октября. К моменту отбора снега за первый период после небольшой оттепели мощность снежного покрова была около 45 см. Первые две недели была не очень морозная погода с умеренным количеством осадков. В начале декабря наблюдались оттепели с обильными осадками. Также много осадков вы-

падало в первой половине января, что отразилось на объеме проб. Наиболее морозный период пришелся на вторую половину января и начало февраля. В третью декаду февраля и в марте наблюдались обильные снегопады. К концу данного периода мощность снежной толщи увеличилась до 92 см.

Метеорологические данные относительно направлений ветра, осадков и температуры воздуха на все даты периода наблюдений взяты из открытого доступа с сайта <http://rp5.ru>. Анализ этих данных и прежние наблюдения на территории заповедника, ведущиеся с 2014 г. позволяют отметить, что зима 2019–2020 гг. была более теплой и многоснежной, с малым влиянием северных ветров.

Обратные траектории переноса были сгенерированы на основе данных о поле ветра и давлении с использованием гибридной одночастичной интегрированной траектории Лагранжа на сайте Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) (HYSPLIT) <http://www.arl.noss.gov>. Для моделирования использовали 24-часовые траектории (обратный нормальный режим) для высот прибытия 1000 м, 500 м и 100 м соответственно, чтобы попытаться дифференцировать территории-источники поступления воздушных масс. Модель была реализована с помощью программы, которая запускала моделирование траекторий из архивных данных сайта каждые 3 часа. Расчет траекторий выполнен для периода исследования с 20 ноября 2019 г. по 11 марта 2020 г. Для анализа атмосферных переносов использовали как траектории понедельно, так и за весь сезон исследования.

Таблица 1. Метеорологические параметры зимнего периода 2019–2020 гг.

Период	Даты накопления	$T^{\circ}\text{C}$ средняя за период	Количество осадков, мм	Высота снега, см	Средняя масса, г
1	20.11–27.11	–6	4.1	45	1318
2	27.12–04.12	–6	6.0	44	980
3	04.12–11.12	–3	22.3*	44	4196
4	11.12–18.12	–5	7.4	42	1099
5	18.12–25.12	–9	7.4	52	3074
6	25.12–01.01	–13	4.9	52	1551
7	01.01–08.01	–6	16.6	61	3727
8	08.01–15.01	–6	15.9	65	4081
9	15.01–22.01	–12	13.5	68	3020
10	22.01–29.01	–17	10.2	74	1541
11	29.01–05.02	–13	25.1	86	5784
12	05.02–12.02	–14	9.3	86	1074
13	12.02–19.02	–6	10.8	80	2724
14	19.02–26.02	0	12.1	78	2366
15	26.02–04.03	–3	20.6	85	3009
16	04.03–11.03	–2	22.2	92	4992

* Жирным шрифтом выделены периоды, когда выпадало наибольшее количество осадков.

Чтобы понять пространственное распределение областей – потенциальных источников загрязнения воздушных масс и их относительную значимость, для расчета траектории использовали метод взвешенной по траектории концентрации (CWT) (Han et al., 2007). Для вычисления CWT весь географический регион, охватываемый траекториями, делится на массив ячеек сетки, размер которых зависит от географического масштаба траекторий. Метод CWT присваивает значения концентрации в месте рецептора для оценки взвешенной по траектории концентрации в каждой ячейке сетки путем усреднения концентраций загрязняющих веществ в пробах, которые имеют соответствующие траектории, пересекающие каждую ячейку сетки, как указано в уравнении 1 ниже:

$$C_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \tau_{ijk}} \times \sum \{c_k \times \tau_{ijk}\},$$

где C_{ij} – средневзвешенная концентрация в (i, j) -й ячейке, k – индекс траектории, c_k – концентрация загрязняющего вещества, измеренная по прибытию на траекторию k , N – общее количество траекторий, а τ_{ijk} – время, проведенное в (i, j) -й ячейке (Han et al., 2007). CWT является эффективным методом, поскольку предоставляет информацию об относительной значимости различных регионов потенци-

альных источников в дополнение к пространственному распределению источников (Liu et al., 2019).

Для создания карта-схем и картографического анализа данных использовали программный пакет Arc GIS9.3. Для статистической обработки данных расчета траекторий также использовали программы QGIS3.0.0 и Erdas Imagine 10.0. На основании расчетов обратных траекторий переноса воздушных масс получен массив точек траекторий, которые показывают пути движения воздушных масс. Для отображения на карте использовали сетку с размером ячейки 0.25° . Количество точек в каждой ячейке сетки ранжировано цветом и отражено в легендах, что наглядно дает представление как о путях переноса, так и об их повторяемости. Доминирующее направление переносов в отдельные временные периоды определяли путем расчета попадания начальных точек траекторий (%) в сектора 8 румбов, соответствующих основным направлениям, в Erdas Imagine. Оценка распределения точек траекторий по регионам России, проводилась с помощью векторного анализа в QGIS3.0.0. Вероятностная оценка влияния на загрязнение воздушных масс выбросами промышленных городов реализована тем же инструментом, путем наложения векторного слоя точек траекторий на слои городов России и условные буферные зоны вокруг них 20 км.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты количественного химического анализа для 22 показателей талых вод представлены в табл. 2. Величина общей минерализации талых вод в среднем составила 4.3 мг/дм^3 . Диапазон колебаний этого значения $3.2\text{--}6.3 \text{ мг/дм}^3$, что соответствует ранее полученным при проведении мониторинга значениям для территории вблизи п. Якша – 3.6 (2019 г.), 3.4 (2018 г.). Рассчитанные величины кислотности талых вод в прошлые периоды наблюдения ($\text{pH} = 4.8$) указывают на то, что кислотно-основные свойства снежного покрова таежной зоны определяются дефицитом нейтрализующих катионов и преобладанием в талой воде анионов ($[\text{K}^+]/[\text{A}^-] < 1$) (Василевич, 2011). Такие же результаты получены в 2020 г. на площадке послынного исследования снега возле п. Якша. Послынные исследования также показали значимый тренд ($N = 48$, $r_{5\%} = 0.28$) в сторону увеличения отношения $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-]$ от начала снегонакопления к моменту отбора весной (рис. 2).

На содержание сульфат-ионов в атмосферных осадках большое влияние оказывает эмиссия в атмосферу оксида серы (IV) от ТЭЦ, интенсивно работающих в зимний отопительный сезон (Василевич, 1985). В то же время содержание нитрат-ионов в снеге таежной зоны в значительной степени обусловлено транспирационными выделениями древесной растительности (Баранов, 2020). Поэтому тренд на увеличение преобладания содержания сульфат-ионов над нитрат-ионами вполне логичен.

