

УДК 551.521.3

Моделирование радиационного форсинга дымового аэрозоля в Арктике с использованием данных измерений в Большой аэрозольной камере ИОА СО РАН

И.М. Насртдинов^{✉1}, П.Н. Зенкова¹, Т.Б. Журавлева¹,
В.Н. Ужегов¹, И.Б. Коновалов^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт прикладной физики РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Поступила в редакцию 26.10.2022 г.;
после доработки 22.11.2022 г.;
принята к печати 25.01.2022 г.

Приводятся результаты экспериментов, проведенных в Большой аэрозольной камере ИОА СО РАН для изучения оптических характеристик дымового аэрозоля при длительном времени его старения (до 2–3 сут). Представлены оценки влияния эволюции дымов на радиационный форсинг дымового аэрозоля (РФА) на верхней границе атмосферы в Арктике в летнее время. Показано, что для пиролизных дымов основным фактором, определяющим временную зависимость РФА, является эволюция аэрозольной оптической толщины, а для смешанных дымов необходимо дополнительно учитывать временную изменчивость альбедо однократного рассеяния аэрозольных частиц. Рассматривается зависимость РФА от типов подстилающей поверхности и условий освещенности, характерных для Арктики, для разных режимов горения сжигаемой массы.

Ключевые слова: пиролизные и смешанные дымы, оптические характеристики аэрозоля, временная изменчивость, радиационный форсинг аэрозоля, Арктика; pyrolysis and mixed smokes, aerosol optical characteristics, temporal variability, aerosol radiative forcing, Arctic.

Введение

Лесные пожары являются одним из основных источников углеродсодержащих аэрозолей, оказывающих значимое влияние на радиационный баланс атмосферы [1]. Дымовые шлейфы могут распространяться на большие расстояния от источника возгорания, в частности дымы сибирских пожаров могут достигать удаленных районов Арктики и быть одной из причин наблюдаемого роста температуры в этом регионе [2].

Недостаток информации о том, как именно происходит трансформация оптических и микрофизических свойств дымового аэрозоля, есть причина неопределенностей в модельных оценках его радиационного воздействия при распространении над исследуемой территорией. Один из способов получить более точные оценки радиационных характеристик —

использование в расчетах данных натурных и лабораторных измерений [1, 3]. Исследования оптических, микрофизических и физико-химических свойств дымового аэрозоля на протяжении многих лет выполняются в Большой аэрозольной камере (БАК) ИОА СО РАН [4–7].

Цель настоящей работы — получение оценок РФА на верхней границе атмосферы (ВГА) при характерных для Арктики условиях освещенности (зенитный угол Солнца $SZA \geq 50$) и типов подстилающей поверхности (водная поверхность, тундра) на основе результатов измерений дымовых характеристик в БАК в 2021–2022 гг. при различных режимах горения растительности (пиролиз и открытое пламенное горение) и массах сжигаемого вещества.

Описание эксперимента

Для моделирования дымов лесных пожаров в БАК (объем 1800 м³) в режиме пламенного и тлеющего горения сжигалась древесина сосны. Горючий материал помещался в две муфельные печи, в одной из которых температура горения составляла 700 °С (открытое пламенное горение), а в другой — 400 °С

* Ильмир Мансурович Насртдинов (wizard@iao.ru); Полина Николаевна Зенкова (zpn@iao.ru); Татьяна Борисовна Журавлева (ztb@iao.ru); Виктор Николаевич Ужегов (uzhegov@iao.ru); Игорь Борисович Коновалов (konov@ipfran.ru)

(тлеющее горение). Смешанные дымы моделировались с использованием обеих печей одновременно. Параметр MIX, определяющий долю пламенного горения, рассчитывался исходя из массы M сжигаемого материала (СМ) в каждой из печей по формуле $MIX = M_{горения} / (M_{тления} + M_{горения})$. Для проведения последующих радиационных расчетов были отобраны эксперименты, соответствующие пиролизным дымам (MIX = 0%, тлеющее горение, работала только одна печь) и смешанным дымом с преобладанием тлеющей фазы горения (MIX до 7,3%). Масса сожженного материала составляла 20 и 100 г.

