

УДК 551.551

АНОМАЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ДЫМОВОГО АЭРОЗОЛЯ В ВИДИМОЙ И БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА

© 2023 г. Г. И. Горчаков^{1,*}, Р. А. Гушин¹, В. М. Копейкин¹, А. В. Карпов¹, Е. Г. Семутникова²,
О. И. Даценко¹, Т. Я. Пономарева³

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 09.01.2023 г.

Поступило 09.01.2023 г.

После доработки 06.02.2023 г.

Принято к публикации 08.02.2023 г.

В крупномасштабном задымлении во время массовых пожаров в бореальных лесах Аляски в июле 2019 г. в видимой и ближней инфракрасной областях спектра (440–1020 нм) по данным мониторинга на сети станций AERONET спектральных зависимостей мнимой части коэффициента преломления обнаружено аномальное поглощение тонкодисперсного дымового аэрозоля. Проанализированы вариации спектральных зависимостей аэрозольных оптических толщин ослабления (экстинкции) и поглощения, а также функции распределения частиц аэрозоля по размерам. При аномальном поглощении мнимая часть коэффициента преломления с ростом длины волны света от 440 до 1020 нм увеличивалась в 1.8–7.2 раза, достигнув значения 0.315 для длины волны 1020 нм. Предложена степенная аппроксимация спектральной зависимости мнимой части коэффициента преломления с показателями степени примерно от 0.7 до 2.3.

Ключевые слова: крупномасштабные лесные пожары, дымовой аэрозоль, оптические и микрофизические характеристики, аэрозольная оптическая толщина, распределение частиц по размерам, мнимая часть коэффициента преломления, аномальное поглощение в видимой и ближней инфракрасной областях спектра

DOI: 10.31857/S2686739723600030, **EDN:** FGJJXY

ВВЕДЕНИЕ

Крупномасштабные задымления радикально трансформируют радиационный режим атмосферы [1, 2]. Образующийся при массовых пожарах дымовой аэрозоль и малые газовые примеси, включая угарный газ, негативно влияют на экологическую обстановку [3]. Об оптических и микрофизических характеристиках (ОМХ) дымового аэрозоля можно судить по данным мониторинга тропосферного аэрозоля на глобальной сети станций AERONET [4]. На сайте AERONET (aeronet.gsfc.nasa.gov) кроме данных измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) ослабления (экстинкции) τ_{ex} и индикатрисы яркости неба представлены результаты восстановления [5] (для

длин волн 440, 675, 870 и 1020 нм) спектральных зависимостей действительной (n) и мнимой (κ) части коэффициента преломления вещества, τ_{ex} для тонкодисперсной и грубодисперсной фракций аэрозоля (τ_r и τ_c), АОТ поглощения (τ_{ab}), альбедо однократного рассеяния (ω), параметра асимметрии индикатрисы рассеяния и функции распределения частиц аэрозоля по размерам в представлении $dV(r)/d \ln r$, где r — радиус частицы и $V(r)$ — накопленный объем частиц.

Ранее нами были выполнены исследования [6–8] крупномасштабных задымлений Северной Евразии в XXI веке и, в частности, крупномасштабного задымления в июле 2016 г., когда восточный перенос воздушных масс привел к распространению сибирской дымной мглы на европейскую территорию России и далее на запад [9, 10]. При дальнем переносе сибирской дымной мглы наблюдалось снижение поглощательной способности дымового аэрозоля, обусловленное конденсацией на частицах дымового аэрозоля не поглощающих в видимой области спектра летучих органических соединений, которые образуются при фотохимической трансформации газовых составляющих дымной мглы [10] в процессе дальнего переноса задымленных воздушных масс.

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России, Москва, Россия

*E-mail: gengor@ifaran.ru

В первой декаде XXI века были выполнены исследования оптических и микрофизических характеристик дымового аэрозоля при массовых лесных пожарах на территории Аляски с использованием данных AERONET [11]. В связи с тем, что в эпоху потепления климата в атмосфере усиливаются многие негативные для человека процессы, нами были проанализированы последствия массовых лесных пожаров на территории Аляски в июле 2019 г.