На фоновых территориях юго-восточных регионов Республики Коми значимую роль в формировании кислотности снеговых вод играют ионы SO_4^{2-} , о чем свидетельствуют высокие значения их отношения: поступление сульфат ионов в среднем преобладает над поступлением нитрат-ионов ($[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-] = 1.20$) и немного снижается в пред-

горьях заповедника (Василевич, Симакин, 2017). В предгорьях увеличивается доля нитрат-ионов, возможно, вследствие увеличения транспирационных выделений лесным растительным покровом. Среднее за зимний период 2020 г. значение – 0.8.

Для оценки факторов, определяющих кислотность талой воды, рассчитывают отношение содержания основных нейтрализующих ионов к содержанию анионов сильных кислот, участвующих в подкислении осадков: $\text{K/A} = ([\text{NH}_4^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+]) / ([\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-])$ (Виноградова, Иванова, 2013). Полученные средние значения показывают, что в талой воде таежной зоны отношение $\text{K/A} < 1$, т.е. проблема кислотных осадков на территории региона существует. Среднее значение отношения K/A составило 0.40 при увеличении этого значения в предгорьях до 0.80. Для проб снега при послынном исследовании в районе п. Якши это значение K/A в среднем составило 0.64. Значения этого эквивалентного соотношения ионов увеличиваются от начала снегонакопления к концу снежного периода (рис. 2). Диапазон значений pH талых вод варьировал от 5.0 до 6.2, среднее значение за весь период исследования составило 5.8. Было отмечено, что минимальное значение pH в 5-й период с 18 по 25 декабря, совпадает с увеличением содержания в талой воде серы, общего органического углерода и азота. В этот период были выражены переносы южного направления со стороны Свердловской области, захватывающие территорию Пермского края и Кировской области (табл. 3). Однако обильный снегопад 24 декабря (3.6 мм) сопровождался переносом со стороны Ухтинско-Сосногорской агломерации, где расположены предприятия по переработке углеводородного сырья.

Максимальные значения pH были отмечены в период с 26 февраля по 4 марта, когда обильный снегопад (7.6 мм) приходился на 29 февраля при прохождении воздушных масс через Пермский край,

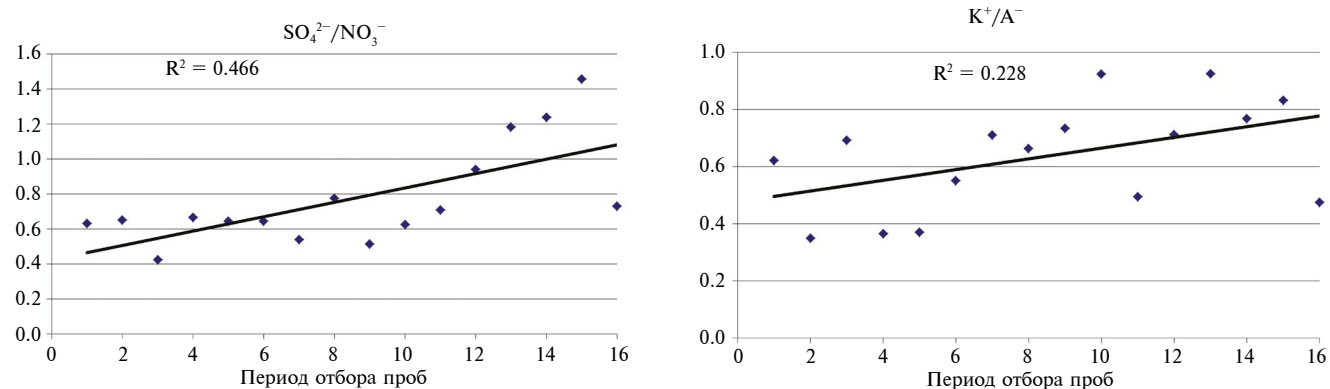


Рис. 2. Диаграммы отношений эквивалентных содержаний (мг-экв/кв.м) компонентов в пробах талых вод от начала отбора до конца периода снегонакопления.

Таблица 2. Поступление веществ в составе снежных выпадений в зимний период 2019–2020 гг.