В экспериментах предполагалось измерение характеристик дымов в процессе старения от 2-х до 3-х сут. Для создания освещения, имитирующего солнечное излучение в УФ-диапазоне длин волн, по всему периметру камеры были установлены 198 ультрафиолетовых ламп Cosmedico со спектром излучения 0,3–0,4 мкм [7]. Анализ дымовых характеристик выполнялся с момента, когда дым равномерно перемешивался во всем объеме БАК, а коэффициент аэрозольного ослабления достигал максимальных значений. В это же время включались лампы первый раз на несколько часов с последующим их отключением и далее включались и отключались с некоторым интервалом в зависимости от продолжительности эксперимента.

Коэффициенты аэрозольного ослабления и направленного светорассеяния были получены из измерений в освещенных условиях. Массовая концентрация поглощающего аэрозольного вещества измерялась двухканальным аэталометром МДА-04 [8] с последующим разделением на компоненты: черный (BC) и коричневый (BrC) углерод [6].

Оптические характеристики дымового аэрозоля

Комплекс оптических характеристик дымового аэрозоля (коэффициент ослабления, альбеда однократного рассеяния (АОР) и фактор асимметрии (ФА) индикатрисы рассеяния излучения) рассчитывался в предположении сферичности частиц с использованием подхода [9] в видимом диапазоне спектра 0,44–0,69 мкм. Распределения частиц по размерам непоглощающего аэрозоля и поглощающего вещества задавались на основе результатов работ [10, 11]. Комплексный показатель преломления сухой основы аэрозоля моделировался как функция радиуса частиц по правилу смеси [12], действительная и мнимая части комплексного показателя преломления непоглощающего аэрозоля равны

1,5 и 0 соответственно, а для поглощающего вещества взяты из работ [13, 14]. Учет трансформации объемной концентрации аэрозоля при изменении относительной влажности воздуха RH осуществлялся по формуле А.Г. Лактионова [15]. Параметр конденсационной активности дымового аэрозоля полагался равным 0,1 [11].

На рис. 1 представлены оптические характеристики дымов, полученные в ходе четырех выбранных экспериментов (таблица) (далее — дым 1, 2, 3, 4). Поскольку масса СМ определяет степень замутнения, для удобства анализа была проведена нормировка временного хода коэффициента аэрозольного ослабления σ таким образом, чтобы в начальный момент времени $\sigma(0,55 \text{ мкм}) = 2 \text{ км}^{-1}$ во всех случаях.

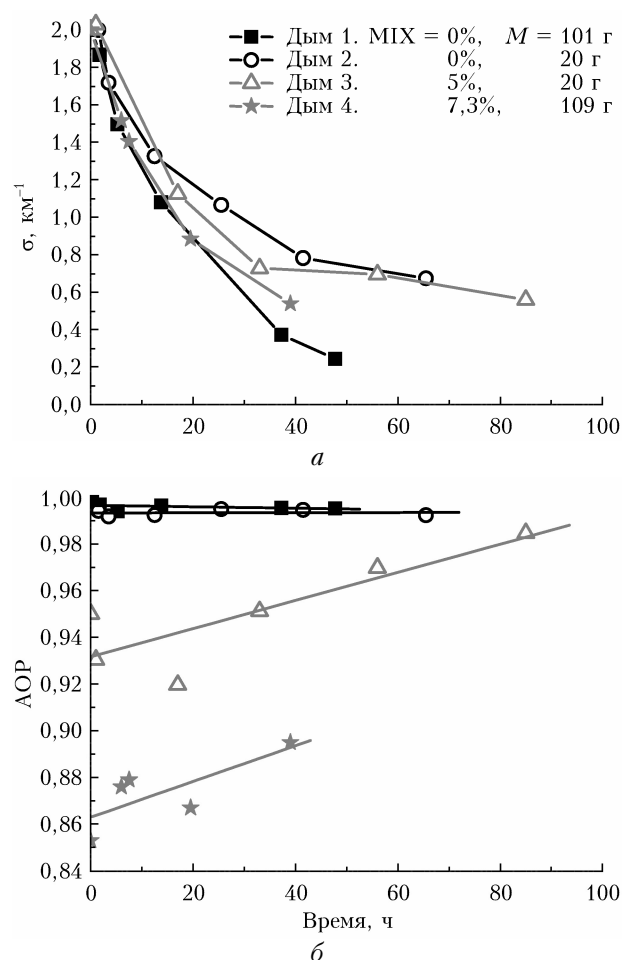


Рис. 1. Эволюция оптических характеристик дымового аэрозоля: коэффициент аэрозольного ослабления (а); альбеда однократного рассеяния аэрозоля (б); $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$

Характеристики дымов, полученных в БАК в ходе четырех экспериментов

Дым	Дата	M, г	MIX, %	RH, %	α^*	ФА
1	11–13.09.21	101	0	47–51	0,75	0,72–0,77
2	16–19.03.22	20	0	5–35	2,5	0,5–0,6
3	07–11.04.22	20	5	35–76	1,8	0,45–0,65
4	18–20.09.21	109	7,3	48–52	0,9–1,1	0,6–0,8

* α — показатель Ангстрема.