В частности, интерес представляли изменения поглотительной способности дымового аэрозоля (ПСА). При анализе ПСА по данным AERONET наибольшее внимание, как правило, уделяется вариациям альbedo однократного рассеяния [12] $\omega(\lambda) = \tau_{sc}(\lambda)/\tau_{ex}(\lambda)$, где λ — длина волны света, τ_{sc} — аэрозольная оптическая толщина рассеяния и $\tau_{ex} = \tau_{sc} + \tau_{ab}$. Часто анализируются результаты измерений АОТ поглощения τ_{ab} . Однако $\omega(\lambda)$ и $\tau_{ab}(\lambda)$ зависят от распределения частиц аэрозоля по размерам. Поэтому при диагностике ПСА целесообразно, в первую очередь, использовать спектральные зависимости мнимой части коэффициента преломления $\kappa(\lambda)$.

Целью настоящей работы является исследование вариаций ОМХ дымового аэрозоля при массовых пожарах в бореальных лесах Аляски в июле 2019 г. с использованием данных AERONET (уровень L1.5, версия 3) и, в первую очередь, выявление основных типов спектральных зависимостей мнимой части коэффициента преломления вещества дымового аэрозоля. Показано, что наряду с многочисленными случаями неселективного поглощения в области спектра 440–1020 нм, которое определяется присутствием в частицах аэрозоля черного углерода (black carbon или BC) [13] и сравнительно часто наблюдаемыми спектрами $\kappa(\lambda)$ с повышенными значениями κ на длине волны 440 нм, которые обусловлены наличием в частицах дымового аэрозоля (наряду с черным углеродом) органических соединений, которые имеют полосу поглощения в ультрафиолетовой и в коротковолновой части видимой области спектра (brown carbon или BrC) [14–16].

В июле 2019 г. в ряде случаев наблюдалось аномальное поглощение дымового аэрозоля, которое, очевидно, обусловлено наличием в частицах дымового аэрозоля вещества (или веществ) с полосой поглощения, как минимум, в области спектра 440–1020 нм. В работе приведены результаты измерений спектральных зависимостей АОТ ослабления и функции распределения частиц по размерам, которые иллюстрируют доминирующую роль тонкодисперсной фракции в процессах рассеяния и поглощения электромагнитного излучения дымовым аэрозолем (для области спектра 440–1020 нм), в том числе, для случаев неселективного поглощения. Обсуждаются вариации

АОТ поглощения и альbedo однократного рассеяния при массовых лесных пожарах на территории Аляски в июле 2019 г.

В работе использовались результаты мониторинга оптических и микрофизических характеристик тропосферного аэрозоля при крупномасштабном задымлении территории Аляски в июле 2019 г. на станциях AERONET: Bonanza_Creek (сокращенно BZC) с координатами 64°45' с.ш. и 148°32' з.д., Kluane_Lake или KNL (61°02' с.ш., 138°24' з.д.) и NEON_DEJU или NDU (63°32' с.ш., 145°45' з.д.).

С целью сравнения в работе приведены некоторые результаты мониторинга характеристик дымового аэрозоля при пожарах в саванне на станции AERONET Mongu_Inn или MGI (15°16' ю.ш., 23°08' в.д.) в августе 2022 г.

МНИМАЯ ЧАСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ДЫМОВОГО АЭРОЗОЛЯ

В [11] представлены результаты исследования вариации ОМХ дымового аэрозоля при массовых пожарах в бореальных лесах Аляски в 2004 и 2005 г.

Показано, что в большинстве случаев ПСА определялась содержащимся в частицах аэрозоля черным углеродом (сажей), для которого характерна слабая зависимость мнимой части коэффициента преломления κ вещества аэрозоля от длины волны света λ [13].

Аномальные спектры $\kappa(\lambda)$ в области длин волн от 440 нм до 1020 нм наблюдались и при крупномасштабном задымлении территории Аляски в июле 2019 г. (1–5 на рис. 1). Спектры 1, 3, 4 и 5 получены по данным мониторинга на станции Bonanza_Creek, а спектр 2 — по данным станции Kluane_Lake. Для сравнения показан аналогичный спектр (6 на рис. 1) с использованием данных мониторинга на станции Mongu_Inn в августе 2022 г. при пожаре в саванне. Информация об ОМХ дымового аэрозоля во время проведения измерений рассматриваемых спектров содержится в табл. 1.