Показатель	pH	а***	НСО ₃ ⁻ мг/м ²	S _{общ.} мг/м ²	ТОС мг/м ²	TN мг/м ²	Ca мг/м ²	Na мг/м ²	K мг/м ²	Mg мг/м ²	Cl мг/м ²	V мкг/м ²	Pb мкг/м ²	Mn мкг/м ²	Zn мкг/м ²	Al мкг/м ²	Ni мкг/м ²	Cu мкг/м ²
T																		
1	5.58* 0.08**	7.93 0.45	11.02 1.85	1.45 0.11	8.44 0.29	2.87 0.05	5.14 0.47	0.14 0.10	0.16 0.08	0.10 0.01	0.00 0.00	0.00 0.00	1.99 1.06	25.91 1.42	41.17 11.42	14.69 5.25	0.21 0.36	0.99 1.72
2	5.55 0.09	12.70 0.20	8.61 1.24	2.30 0.07	8.50 0.38	4.43 0.34	4.16 0.22	0.32 0.03	0.16 0.03	0.12 0.02	0.17 0.13	0.88 1.02	1.15 1.00	13.88 0.79	20.57 8.47	43.94 34.20	0.06 0.11	0.73 0.81
3	5.92 0.03	5.40 0.56	38.86 7.33	1.83 0.59	30.61 7.98	5.32 0.91	9.33 2.45	0.31 0.15	0.34 0.14	0.14 0.05	0.00 0.00	0.28 0.48	18.60 32.21	34.30 15.16	26.10 20.21	61.82 57.46	0.00 0.00	0.00 0.00
4	5.52 0.09	8.40 0.17	12.46 2.77	1.43 0.07	6.78 0.83	2.70 0.39	2.77 0.31	0.14 0.02	0.18 0.12	0.04 0.00	0.00 0.00	0.27 0.27	7.00 4.32	4.24 0.27	8.49 2.78	7.76 2.79	0.00 0.00	0.00 0.00
5	5.09 0.12	8.10 0.62	29.57 4.44	2.77 0.12	18.50 3.03	5.39 0.51	5.79 1.14	0.25 0.19	0.16 0.12	0.11 0.03	0.21 0.09	1.08 0.94	25.18 7.77	11.22 0.75	59.95 26.78	73.87 40.16	1.26 1.11	1.06 1.83
6	5.49 0.12	6.40 0.26	13.86 1.06	1.14 0.09	9.85 0.88	2.20 0.10	3.27 0.22	0.34 0.03	0.03 0.03	0.11 0.01	0.24 0.09	0.43 0.42	13.00 1.85	9.85 1.43	8.87 4.13	25.41 35.68	1.11 0.39	0.00 0.00
7	5.79 0.21	5.20 0.36	36.34 5.00	1.86 0.05	17.42 1.44	4.40 0.74	8.02 0.70	1.50 0.18	0.51 0.22	0.30 0.01	2.62 0.22	1.19 2.07	2.03 2.13	27.93 1.37	38.03 23.91	13.78 12.11	0.33 0.57	0.27 0.47
8	5.86 0.24	3.70 0.96	41.41 2.73	1.45 0.24	20.84 2.29	2.67 1.25	5.76 3.96	1.07 0.17	0.27 0.18	0.14 0.06	2.01 0.92	0.52 0.90	6.80 6.22	12.33 2.00	35.89 15.47	102.61 164.77	4.27 4.16	0.00 0.00
9	6.03 0.04	3.77 1.37	28.54 1.14	1.31 0.04	12.79 1.34	3.27 0.67	6.64 0.58	0.35 0.12	0.30 0.09	0.11 0.02	0.75 0.36	1.85 2.09	3.83 3.63	24.13 1.00	42.23 8.02	9.14 6.33	0.11 0.11	2.22 1.77
10	6.09 0.03	4.27 0.06	15.06 1.57	0.46 0.01	5.08 0.97	0.99 0.35	3.37 0.42	0.56 0.04	0.05 0.06	0.10 0.01	1.58 0.08	0.37 0.64	1.32 1.33	10.79 1.08	4.32 2.06	2.77 0.15	0.52 0.69	0.68 1.18
11	5.90 0.09	5.53 0.49	56.86 4.71	5.21 0.24	26.02 9.41	9.37 1.72	13.96 3.90	0.38 0.41	0.64 0.18	0.19 0.08	0.00 0.00	0.00 0.00	11.24 10.17	29.76 16.46	70.57 22.05	66.35 97.35	3.22 4.64	1.50 2.60
12	5.97 0.00	5.27 0.25	10.76 0.54	0.75 0.02	5.91 0.13	1.01 0.13	2.51 0.20	0.40 0.01	0.07 0.01	0.08 0.01	0.76 0.10	0.04 0.06	2.90 0.33	9.14 0.71	10.10 0.81	1.52 0.68	0.00 0.00	1.12 0.98
13	5.96 0.03	4.30 1.51	30.47 1.06	1.50 0.60	16.69 2.97	1.66 0.80	5.68 2.56	0.69 0.09	0.20 0.13	0.11 0.07	1.09 0.95	0.78 0.68	5.93 4.61	20.49 17.91	23.10 15.54	13.76 11.99	0.69 1.20	3.45 3.87
14	5.89 0.06	4.60 0.10	27.55 3.20	1.82 0.12	13.13 0.66	1.87 0.29	5.67 0.51	0.14 0.06	0.15 0.04	0.10 0.00	0.00 0.00	0.97 1.24	8.93 1.78	25.24 3.87	62.07 6.91	4.25 0.13	0.99 0.88	1.75 1.64
15	6.16 0.05	9.27 0.21	34.99 0.99	5.77 0.23	23.30 3.11	4.95 0.27	13.65 0.88	4.26 0.75	0.39 0.16	0.70 0.04	2.16 0.63	1.12 1.49	9.62 8.64	46.13 8.34	26.72 3.10	90.95 10.62	0.49 0.85	1.35 1.36
16	5.92 3.81	6.63 1.99	55.40 2.31	5.47 3.79	32.95 4.55	9.21 1.49	12.13 0.49	1.95 0.18	0.65 1.41	0.45 3.62	3.90 5.94	3.93 11.89	6.35 18.31	41.11 13.66	37.34 3.72	58.42 2.73	2.77 3.81	1.58 1.99

Примечания. T – период накопления (отбора). * Среднеарифметическое значение (n = 3). ** Стандартное отклонение. *** Удельная электропроводность (мкСм/см).

Таблица 3. Распределение точек траекторий по регионам РФ, %

Регион	Период отбора проб снега																Σ^*	Доля, %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Республика Коми	117	41	41	66	91	118	97	84	91	119	39	117	78	63	72	81	1315	41.1
Пермский край	4	39	25	33	48	55	6	10	36	27	75	19	23	26	24	22	472	14.8
Кировская область	3	26	32	29	19	4	22	26	18	0	8	24	43	27	6	36	323	10.1
Архангельская область	39	6	11	16	0	0	33	13	1	22	10	0	0	12	22	18	203	6.3
Вологодская область	16	21	15	22	0	0	14	10	8	0	6	5	3	8	24	0	152	4.8
Костромская область	5	9	2	5	0	0	21	9	6	0	0	6	4	7	7	1	82	2.6
Республика Татарстан	0	12	10	4	0	11	0	0	12	13	11	4	0	1	2	2	82	2.6
Республика Башкортостан	0	8	0	5	0	0	0	0	0	3	23	0	0	15	16	0	70	2.2
Нижегородская область	0	2	5	0	0	0	0	23	0	0	0	6	10	14	1	0	61	1.9
Удмуртская Республика	0	9	13	0	0	6	0	0	3	3	21	5	0	0	0	1	61	1.9
Свердловская область	0	0	0	0	34	0	0	0	0	8	3	0	0	4	4	0	53	1.7
Акватория Северного Ледовитого океана	1	0	0	3	0	2	0	0	10	1	0	0	0	0	10	23	50	1.6
Оренбургская область	0	7	0	4	0	0	0	0	0	0	3	0	0	11	4	0	29	0.9
Ненецкий а.о.**	3	0	0	0	0	4	0	10	7	0	0	0	0	0	0	2	26	0.8
Республика Марий Эл	0	2	8	1	1	0	0	0	0	0	0	2	9	2	0	1	26	0.8

* Сумма попадания точек траекторий на территорию региона.

** Автономная область.

пересекавших промышленные зоны городов Соликамск и Березники, в которых осуществляется производство минеральных удобрений. Поэтому можно предположить, что повышение в снеге основных катионов обусловлено захватом примесных компонентов с этих промышленных территорий.

Для территории исследования в связи с некоторыми аномальными погодными особенностями в зимний сезон 2019–2020 гг. была показана малая доля переносов со стороны севера и Северного Ледовитого океана. В связи с этим низка роль влияния морского аэрозоля, что подтверждается соотношениями $([Na^+] + [Mg^{2+}]) / ([K^+] + [Ca^{2+}])$ и $[Na^+] / [Ca^{2+}]$, значения которых в основном были значительно < 1 . Эти соотношения указывают на преобладание терригенной составляющей в поступающих осадках на территории исследования. Значения этих отношений в среднем составили 0.14 и 0.12 соответственно. При том что за период исследования не было отмечено выраженного влияния морского аэрозоля, выделяется четкая взаимосвязь между содержанием в снеге ионов натрия и хлорид-ионов ($r_{Na^+ \div pH} = 0.44$, $r_{pH \div Cl} = 0.40$ при $r_{5\%} = 0.28$). Периоды, когда наблюдалось некоторое повышение содержания этих компонентов в талой воде и значений pH – 7, 8, 16. Векторный анализ траекторий переноса воздушных

масс показал, что в данные периоды была высока доля ветров с севера и северо-запада (около 40%) (рис. 3а). При южных направлениях значения pH, как правило, были более низкими. К примеру, в 4–6-й периоды, когда на южные направления приходилось около 80 переносов, среднее значение pH составило 5.4 (рис. 3б).