Из рис. 1 следует, что временной ход $\sigma(0,55 \text{ мкм})$ примерно совпадает в экспериментах с одинаковой массой СМ, причем для большей массы СМ $\sigma(0,55 \text{ мкм})$ уменьшается быстрее (рис. 1, а). Показатель Ангстрема α зависит от режима горения и массы сжигаемого вещества: при сжигании 20 г древесины $\alpha = 2,5$ и 1,8 для пиролизного и смешанного дыма, а для массы 100 г — 0,75 и 0,9–1,1 соответственно (таблица). Отметим, что показатель Ангстрема практически не меняется на протяжении всех экспериментов, за исключением дыма 4. Для пиролизного дыма вне зависимости от массы СМ $\text{AOP} \approx 1$ и практически не меняется в пределах рассматриваемого диапазона длин волн (рис. 1, б). С ростом доли дыма открытого горения возрастает содержание поглощающего вещества и, как следствие, AOP уменьшается. Также следует отметить, что AOP смешанных дымов увеличивается со временем (рис. 1, б), что может быть связано с образованием вторичного органического аэрозоля [16].

Моделирование радиационного форсинга дымового аэрозоля

Полученные в ходе экспериментов оптические характеристики дымового аэрозоля были использованы для расчета широкополосных потоков солнечного излучения и оценки РФА в Арктике. Структура и состав модели атмосферы, которая использовалась для исследования переноса солнечной радиации, подробно описаны в [17]. Отражение излучения от подстилающей поверхности (ПП) определялось законом Ламберта со спектральным альбедо, соответствующим двум типам ПП, характерным для арктической зоны: «тундра» и «вода» [18].

Моделирование выполнено в предположении, что дымовой шлейф располагался на высоте 0–1 км. Формирование оптической модели атмосферы, которая использована в качестве фоновой для Арктики в летний период, описано в [17]: $\text{AOT}(0,55 \text{ мкм}) = 0,064$, $\text{AOP} = 0,95$ [19]. В пределах дымового слоя оптические характеристики смеси «фон + дым» определялись как результат сложения (аддитивно — для коэффициентов ослабления, взвешенного — для AOP и Φ_A) соответствующих характеристик фоновой и дымового аэрозоля.

Расчеты широкополосных потоков солнечной радиации в диапазоне 0,2–5 мкм проводились с помощью статистического алгоритма [20] для $\text{SZA} = \{50^\circ, 75^\circ\}$. Радиационный форсинг дымового аэрозоля на ВГА ($\Phi_{\text{ВГА}}$) вычисляется как разность потоков уходящего с ВГА излучения в фоновой и задымленной атмосфере (см., например, [17]).

Отметим, что эволюция оптических характеристик реальных дымовых шлейфов не может быть в полной мере описана результатами лабораторных экспериментов, проводимых в контролируемых условиях. Пространственно-временная изменчивость характеристик дымового аэрозоля при дальнем переносе регулируется совокупностью целого ряда метеорологических факторов (температура и влажность

окружающего воздуха, стратификация атмосферы, осадки, скорость и направление ветра на разных высотах), изменением свойств ПП, а также газового и аэрозольного состава атмосферы в области пространства, которая подвергается вторжению дымового шлейфа и т.д. Поэтому полученные в ходе экспериментов результаты используются в настоящем исследовании исключительно для выявления некоторых качественных особенностей радиационного воздействия, обусловленных «старением» дымового аэрозоля.