В табл. 1 приведены значения (для длины волны 440 нм) АОТ ослабления, в том числе, отдельно для тонкодисперсной и грубодисперсной фракций аэрозоля (τ_f^{440} и τ_c^{440}), значения действительной и мнимой части коэффициента преломления вещества дымового аэрозоля и соответствующие значения альbedo однократного рассеяния.

Кроме того, в табл. 1 содержатся значения показателей β_{ex} и β_{ab} степенных аппроксимаций спектральных зависимостей $\tau_{ex}(\lambda)$ и $\tau_{ab}(\lambda)$ для диапазона длин волн 440–870 нм (показатели Ангстрёма) для АОТ ослабления и поглощения $\tau(\lambda) = \tau_0 (\lambda_0/\lambda)^\beta$, где τ_0 , λ_0 и β — параметры ап-

проксимации, а также максимальные значения v_m^f распределения $dV(r)/d \ln r$ для тонкодисперсной фракции аэрозоли и соответствующие радиусы частиц r_m^f , при которых достигаются указанные максимумы.

В [11] отмечено, что при крупномасштабных задымлениях Аляски в 2004 и 2005 г. на поглощательную способность дымового аэрозоля влияло присутствие в частицах коричневого углерода. Однако количественные оценки этого влияния в [11] не приведены.

На рис. 1 показаны спектры $\kappa(\lambda)$, полученные по данным измерений в задымленной атмосфере Аляски в июле 2019 г., на которых заметно влияние коричневого углерода на длине волны 440 нм (спектры 7–9). Подобные спектры наблюдались и при пожарах в саванне в августе 2022 г. (спектр 10).

При анализе данных мониторинга (уровень L1.5) OMX дымового аэрозоля во время массовых лесных пожаров на территории Аляски в июле 2019 г. было обнаружено аномальное поглощение в области длин волн 440–1020 нм по спектрам $\kappa(\lambda)$ (спектры 11–15 на рис. 1). Отметим, что из 74 измерений OMX на станции Bonanza_Creek в июле 2019 г. 15 случаев нами отнесены к ситуациям с заметными проявлениями аномального поглощения дымового аэрозоля.

Наибольший интерес представляют спектры $\kappa(\lambda)$ 11 и 15 (табл. 1 и рис. 1), зарегистрированные на станциях AERONET NEON_DEJU 10.07 в 15:45 и Bonanza_Creek 23.07 в 17: 53 соответственно. При изменении длины волны от 440 до 1020 нм мнимая часть коэффициента преломления на

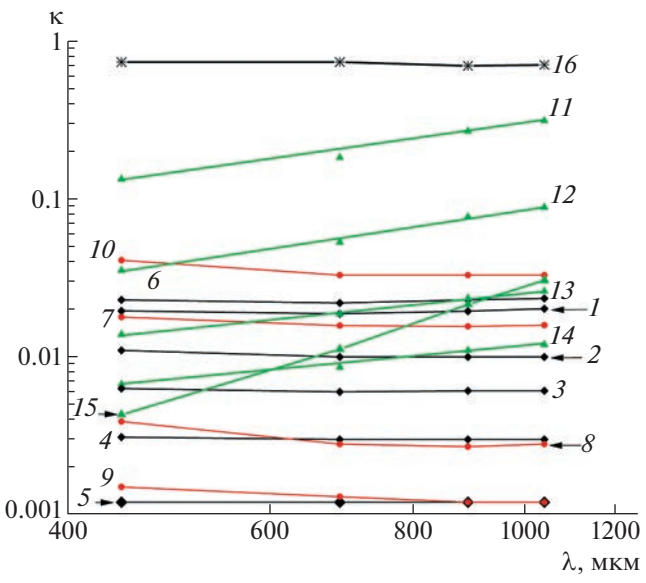


Рис. 1. Спектральные зависимости мнимой части коэффициента преломления вещества дымового аэрозоля при наличии в частицах аэрозоля черного углерода (кривые 1–6), коричневого и черного углерода (кривые 7–10) и для случаев аномального поглощения в области спектра 440–1020 нм (кривые 11–15). Спектральная зависимость для черного углерода – 16.