При анализе динамики накопления химических компонентов в снежном покрове была выделена группа показателей (S, V, ТОС, $\Sigma МК^-$ суммарное содержание макрокомпонентов в снеге), для которой отмечены достоверно значимые тренды роста содержания от начала снегонакопления к началу снеготаяния (рис. 4). Общие механизмы миграции веществ подтверждаются значимыми уровнями коэффициентов корреляции: $r_{S \div V} = 0.30$, $r_{S \div Ni} = 0.34$, $r_{S \div ТОС} = 0.68$ (при $r_{5\%} = 0.28$).

Неполное сжигание углеводородов обуславливает насыщение атмосферы сажевым углеродом, а также такими примесными компонентами, как ванадий и никель. Так, согласно данным литературы, нефтепродукты, в т.ч. мазут, имеют высокое содержание как ванадия, так и никеля (Yakubov et al., 2016). Высокий уровень содержания этих элементов встречается также в угле (Юдович, Золотова, 1994),

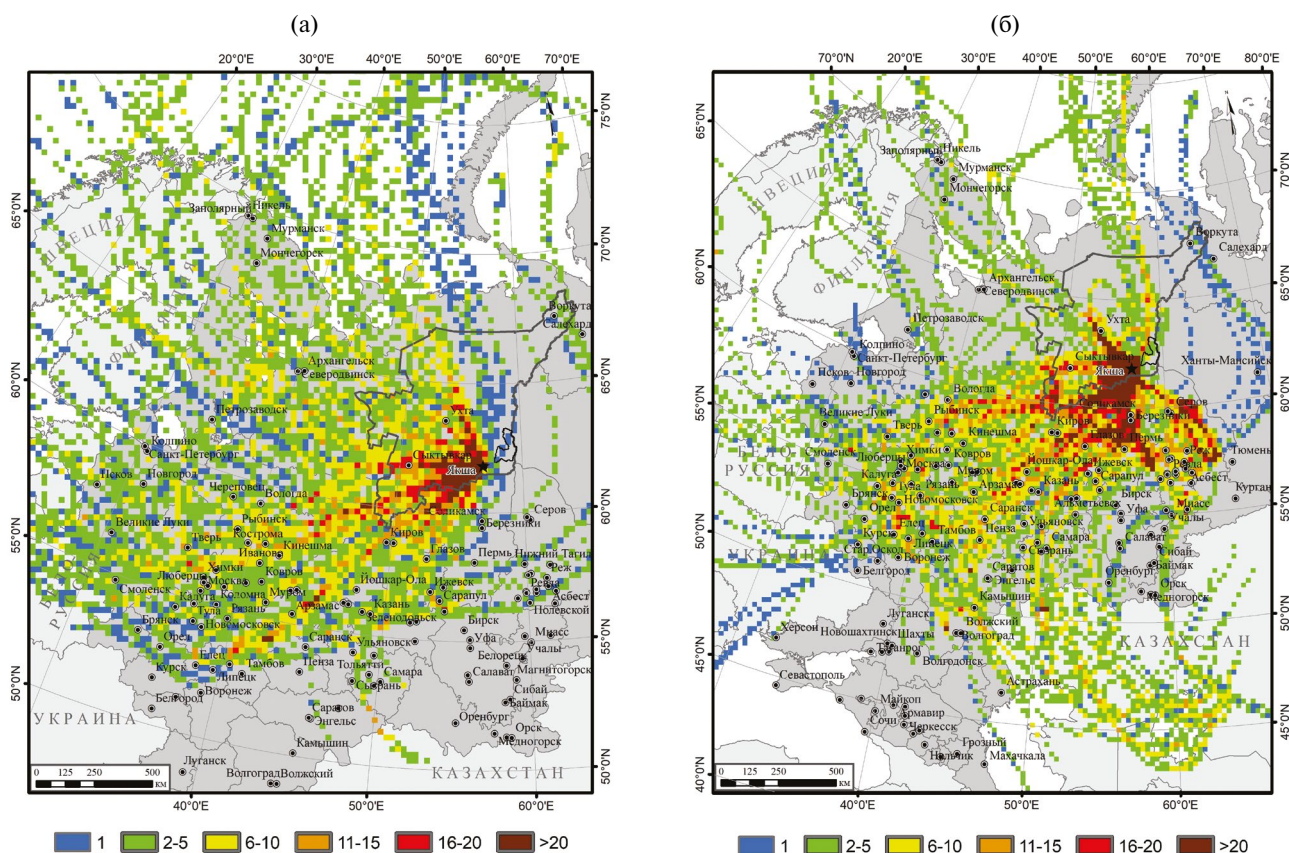


Рис. 3. Траектории переноса воздушных масс в 7, 8 и 16-й (а) и в 4-й и 6-й периоды накопления и отбора снега (б).

что обуславливает их повышенное поступление в составе снега вокруг ТЭС (Василевич и др., 2018 а).

Нужно отметить, что резкое возрастание этих веществ в результате сжигания углеводородов в снеге наблюдалось периодически и совпало с периодами наиболее обильных выпадений осадков (3, 7, 8, 11, 15, 16) при преобладании переносов с юга и юго-запада из более индустриально развитых регионов. Наиболее интенсивное поступление общей серы было отмечено в снеге в 11, 15 и 16-й периоды (см. табл. 2). Эти периоды исследования в целом характеризуются относительно большей степенью выпадения макрокомпонентов – 0.09–0.12 г/м².

Максимальное выпадение никеля отмечено в 8, 11 и 16-й периоды отбора, когда также преобладали юго-западные направления переноса. Однако нет возможности выделить какой-то отдельный регион, который мог стать источником поступления данного компонента в атмосферу и атмосферные осадки, выпавшие в районе размещения экспериментальной площадки (рис. 5).

Так, обильные осадки в 8-й период приходились на 13 января, что соответствовало переносу с северо-запада, воздушные потоки пересекали террито-

рию Мурманской области (г. Заполярный). В 11-й период при обильном снегопаде 4 февраля результативно происходил перенос воздушных масс через территорию многих промышленных регионов – Кировской области, Пермского края, Удмуртии, Татарстана и Башкортостана, что весьма осложняет идентификацию источника загрязнения. В 16-й период также преобладало юго-западное направление переноса воздушных масс к территории исследования.