На рис. 2, а приведены значения $\Phi_{\text{ВГА}}$ при $\text{SZA} = 50^\circ$ для четырех рассматриваемых экспериментов. Временная зависимость $\Phi_{\text{ВГА}}$ имеет сложный характер и определяется режимом горения. Для пиролизных дымов, характеризующихся близким к единице альбедо однократного рассеяния, имеет место выраженная связь между временным ходом оптической толщины и $\Phi_{\text{ВГА}}$: с уменьшением AOT (см. рис. 1, а) $\Phi_{\text{ВГА}}$ увеличивается (абсолютная величина $\Phi_{\text{ВГА}}$ уменьшается, т.е. эффект выхолаживания ослабляется). В смешанных дымах на формирование временного хода $\Phi_{\text{ВГА}}$ оказывает влияние не только изменение AOT , но и альбедо однократного рассеяния. В частности, временная изменчивость $\Phi_{\text{ВГА}}$ для дыма 3 (после ~15:00) и 4 (AOP

изменяется в диапазонах 0,93–0,99 и 0,86–0,9) близка к нейтральной, что является следствием конкурентного влияния двух эффектов: выхолаживание на уровне ВГА ослабляется при уменьшении оптической толщины и усиливается по мере роста AOP . При умеренном поглощении эти эффекты могут компенсировать друг друга (дым 3), а при более сильном поглощении (дым 4) характер изменения и величина $\Phi_{\text{ВГА}}$ в большей степени зависят от изменения поглощательной способности аэрозоля.

На рис. 2, б представлены изменения $\Phi_{\text{ВГА}}$ при вариациях типа ПП и зенитного угла Солнца. Количественной мерой изменения определим величину $\Delta\Phi$:

$$\Delta\Phi_{\text{ПП}} = \Phi_{\text{тундра}} - \Phi_{\text{вода}},$$

$$\Delta\Phi_{\text{SZA}} = \Phi_{\text{SZA}=75} - \Phi_{\text{SZA}=50}.$$

При распространении дымового шлейфа над «тундрой», альбедо которой выше, чем альбедо «воды», практически во всем рассматриваемом спектральном диапазоне, эффект выхолаживания ослабляется ($\text{SZA} = 50^\circ$, рис. 2, б). Отметим, что над сильно отражающими поверхностями (например, снег или лед) при наличии в атмосфере поглощения знак $\Phi_{\text{ВГА}}$ может измениться на положительный [17], но в случае пиролизных дымов (при практически консервативном рассеянии) эффект выхолаживания сохранится. В процессе старения дыма различия в $\Phi_{\text{ВГА}}$, обусловленные влиянием разных типов ПП, уменьшаются в связи с уменьшением со временем AOT .

С увеличением зенитного угла Солнца уменьшается поток солнечной радиации, приходящий на ВГА, и, как следствие, РФА уменьшается по абсолютной

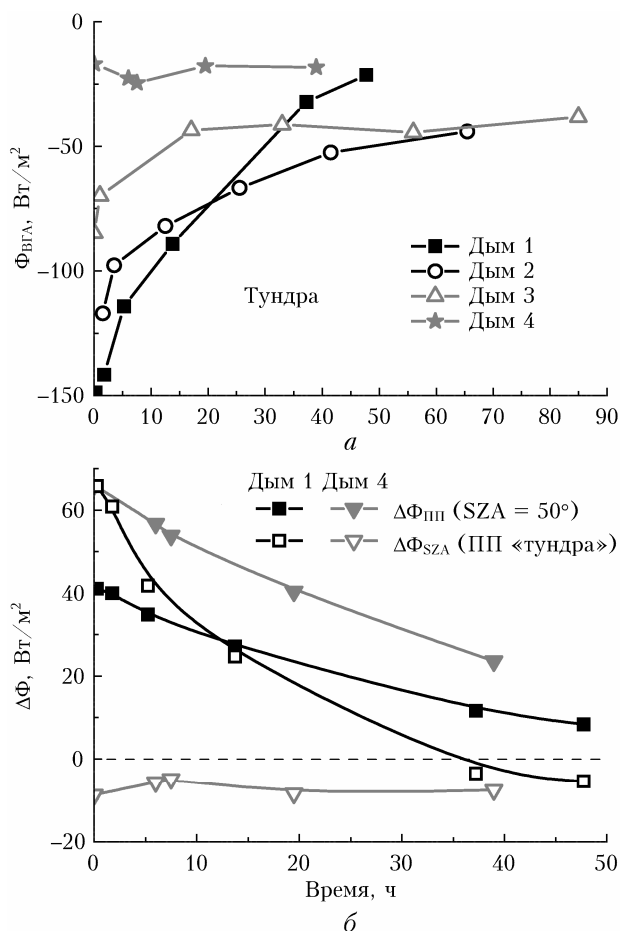


Рис. 2. Радиационный форсинг четырех типов дымового аэрозоля на ВГА (а); различия в РФА, обусловленные типом ПП и SZA (б)

величине. Однако может иметь место и немонотонная зависимость: так, для пиролизного дыма 1 через ~35 ч выхолаживание при SZA = 75° становится сильнее, чем при SZA = 50° (рис. 2, б), а для смешанного дыма 4 эффект выхолаживания при SZA = 75° сильнее, чем при SZA = 50° в течение всего времени.