станции NEON_DEJU (спектр 11) увеличилась с 0.134 до 0.315. Предложена степенная аппроксимация аномальных спектров $\kappa(\lambda) = A\lambda^\alpha$, где A и α – параметры аппроксимации. Для спектров 11–14 указанный показатель степени варьирует в диапазоне от 0.7 до 1.05. Максимальная скорость

Таблица 1. Оптические и микрофизические параметры дымового аэрозоля

№	Станция	Дата	Время	τ_{ex}^{440}	β_{ex}	τ_f^{440}	τ_c^{440}	τ_{ab}^{440}	β_{ab}	n_{440}	κ_{440}	ω_{440}	r_m^f	v_m^f
1	BZC	08.07.19	23:00	3.57	1.55	3.55	0.017	0.32	1.26	1.54	0.020	0.91	0.194	0.40
2	KNL	10.07.19	19:21	4.53	1.80	4.50	0.031	0.24	1.46	1.59	0.011	0.95	0.194	0.40
3	BZC	11.07.19	02:27	1.58	1.69	1.56	0.019	0.06	1.27	1.46	0.0063	0.96	0.148	0.196
4	BZC	10.07.19	17:33	1.66	1.80	1.61	0.048	0.0032	1.28	1.49	0.0031	0.98	0.148	0.21
5	BZC	23.07.19	01:01	0.255	1.44	0.25	0.008	0.002	1.23	1.55	0.0012	0.99	0.148	0.022
6	MGI	24.08.22	14:04	0.52	1.67	0.48	0.004	0.065	1.08	1.55	0.023	0.88	0.148	0.046
7	BZC	09.07.19	01:00	3.09	1.63	3.07	0.017	0.25	1.43	1.55	0.018	0.92	0.148	0.20
8	BZC	12.07.19	00:00	3.15	1.24	3.11	0.057	0.08	1.69	1.50	0.0039	0.98	0.255	0.22
9	KNL	07.07.19	04:06	0.33	1.79	0.32	0.005	0.0035	1.46	1.44	0.0015	0.99	0.255	0.037
10	MGI	16.08.22	14:05	1.00	1.92	0.97	0.027	0.167	1.51	1.60	0.041	0.83	0.148	0.095
11	NDU	10.07.19	15:45	1.91	0.96	1.90	0.009	0.72	0.24	1.58	0.134	0.62	0.148	0.154
12	BZC	05.07.19	22:59	0.115	1.01	0.11	0.005	0.018	0.16	1.58	0.035	0.84	0.194	0.01
13	KNL	05.07.19	19:19	0.26	1.36	0.26	0.003	0.018	0.5	1.58	0.014	0.93	0.194	0.023
14	BZC	31.07.19	21:01	0.40	1.39	0.38	0.017	0.019	0.44	1.48	0.0067	0.95	0.148	0.042
15	BZC	23.07.19	17:53	0.57	1.16	0.54	0.033	0.022	–0.91	1.54	0.0043	0.96	0.194	0.039

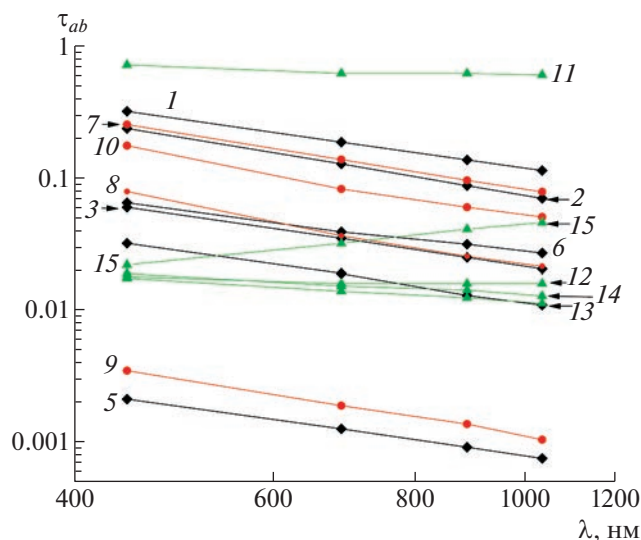


Рис. 2. Спектральные зависимости аэрозольной оптической толщины поглощения дымового аэрозоля при наличии в частицах аэрозоля черного углерода (кривые 1–6), коричневого и черного углерода (кривые 7–10) и для случаев аномального поглощения в области спектра 440–1020 нм (кривые 11–15).