Анализ сажевого углерода в талой воде из осадка на фильтре показал, что его содержание не имеет выраженного тренда и меняется в течение периода исследования, в то время как максимальное содержание сажевого углерода в атмосфере показано в 11–13-й периоды отбора (рис. 6).

В этот период наблюдались минимальные температуры воздуха, что могло приводить к усилению «отопительного пресса», когда увеличивается эмиссия продуктов сжигания углеводородов и в большем количестве образуются сферы сжигания. При этом отмечалось преобладание южных и юго-западных переносов, доля которых составила более 70%, что обусловило некоторый добавочный эффект, поскольку

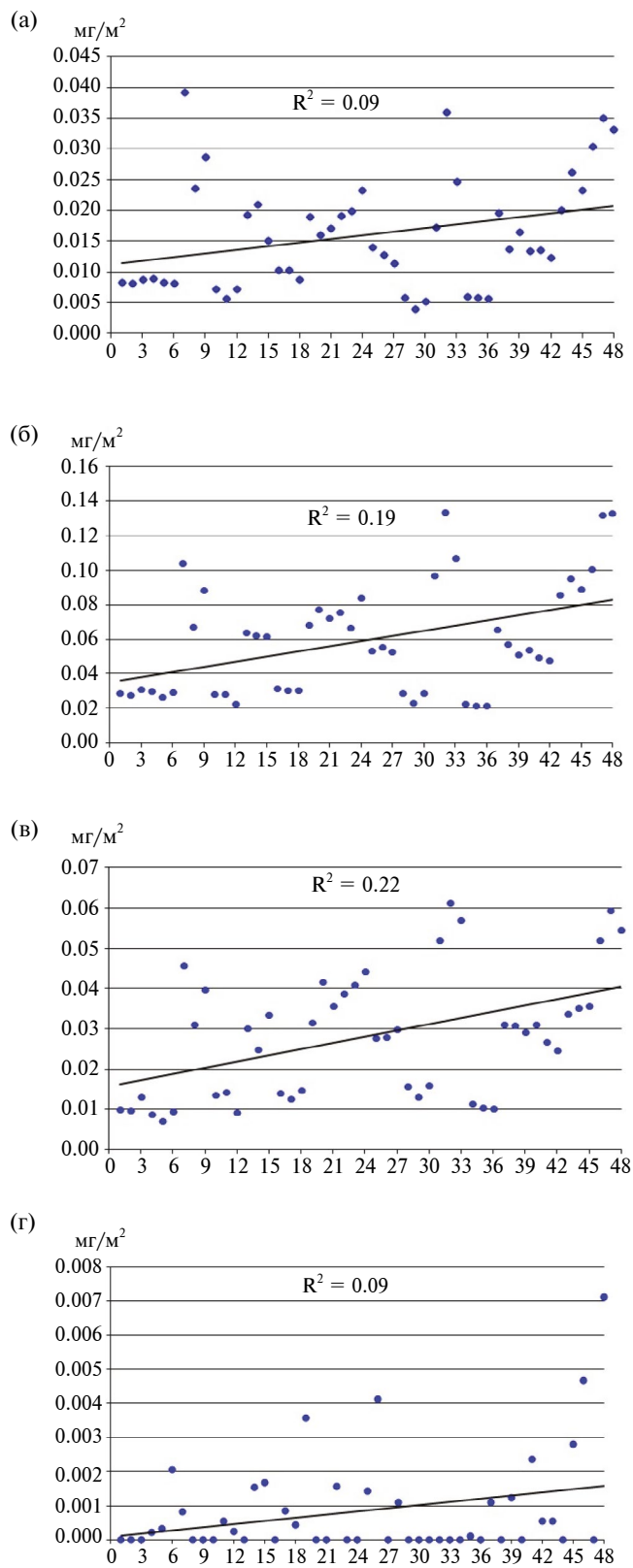


Рис. 4. Тренды суммарного содержания макрокомпонентов (а), общей серы (б), общего органического углерода (в) и ванадия (г) (по оси абсцисс порядковый номер пробы).

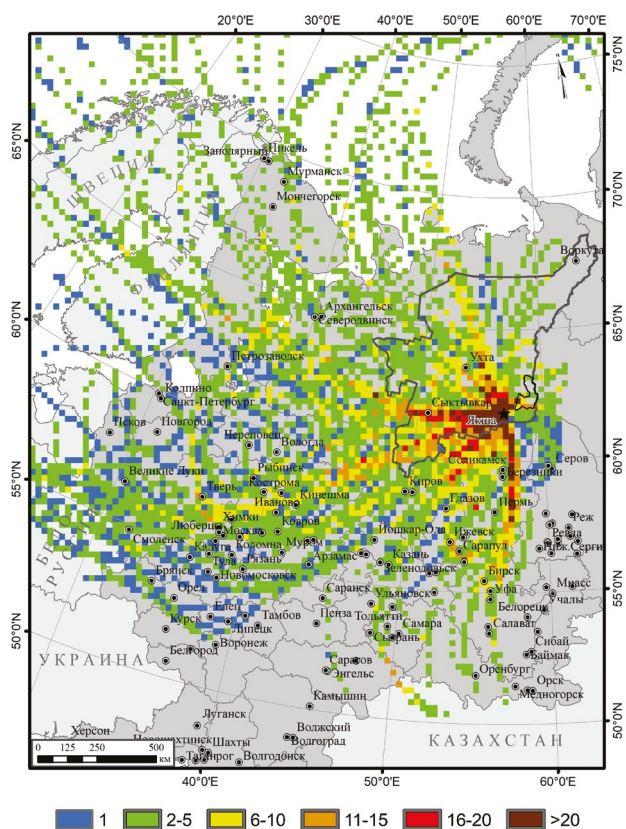


Рис. 5. Траектории переноса воздушных масс в 8, 11 и 16-й периоды накопления и отбора снега.

эмиссия поллютантов с юга определенно выше потоков поллютантов с севера в силу большей плотности размещения населенных пунктов и промышленных предприятий. Кроме того, оценка корреляционных взаимосвязей показала высокую степень сродства между содержанием в снеге сажевого углерода и других предполагаемых продуктов сжигания углеводородов: общего органического углерода, общей серы и ванадия: $r_{\text{сажа} \div \text{сажа}} = 0.65$, $r_{\text{сажа} \div \text{V}} = 0.34$, $r_{\text{сажа} \div \text{ТОС}} = 0.82$.

Начиная с 3-й декады января отмечено увеличение среднего содержания в снеге меди, что обусловлено юго-западными направлениями ветров. Анализ содержания меди в снеге показал, что максимальное поступление этого компонента зафиксировано в 9, 13 и 16-й периоды отбора. Поэтому мы выполнили построение результирующего растра траекторий переноса воздушных масс для этих временных отрезков. Векторный анализ при этом указывал на г. Киров, как вероятный источник эмиссии, где развито машиностроение и металлообработка, металлургическое производство (рис. 7) (О состоянии..., 2022).