Заключение

В работе представлен краткий анализ оптических характеристик дымового аэрозоля, полученных на основе измерений в Большой аэрозольной камере ИОА СО РАН для различных режимов горения, и рассмотрено влияние их эволюции на радиационный форсинг на верхней границе атмосферы в Арктике в летний период.

Показано, что режим горения биомассы может оказывать существенное влияние на временной ход РФА. В случае пиролизных дымов эволюция радиационного форсинга дымового аэрозоля определяется в основном временной изменчивостью оптической толщины. В случае смешанных дымов сильное воздействие оказывает также временная изменчивость альбедо однократного рассеяния аэрозольных частиц.

Среди характерных для Арктического региона типов подстилающей поверхности в летний период максимальный выхолаживающий эффект наблюдается над «водой», но по мере «старения» дымового аэрозоля влияние подстилающей поверхности на Φ_{BGA} уменьшается. В диапазоне $50^\circ \leq SZA \leq 75^\circ$ влияние условий освещенности на РФА зависит от режима горения: выхолаживание на верхней границе атмосферы в пиролизных дымах является немонотонной функцией зенитного угла Солнца, тогда как в смешанных дымах РФА уменьшается по мере возрастания зенитного угла Солнца.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-77-20109).

Список литературы

1. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G., Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. V. 118, N 11. P. 5380–5552. DOI: 10.1002/jgrd.50171.
2. Sand M., Berntsen T., von Salzen K., Flanner M., Langner J., Victor D. Response of arctic temperature to changes in emissions of short-lived climate forcers // Nat. Clim. Change. 2016. V. 6. P. 286–289. DOI: 10.1038/nclimate2880.
3. Liu S., Aiken A.C., Arata C., Dubey M.K., Stockwell C.E., Yokelson R.J., Stone E.A., Jayaratne T., Robinson A.L., DeMott P.J., Kreidenweis S.M. Aerosol single scattering albedo dependence on biomass combustion efficiency: Laboratory and field studies // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41, N 2. P. 742–748. DOI: 10.1002/2013GL058392.
4. Поповичева О.Б., Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П., Киреева Е.Д., Персиянцева Н.М., Тимофеев М.А., Engling G., Eleftheriadis K., Diapouli L., Панченко М.В., Zimmermann R., Schnelle-Kreis J. Оптико-микрофизические и физико-химические характеристики дымов горения сибирских биомасс: эксперименты в аэрозольной камере // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 4. С. 323–331; Popovicheva O.B., Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P., Kireeva E.D., Persiantseva N.M., Timofeev M.A., Engling G., Eleftheriadis K., Diapouli E., Panchenko M.V., Zimmermann R., Schnelle-Kreis J. Optical-microphysical and physical-chemical characteristics of Siberian biomass burning: Experiments in aerosol chamber // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 5. P. 492–500.
5. Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П. Изменчивость конденсационных свойств смешанного дыма горения биомассы на различных стадиях его эволюции // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 10. С. 846–855; Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P. Variations in condensation properties of mixed smoke from biomass burning at different smoke evolution stages // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 1. P. 9–18.