роста к увеличению длины волны достигла ($\alpha = 2.3$) в случае спектра 15. Изменчивость аномальных спектров $\kappa(\lambda)$, по-видимому, обусловлена вариациями относительных вкладов аномального и неселективного поглощения и возможными изменениями формы полосы аномального поглощения.

Таким образом, в видимой и ближней инфракрасной области спектра при массовых пожарах в бореальных лесах Аляски обнаружена широкая полоса поглощения дымового аэрозоля.

АЭРОЗОЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНА ПОГЛОЩЕНИЯ

Важной характеристикой поглощательной способности тропосферного аэрозоля является аэрозольная оптическая толщина поглощения. Спектральные зависимости АОТ поглощения представлены на рис. 2. В случаях 1–6, когда ПСДА определяется черным углеродом, спектральные зависимости АОТ поглощения с удовлетворительной точностью аппроксимируются степенными функциями с показателями Ангстрёма β_{ab} , рассчитанными для диапазона длин волн 440–870 нм, от 1.08 до 1.46 (табл. 1). Как известно, для малых частиц при слабой зависимости κ от длины волны АОТ поглощения пропорционально λ^{-1} [17] ($\beta_{ab} = 1$). Для больших частиц показатель Ангстрёма близок к 1.3 [17]. Согласно приведенным в табл. 1 данным значения β_{ab} в июле 2019 г. на станции Bonanza_Creek (спектры

1, 3–5) находились в диапазоне 1.23–1.28, что соответствует ранее опубликованным данным.

Заметные отклонения наблюдались для спектров $\tau_{ab}(\lambda)$, зарегистрированных на станциях Kluane_Lake ($\beta_{ab} = 1.46$) и Mongu_Inn ($\beta_{ab} = 1.08$).

При наличии коричневого углерода в частицах дымового аэрозоля (спектры 7–10) показатели Ангстрёма для АОТ поглощения увеличиваются до 1.43–1.69, в том числе, для спектров, зарегистрированных на станциях Kluane_Lake и Mongu_Inn (9 и 10).

Спектральные зависимости АОТ поглощения при аномальном поглощении в видимой и ближней инфракрасной областях спектра (11–15 на рис. 2) существенно отличаются от предыдущих. В большинстве подобных случаев (11–14) АОТ поглощения сравнительно слабо зависит от длины волны ($\beta_{ab} = 0.24$ –0.5). Исключением является спектральная зависимость, зарегистрированная на станции Bonanza_Creek 23.07.2019 в 17:53 (15 в табл. 1), когда имеет место быстрый рост τ_{ab} с увеличением длины волны от 0.022 на длине волны 440 нм до 0.046 на длине волны 1020 нм (показатель Ангстрёма – 0.91). Следует отметить большие наблюдаемые значения АОТ поглощения на станции NEON DEJU 10.07.2019 в 15:45 0.72 на длине волны 440 нм и 0.61 на длине волны 1020 нм.

Еще одной характеристикой ПСДА является альбеда однократного рассеяния (табл. 1). Однако четко выраженных закономерностей изменчивости $\omega(\lambda)$ связанных с аномальным поглощением дымового аэрозоля выявить не удалось. Отметим необычно низкие значения ω (от 0.62 до 0.32 при изменении длины волны от 440 до 1020 нм) на станции NEON DEJU 10.07.2019 в 15:45 (спектр 11). Таким образом, выявлено существенное отличие спектральных зависимостей характеристик ПСДА в случаях аномального селективного поглощения дымового аэрозоля в видимой и ближней области спектра.

АЭРОЗОЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНА ОСЛАБЛЕНИЯ

Уровень задымления атмосферы определяется аэрозольной оптической толщиной ослабления. В частности, поток прямой солнечной радиации на подстилающей поверхности для длины волны 440 нм при $\tau_{ex} = 4.53$ при зенитном угле Солнца 44° (2 в табл. 1) был ослаблен примерно в 500 раз. На рис. 3 представлены зависимости от длины волны АОТ ослабления. Они с удовлетворительной точностью аппроксимируются степенными функциями (аппроксимация Ангстрёма). Для приведенных в табл. 1 случаев, когда поглощение прямой солнечной и рассеянной радиации в видимой и ближней инфракрасной областях спек-