Ранее было показано, что существует тренд в сторону увеличения содержания меди в осадках с севера на юг Республики Коми (Василевич, Василевич, 2018 б), что не противоречит полученным в настоящей работе результатам.

Отмечено трехкратное увеличение содержания свинца в 5-й период отбора в сравнении со средним значением за весь зимний сезон, что с большой вероятностью обусловлено направлением дальнего переноса. Наиболее обильный снегопад отмечен 24 декабря, когда, судя по траекториям, полученным SWT-методом, произошел захват территории городов Свердловской области, в выбросах предприятий которых, согласно данным информационной системы «Почвенно-географическая база данных России», отмечено высокое содержание свинца: Екатеринбург, Невьянск, Алапаевск, Нижний Тагил, Реж, Ревда, Сухой Лог (<https://soil-db.ru/>). Для 5-го периода отмечается «пиковое» за сезон влияние воздушных масс, прошедших территорию Свердловской области (табл. 3).

Если не считать точки прохождения траекторий по территории Республики Коми, то преобладающая доля точек расположена в Пермском крае, Кировской, Архангельской, Вологодской, Костромской Свердловской областях, в Республиках Башкортостан, Татарстан и Удмуртия (табл. 3).

В целом картина переносов за зимний период 2019–2020 гг. на территорию исследования повторяет средние характеристики атмосферной циркуляции, наблюдаемые в прежние периоды исследований. Как и обычно, для данной территории преобладали юго-западные (77%), западные и южные ветры (15%), согласно данным расчета траекторий. Хотя можно отметить несколько большую, чем обычно, долю переносов с запада. Наблюдалась очень малая доля переносов с севера, и в целом северные направления были мало выражены (6%). Также не более 2% приходилось на переносы с востока от площадки исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ динамики химических параметров снега в Печоро-Илычском биосферном заповеднике (п. Якша) в зимний период 2019–2020 гг. Снеговые воды на территории заповедника, как и в других таежных ландшафтах региона, характеризуются низкой минерализацией. Расчет средних значений содержания основных ионов талых вод показал, что в сравнении с равнинной территорией таежной зоны в заповеднике эффективнее происходит нейтрализация кислотообразующих компонентов и повышается величина pH за счет увеличения содержания ионов кальция и магния.

Выделены факторы, которые обуславливают формирование геохимических параметров снега. Особенности атмосферной циркуляции и регионы, с территорий которых происходит перенос воздушных масс, во многом определяют насыщение осадков теми или иными химическими компонентами. Показано, что на значение кислотности талых вод влияют соединения серы, содержание которой увеличивается с понижением температур воздуха

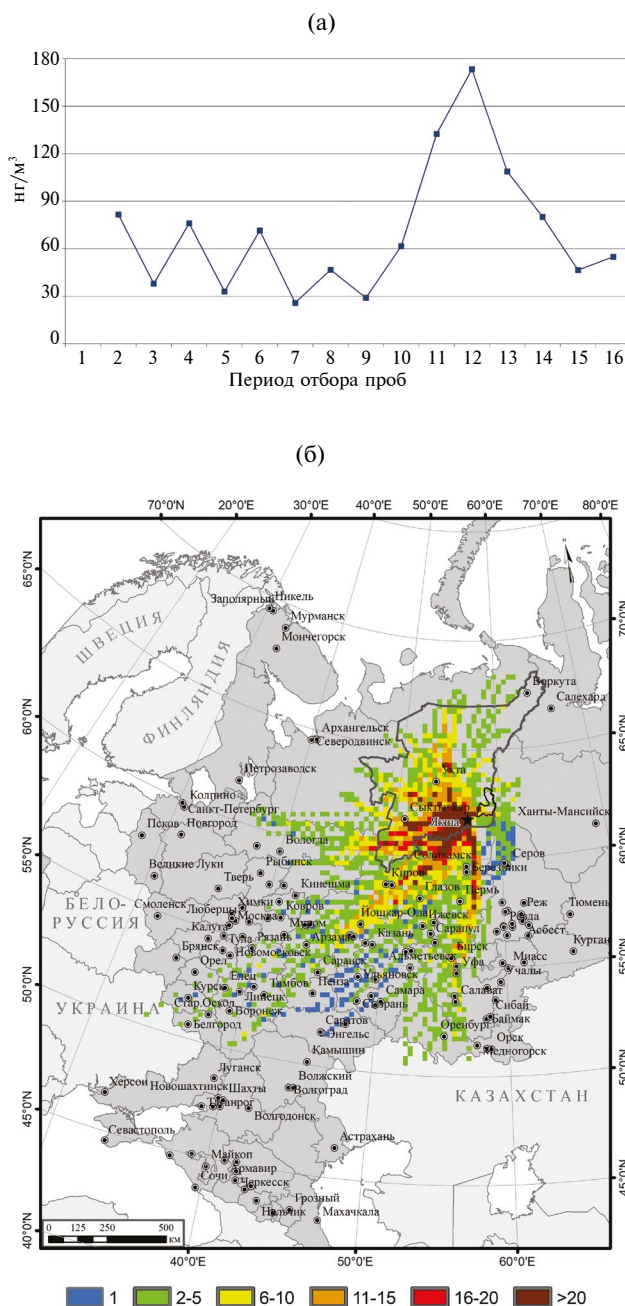


Рис. 6. Содержание сажевого углерода в атмосферном воздухе (а) и траектории переноса воздушных масс в 11–13-й периоды отбора (б).