6. Kozlov V.S., Konovalov I.B., Uzhegov V.N., Chernov D.G., Pol'kin V.S., Zenkova P.N., Yausheva E.P., Shmargunov V.P., Dubtsov S.N. Dynamics of optical-microphysical characteristics of smokes from Siberian wildfires in the Big Aerosol Chamber at the stages of smoke generation and ageing // *Proc. SPIE*. 2020. P. 1156046.
7. Попова С.А., Козлов В.С., Макаров В.И., Коновалов И.Б. Анализ влияния УФ-облучения на состав и абсорбирующие свойства углеродсодержащих частиц по данным измерений дымов от сжигания древесины сосны в Большой аэрозольной камере // *Оптика атмосф. и океана*. 2021. Т. 34, № 12. С. 965–968; Popova S.A., Kozlov V.S., Makarov V.I., Konovalov I.B. Analysis of the effect of UV irradiation on the composition and absorbing properties of carbon-containing particles based on measurements of smoke from burning pine wood in the large aerosol chamber // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 2. P. 142–145.
8. Kozlov V.S., Shmargunov V.P., Panchenko M.V. Modified aethalometer for monitoring of black carbon concentration in atmospheric aerosol and technique for correction of the spot loading effect // *Proc. SPIE*. 2016. V. 10035.
9. Zenkova P.N., Terpugova S.A., Pol'kin V.B., Pol'kin V.S., Uzhegov V.N., Kozlov V.S., Yausheva E.P., Panchenko M.V. Развитие эмпирической модели оптических характеристик аэрозоля Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2021. Т. 34, № 3. С. 192–198; Zenkova P.N., Terpugova S.A., Pol'kin V.V., Pol'kin V.S., Uzhegov V.N., Kozlov V.S., Yausheva E.P., Panchenko M.V. Development of an empirical model of optical characteristics of aerosol in Western Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 4. P. 320–326.
10. Panchenko M.V., Kozlov V.S., Pol'kin V.V., Pol'kin V.S., 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, N 1. P. 20–39. DOI: 10.3390/atmos11010020.
11. Kozlov V.S., Yausheva E.P., Terpugova S.A., Panchenko M.V., Chernov D.G., Shmargunov V.P. Optical-microphysical properties of smoke haze from Siberian forest fires in summer 2012 // *Int. J. Rem. Sens.* 2014. V. 35, N 15. P. 5722–5741.
12. Ивлев Л.С., Попова С.И. Оптические константы вещества атмосферного аэрозоля // *Изв. вузов. Физика*. 1972. № 5. С. 91–97.
13. Андреев С.Д., Ивлев Л.С. Моделирование оптических характеристик аэрозолей приземного слоя атмосферы в области спектра 0,3–15 мкм. Ч. 2. Модель состава и структуры аэрозолей // *Оптика атмосф. и океана*. 1995. Т. 8, № 8. С. 1227–1235.
14. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
15. Лактионов А.Г. Равновесная гетерогенная конденсация. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 160 с.
16. Konovalov I.B., Golovushkin N.A., Beekmann M., Andreae M.O. Insights into the aging of biomass burning aerosol from satellite observations and 3D atmospheric modeling: evolution of the aerosol optical properties in Siberian wildfire plumes // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21, N 1. P. 357–392. DOI: 10.5194/acp-21-357-2021.
17. 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 атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 9. С. 748–758. DOI: 10.15372/AOO20220908.
18. Baldridge A.M., Hook S.J., Grove C.I., Rivera G. The ASTER spectral library version 2.0 // *Remote Sens. Environ.* 2009. V. 113, N 4. P. 711–715. DOI: 10.1016/j.rse.2008.11.007.
19. Schmeisser L., Backman J., Ogren J.A., Andrews E., Asmi E., Starkweather S., Uttal T., Fiebig M., Sharma S., Eleftheriadis K., Vratolis S., Bergin M., Tunved P., Jefferson A. Seasonality of aerosol optical properties in the Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 16. P. 11599–11622. DOI: 10.5194/acp-18-11599-2018.
20. Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Фирсов К.М. Моделирование прямого радиационного форсинга для типичных летних условий Сибири. Часть 1: Метод расчета и выбор входных параметров // *Оптика атмосф. и океана*. 2009. Т. 22, № 2. С. 163–172; Zhuravleva T.B., Kabanov D.M., Sakerin S.M., Firsov K.M. Simulation of aerosol direct radiative forcing under typical summer conditions of Siberia. Part 1. Method of calculation and choice of input parameters // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 1. P. 63–73.

I.M. Nasrtdinov, P.N. Zenkova, T.B. Zhuravleva, V.N. Uzhegov, I.B. Konovalov. Simulation of radiative forcing of smoke aerosol in the Arctic using measurements in the large aerosol chamber of Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.

The results of experiments carried out in the Large Aerosol Chamber of IAO SB RAS during 2021–2022 to study the optical characteristics of smoke aerosol with a long aging time (up to 2–3 days) are presented. The influence of the evolution of optical characteristics of pyrolysis and mixed smokes on the radiative forcing of smoke aerosol (RFA) at the top of atmosphere in the Arctic region in summer is estimated. It is shown that for pyrolysis smokes, the main factor that determines the time dependence of RFA is the evolution of the aerosol optical thickness, while for mixed smokes, it is also necessary to take into account the temporal variability of the single scattering albedo of aerosol particles. The dependence of RFA on underlying surface types and illumination conditions typical for the Arctic region is considered for different modes of biomass combustion.