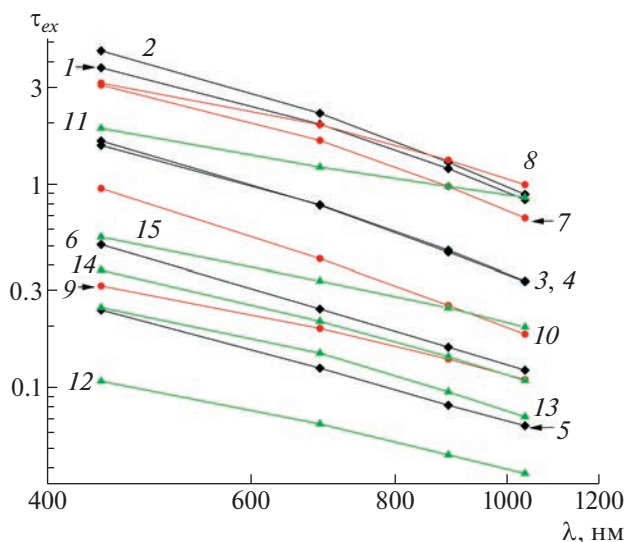


Рис. 3. Спектральные зависимости аэрозольной оптической толщины ослабления дымового аэрозоля при наличии в частицах аэрозоля черного углерода (кривые 1–6), коричневого и черного углерода (кривые 7–10) и для случаев аномального поглощения в области спектра 440–1020 нм (кривые 11–15).

тра в частицах аэрозоля определяется черным углеродом (1–6 в табл. 1), в том числе, и при пожарах в саванне (табл. 1), показатель Ангстрёма β_{ex} варьирует в пределах от 1.44 до 1.80.

Появление коричневого углерода в частицах дымового аэрозоля (в дополнение к присутствующим там черному углероду) приводит, в среднем, очевидно, к небольшому увеличению β_{ex} . При малых вкладах коричневого углерода это влияние сравнительно мало, что характерно для рассмотренных нами случаев (7–10 в табл. 1), когда β_{ex} менялся в пределах от 1.24 до 1.92. При крупномасштабных задымлениях часто наблюдаются отклонения от степенной аппроксимации $\beta_{ex}(\lambda)$, обусловленные вариациями формы распределения частиц по размерам для тонкодисперсной фракции частиц дымового аэрозоля [18].

В случаях аномального поглощения наблюдается заметное снижение показателя Ангстрёма для АОТ ослабления диапазон изменения (0.96–1.39). Минимальное значение $\beta_{ex} = 0.96$ зарегистрировано на станции NEON_DEJU. 10.07.2019 в 15:45 (11 в табл. 1), которое нельзя объяснить вкладом в $\tau_{ex}(\lambda)$ грубодисперсной фракции аэрозоля (он не превышает 1%).

Таким образом, в случае аномального поглощения дымового аэрозоля возникают существенные изменения спектральной зависимости АОТ от ослабления, которое приводит к значительным уменьшениям β_{ex} (в 1.5 раза и больше).

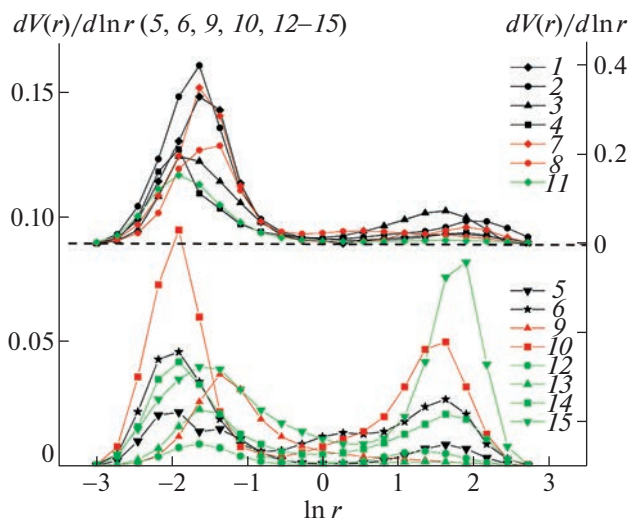


Рис. 4. Функции распределения частиц дымового аэрозоля по объемам при наличии в частицах аэрозоля черного углерода (кривые 1–6), коричневого и черного углерода (кривые 7–10) и для случаев аномального поглощения в области спектра 440–1020 нм (кривые 11–15).