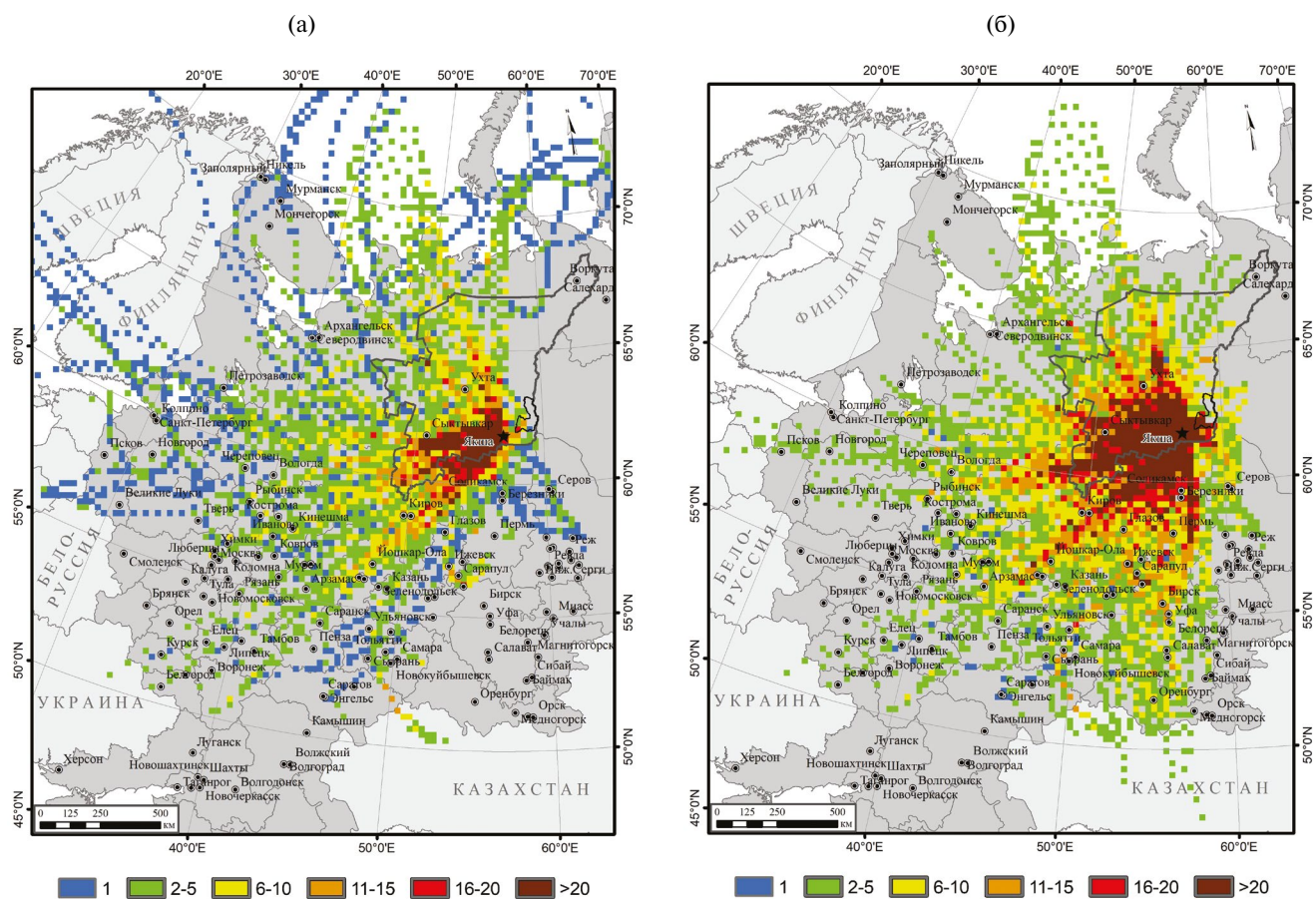


Рис. 7. Траектории переноса воздушных масс в 9, 13 и 16-й (а) и в 10–16-й периоды накопления и отбора снега (б).

и продолжительностью отопительного сезона. В целом анализ талых вод показал увеличение в атмосфере от начала к окончанию зимнего периода продуктов сжигания углеводородов. Также отмечены достоверные тренды увеличения содержания в атмосферных осадках ванадия, примерно в 3 раза, общего органического углерода – в 2.5 раза, серы – в 2 раза. При переносах воздушных масс с севера отмечается увеличение в снеге содержания ионов натрия и хлорид-ионов.

Расчет траекторий обратного переноса воздушных масс позволил выявить регионы, где формировались воздушные массы, приходящие на область исследования, и определяющие химический состав осадков. Траектории преимущественно пересекают территории Пермского края, Кировской, Архангельской, Вологодской, Костромской и Свердловской областей, Башкортостана, Татарстана и Удмуртии, что обусловлено доминированием южных и западных ветров в период наблюдения. Наиболее частые города на пути прохождения воздушных масс: Череповец, Вологда, Киров, Соликамск, Казань, Набережные Челны. Показано, что расчет

траекторий позволяет оценить регионы – источники поступления загрязнителей в атмосферу. В целом такой способ изучения химического состава снега весьма информативен и позволяет лучше понять факторы его формирования.

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам экоаналитической лаборатории за высококвалифицированный труд при выполнении количественного химического анализа. Также авторы очень благодарны научному редактору М.И. Дину и рецензентам за ценные замечания и чуткое внимание к статье.

Работа была выполнена в рамках бюджетной темы (№ 122040600026–9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антохин П. Н., Аршинова В. Г., Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Белан С. Б., Давыдов Д. К., Ивлев Г. А., Козлов А. В., Рассказчикова Т. М., Фофанов А. В. (2010) Блокирующая роль Уральских гор в трансграничном переносе примесей из Европы в Азию. *Оптика атмосферы и океана*. 23(11), 937–941.

- Баранова Д. Ю., Моисеенко Т. И., Дину М. И. (2020) Геохимические закономерности формирования атмосферных выпадений в условно фоновом районе Валдайского национального парка. *Геохимия*. **65**(10), 1025–1040.
- Baranova D. Yu., Moiseenko T. I., Dinu M. I. (2020) Geochemical Trends in the Formation of Atmospheric Precipitation in the Conditionally Background Area of the Valdai National Park. *Geochem. Int.* **58**(10), 1159–1173.
- Василевич М. И., Кондратёнок Б. М., Безносиков В. А. (2011) Химический состав снежного покрова на территории таежной зоны Республики Коми. *Водные ресурсы*. **38**(4), 494–506.
- Василевич М. И., Безносиков В. А., Кондратенко Б. М. (2015) Накопление растворимых и малорастворимых форм металлов в снежном покрове таежной зоны Европейского северо-востока России. *Геоэкология*. (2), 111–118.
- Василевич М. И., Симакин Л. В. (2017) Особенности формирования химического состава снежного покрова на территории Печоро-Ильчского биосферного заповедника. *Геоэкология*. (5), 48–56.
- Василевич М. И., Василевич Р. С., Шамрикова Е. В. (2018а) Поступление загрязняющих веществ с зимними атмосферными осадками на территорию Воркутинской агломерации. *Водные ресурсы*. **45**(3), 244–254.
- Василевич М. И., Василевич Р. С. (2018б) Особенности накопления тяжелых металлов эпифитными лишайниками в таежной зоне фоновых территорий Европейского Северо-Востока России. *Экология*. (1), 17–23.
- Василенко Н. В., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. (1985) Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 182 с.
- Виноградова А. А., Иванова Ю. А. (2013) Загрязнение воздушной среды в центральной Карелии при дальнем переносе антропогенной примеси в атмосфере. *Известия Российской академии наук. Серия Географическая*. (5), 98–108.
- Кондратьев И. И. (2014) Трансграничный перенос аэрозоля и кислотных осадков на дальний восток. Владивосток: Дальнаука, 300 с.
- Ларионова Е. А. (2004) Тяжелые металлы в горно-таежных ландшафтах (на примере заповедников «Басеги» и «Вишерский»). Автореф. ... канд. географ. наук. Пермь: Перм. гос. ун-т, 23 с.
- О состоянии окружающей среды Кировской области в 2021 году: Региональный доклад. (2022) Киров, 220.
- Тентюков М. П., Шукуров К. А., Белан Б. Д., Симоненков Д. В., Игнатьев Г. В., Михайлов В. И. (2023) Геохимические маркеры застойных зон в городском острове тепла. *Геохимия*. **68**(1), 90–104.
- Tentyukov M. P., Shukurov K. A., Belan B. D., Simonenkov D. V., Ignatjev G. V., Mikhailov V. I. (2023) Geochemical Markers of Stagnant Zones in an Urban Heat Island. *Geochem. Int.* **61**(1), 82–94.
- Хайрулина Е. А., Ворончихина Е. А. (2007) Оценка современного биогеохимического состояния заповедных экосистем Пермского края. *Вестник Пермского университета*. **5**(10), 55–160.
- Юдович Я. Э., Золотова В. В. (1994) Элементы примеси в углях Печорского бассейна. *Народное хозяйство Республики Коми*. **3**(1), 16–26.
- Dong Z. W., Kang S. C., Qin X. F., Li D. H. and Qin J. W. (2015). Ren New insights into trace elements deposition in the snow packs at remote alpine glaciers in the northern Tibetan Plateau, China. *Sci. Total Environ.* **529**, 101–113.
- Gabrielli P., Cozzi G., Torcini S., Cescon P., Barbante C. (2008) Trace elements in winter snow of the Dolomites (Italy): A statistical study of natural and anthropogenic contributions. *Chemosphere*. **72**, 1504–1509.
- Gao Y., Yang C., Ma J. and Yin M. (2018). Characteristics of the trace elements and arsenic, iodine and bromine species in snow in east-central China, *Atmospheric Environ.*, **174**, 43–53.
- Ghosh S., Biswas J., Guttikunda S., Roychowdhury S., Nayak M. (2015) An investigation of potential regional and local source regions affecting fine particulate matter concentrations in Delhi, India. *J Air Waste Manag Assoc.* **65**(2), 218–231.
- Han D. F., Q, Gao S., Zhang X., Feng, J, Chen X., Huang X. (2019). Investigate the impact of local iron – steel industrial emission on atmospheric mercury concentration in Yangtze River Delta, China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **26**, 5862–5872.
- Hong Xu, Xiao-Hui Bi, Yin-Chang Feng. (2011) Chemical composition of precipitation and its sources in Hangzhou, China. *Environmental Monitoring and Assessment*. **183**(1–4), 581–592.
- Khodzher V., Golobokova L. P., Osipov E. Yu., Shibaev Yu. A., Lipenkov V. Ya., Osipova O. P., Petit J. R. (2014) Spatial-temporal dynamics of chemical composition of surface snow in East Antarctica along the Progress station–Vostok station transect. *The Cryosphere*. **8**, 931–939.
- Liu C., Fu X., Zhang H., Ming L., Xu H., Zhang L., Feng X. (2019). Sources and outflows of atmospheric mercury at Mt. Changbai, northeastern China. *Science of the total environment*. **663**, 275–284.
- Murphy D. M., Froyd K. D., Bian H., Brock C. A., Dibb J. E., DiGangi J. P., Diskin G., Dollner M., Kupc. A., Scheuer E. M., Schill G. P., Weinzierl B., Williamson C. J., Yu P. (2019) The distribution of sea-salt aerosol in the global troposphere. *Atmos. Chem. Phys.* **19**, 4093–4104.
- Palamodova L. A. (2021) The formation of snow cover in the city of Arkhangelsk according to observations of 2018–2019. *Bull. Magistr.* **3**(2), 114.
- Rodland E. S., Lind O. C., Reid M. J., Heier L. S. and Okoforo E. D. (2022). Occurrence of tire and road wear particles in urban and peri-urban snowbanks, and their potential environmental implications. *Sci. Total Environ.* **824**:153785
- Salvador P., Artinano B., Pio C., et al. (2010) Evaluation of aerosol sources at European high altitude background sites with trajectory statistical methods. *Atm. Environment*. **44**, 2316–2329.
- Shinkorenko M. P., Smolyakov B. S. (2004) Meteorological Effects on the Ionic Composition of Atmospheric Aerosols and Precipitates in West Siberia. *Chemistry for sustainable development*. **12**, 631–640.
- Talovskaya A. V., Yazikov E. G., Osipova N. A., Lyapina E. E., Litay V. V., Metreveli G., Kim J. (2019) Mercury pollution in snow cover around thermal power plants in cities (Omsk, Kemerovo, Tomsk regions, Russia). *Geography, Environment, Sustainability*. **04** (2), 132–147.
- Walker T. R., Crittenden P. D., Young S. D. (2003) Regional variation in the chemical composition of winter snow pack and terricolous lichens in relation to sources of acid emissions in the Usa river basin, northeast European Russia. *Environ. Pollution*. **125**, 401–412.
- Yakubov M. R., Milordov D. V., S. G. Yakubova, Borisov D. N., Ivanov V. T., Sinyashin K. O. (2016) Concentrations of vanadium and nickel and their ratio in heavy oil asphaltenes. *Petroleum Chemistry*. **56**, 16–20.

THE INFLUENCE OF ATMOSPHERIC CIRCULATION ON THE SEASONAL DYNAMICS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF SNOW COVER IN THE PECHORA-ILYCHSKY RESERVE

M. I. Vasilevich^{a, *}, N. S. Smirnov^b

^a*Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Kommunisticheskaya st., 28, Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russia*

^b*Pechora-Ilychsky State Reserve, Laninoj st., 8, Yaksha village, Komi Republic, 169436 Russia*

*e-mail: mvasilevich@ib.komisc.ru

Received: July 13, 2023

Revised: December 5, 2023

Accepted: December 15, 2023

The analysis of the layer-by-layer dynamics of snow chemical parameters in one of the observation points in the Pechora-Ilych biosphere reserve (Yaksha village) in the winter period 2019–2020 was carried out. It is shown that the chemical composition of atmospheric precipitation is more affected by long-range transport of substances. The peculiarities of atmospheric circulation and the regions from which air masses are transferred determine the saturation of precipitation with certain chemical components. The calculation of the trajectories of reverse transport of air masses allowed us to show the regions where air masses can form that come to the research area, carry substances and potentially form the chemical composition of precipitation. It is shown that the calculation of trajectories allows us to estimate the regions that are sources of pollutants entering the atmosphere. In general, this method of studying the chemical composition of snow is very informative and allows you to better understand the factors of its formation.

Keywords: monitoring in the reserve, layer-by-layer selection, snow cover, quantitative chemical analysis, backward trajectory of air mass transportation