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ДЫМОВОГО АЭРОЗОЛЯ ПО РАЗМЕРАМ

На сайте AERONET представлены усредненные по толще атмосферы функции распределения частиц аэрозоля по радиусам r диапазоне изменения r от 0.05 до 15 мкм. На рис. 4 показаны распределения объемов по размерам $dV(r)/d \ln r$ (в относительных единицах) для дымового аэрозоля, восстановленные по данным мониторинга на станциях AERONET (уровень L1.5) на территории Аляски, включая Bonanza_Creek, Klunane_Lake и NEON_DEJU во время крупномасштабных задымлений в июле 2019 г., а также (для сравнения) распределения, зарегистрированные при массовых пожарах в саванне в августе 2022 г. На наблюдаемых распределениях (рис. 4) отчетливо выделяются тонкодисперсная (субмикронная) и грубодисперсная фракции (mode) аэрозоля. Нетрудно видеть, что в дымовом аэрозоле доминирует тонкодисперсная фракция с модальными радиусами примерно 0.15 до 0.25 мкм, что согласуется с опубликованными ранее результатами [11]. При малых содержаниях дымового аэрозоля в толще атмосферы в суммарный объем частиц аэрозоля может вносить заметный вклад фракция грубодисперсного аэрозоля.

Представляет интерес природа аномального поглощения дымового аэрозоля в видимой и ближней инфракрасной области спектра.

В монографии [19] (стр. 365) указано, что “дым, выделяющийся при сгорании топлив, состоит, главным образом, из сажи, смолы и золы. Частицы сажи или копоти образуют черный дым.

Мелкие частицы жидких или полужидких смолистых веществ обладают желтым или коричневым оттенком". Указанный оттенок цвета дыма свидетельствует о селективном поглощении дымового аэрозоля. Летом 2002 г. в Шатурском районе при лесо-травяных пожарах в Московской области нами были собраны аэрозольные пробы (с целью количественной оценки концентрации сажевого аэрозоля в задымленном воздухе), которые имели желтый цвет, что можно объяснить наличием смолы в частицах дымового аэрозоля. Эксперимент показал, что при возгонке канифоли образуется аэрозоль, который при сборе аэрозольных проб на кварцевый волокнистый фильтр образует желтую пленку.

Важную роль при образовании дымового аэрозоля при лесных пожарах на территории Аляски летом 2019 г. могли играть метеорологические условия во время пожаров и в предшествующий пожарам период времени. Летом 2019 г. Национальная метеорологическая служба США, а также центр ФОБОС, сообщали, что в июле 2019 г. были зарегистрированы рекорды температуры воздуха на Аляске. Более того, июль 2019 г. был 12-м месяцем подряд, когда на Аляске температура воздуха почти каждый день была выше нормы (<http://www.rp5.ru>; <http://www.ncdc.noaa.gov/>). Отметим, что в случае лесных пожаров на Аляске в 2004 и 2005 гг. длительных повышений температуры воздуха не было.

Вопрос о природе аномального поглощения нуждается в дополнительном исследовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным мониторинга оптических и микрофизических характеристик дымового аэрозоля на станциях AERONET при массовых пожарах в boreальных лесах Аляски в июле 2019 г. были обнаружены аномальные спектры поглощения дымового аэрозоля в видимой и ближней инфракрасной области спектра (диапазон длин волн 440–1020 нм). Установлено, что при наличии указанного аномального поглощения мнимая часть коэффициента преломления вещества дымового аэрозоля достигала 0.315 на длине волны 1020 нм. Предложена степенная аппроксимация спектральных зависимостей мнимой части коэффициента преломления. Согласно данным мониторинга показатель степени, характеризующий скорость роста мнимой части коэффициента преломления с увеличением длины волны, варьирует от 0.7 до 2.3.

Проанализированы вариации спектральных зависимостей аэрозольных оптических толщин ослабления и поглощения с использованием степенных аппроксимаций, для которых показатели степени являются известными показателями Ангстрёма для спектров ослабления и поглоще-

ния. В отличие от часто наблюдаемых значений показателя Ангстрёма для спектра поглощения дымового аэрозоля (1.08–1.69) в табл. 1 при появлении аномального поглощения указанные показатели Ангстрёма снижаются до 0.16–0.5, а в одном случае он оказался отрицательным (–0.91). Уменьшается и показатель Ангстрёма для аэрозольной оптической толщины ослабления (в среднем с 1.65 до 1.18). Доминирующей фракцией дымового аэрозоля при наличии аномального поглощения, так же, как и в его отсутствие, является фракция тонкодисперсного аэрозоля.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Г.С. Голицына за полезные советы и команду AERONET за возможность использования данных мониторинга оптических и микрофизических характеристик тропосферного аэрозоля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мохов И.И., Горчакова И.А. // ДАН. 2005. Т. 400. № 4. С. 528–531.
2. Панченко М.В., Журавлева Т.Б., Козлов В.С. и др. Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 45–54.
3. Голицын Г.С., Горчаков Г.И., Гречко Е.И. и др. // ДАН. 2011. Т. 441. № 4. С. 532–538.
4. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., et al. // Remote Sensing of Environ. 1998. V. 66. № 1. P. 1–16.
5. Dubovik O., King M.D. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № D16. P. 20673–20696.
6. Горчаков Г.И., Аникин П.П., Волох А.А. и др. // ДАН. 2003. Т. 390. № 2. С. 251–254.
7. Горчаков Г.И., Аникин П.П., Волох А.А. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 366–380.
8. Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Семутникова Е.Г. и др. // ДАН. 2011. Т. 437. № 5. С. 686–690.
9. Горчаков Г.И., Голицын Г.С., Ситнов С.А. и др. // ДАН. 2018. Т. 482. № 2. С. 209–212.
10. Горчаков Г.И., Ситнов С.А., Карпов А.В. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 41–51.
11. Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., et al. // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2009. V. 114. D11208.
12. Dubovik O., Holben B.N., Eck T.F., et al. // J. Atm. Sci. 2002. V. 59. № 3. Part 2. P. 590–608.
13. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1986. 256 с.
14. Feng Y., Ramanathan V., Kotamarthi V.R. // Atm. Chem. Phys. 2013. V. 13. № 17. P. 8607–8621.
15. Горчаков Г.И., Васильев А.В., Веричев К.С. и др. // ДАН. 2016. Т. 471. № 1. С. 91–97.
16. Gorchakov G.I., Karpov A.V., Vasiliev A.V., Gorchakova I.A. // Atmos. Oceanic Opt. 2017. V. 30. № 3. P. 248–254.
17. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A., et al. // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35. № 15. P. 5698–5721.
18. Bergstrom R.W., Russell P.B., Hignett P. // J. Atm. Sci. 2002. V. 59. № 3. Part P. 567–577.
19. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли-пыли, дымы и туманы. Л.: Химия. 1969. 427 с.

ANOMALOUS ABSORPTION OF SMOKE AEROSOL IN THE VISIBLE AND NEAR-INFRARED OF SPECTRUM INTERVALS

G. I. Gorchakov^{a,#}, R. A. Gushchin^a, V. M. Kopeikin^a, A. V. Karpov^a, E. G. Semoutnikova^b,
O. I. Datsenko^c, and T. Ya. Ponomareva^a

^a*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russian Federation*

^c*Hydrometeorological Research Center of Russia, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: gengor@ifaran.ru*

Presented by Academician of the RAS G.S. Golitzyn January 9, 2023

In large-scale smoke haze during mass fires in the boreal forests of Alaska in July 2019 in the visible and near infrared of spectrum intervals 440–1020 nm, according to monitoring data on the network of AERONET stations of the spectral dependences of the refractive index imaginary part, anomalous absorption of the fine smoke aerosol was found. Variations in the spectral dependences of the aerosol optical extinction and absorption depths, as well as the size distribution function of aerosol particles, are analyzed. With anomalous absorption, the imaginary part of the refractive index increased by a factor of 1.8–7.2 with increasing wavelength from 440 to 1020 nm, reaching a value of 0.315 for the wavelength of 1020 nm. A power-law approximation of the spectral dependence of the refractive index imaginary part with exponents approximately from 0.7 to 2.3 is proposed.

Keywords: large-scale forest fires, smoke aerosol, optical and microphysical characteristics, aerosol optical depth, particle size distribution, imaginary part of refractive index, anomalous absorption, visible and near infrared spectrum intervals