

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 536.331

К вопросу о выборе оптических свойств частиц сажи для описания поглощения солнечного излучения в атмосфере и на поверхности Земли

Е.В. Гуренцов[✉], А.В. Еремин, Р.Н. Колотушкин*

Объединенный институт высоких температур РАН
125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13

Поступила в редакцию 20.05.2022 г.;
после доработки 30.05.2022 г.;
принята к печати 1.06.2022 г.

Приведены новые данные о зависимости функции коэффициента преломления сажевых частиц от их среднего размера в видимой и ближней ИК-областях спектра, полученные методом лазерно-индуцированной инкаандесценции. В настоящее время для расчета поглощения солнечного света сажевыми аэрозолями используется значение функции коэффициента преломления порядка 0,2 на длине волны 550 нм, независимо от происхождения сажевых частиц и их вариативности. Полученные данные показывают, что оптические свойства сажи зависят от размера частиц и условий их формирования, что, в свою очередь, связано со степенью их графитизации. Показано, что учет распределения по размерам частиц в сажевых аэрозолях может приводить к увеличению поглощения ими солнечного излучения по сравнению с принятыми значениями примерно в два раза.

Ключевые слова: сажевые частицы, поглощение солнечного излучения, функция коэффициента преломления, средний размер сажевых частиц; soot particles, absorption of solar radiation, refractive index function, average size of soot particles.

Введение

Сажа — особый вид дисперсного углерода, образующегося при неполном сгорании или пиролизе углеводородного топлива. Наночастицы сажи выделяются среди других углеродных материалов набором уникальных физических свойств: сильное поглощение солнечного света, тугоплавкость и нерастворимость в воде и органических растворителях. Частицы сажи имеют форму сфер диаметром 10–30 нм, которые объединены в агрегаты различного строения — от плотной совокупности частиц до разветвленных разветвленных структур.

Многие эксперты ставят сажевые аэрозоли на второе место после CO₂ по степени влияния на климат среди продуктов жизнедеятельности человека [1]. Можно выделить три основных типа воздействия сажевых частиц на радиационный баланс атмосферы и поверхности Земли: 1) прямое воздействие (т.е. поглощение и рассеивание солнечного света); 2) полупрямое воздействие (влияние на образование облаков и их свойства); 3) влияние на криосферу Земли (затемнение и уменьшение аль-

bedo ледников и, как следствие, увеличение скорости их таяния) [2, 3]. Из них прямое воздействие и влияние на криосферу Земли оцениваются как эффекты с наибольшим вкладом в нагрев атмосферы и поверхности Земли [1].

Одним из ключевых оптических параметров сажевого аэрозоля, необходимых для корректной оценки нагрева атмосферы и поверхности Земли в климатических моделях, является величина функции коэффициента преломления $E(m)$, которая используется для определения сечения поглощения, излучательной способности и других величин, характеризующих поглощение рэлеевских частиц. Функция $E(m)$ определяется из спектрального показателя преломления материала частицы $m = n - ik$ на длине волны λ :

$$E(m) = -\text{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) = \frac{6nk}{(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2k^2}, \quad (1)$$

где n — действительная, а k — мнимая часть спектрального коэффициента преломления.

К сожалению, измеренные в различных условиях значения спектрального коэффициента преломления сажевых частиц и, следовательно, функции $E(m)$ могут существенно различаться [4].

В настоящей работе на основе новых литературных данных, полученных за последние пять лет,

* Евгений Валерьевич Гуренцов (gurentsov@ihed.gas.ru); Александр Викторович Еремин (eremin@jiht.ru); Роман Николаевич Колотушкин (kolotushkin.roman@gmail.com).

о величине $E(m)$ сажевых частиц в зависимости от их размера в видимой и ближней ИК-областях спектра оценивается нагрев атмосферы Земли при поглощении солнечного излучения сажевыми аэрозолями различного происхождения.

Новый подход к исследованию оптических свойств сажевых частиц

Лазерно-индуцированная инкаандесценция (ЛИИ) – перспективный метод исследования свойств наночастиц [5, 6]. Метод ЛИИ основан на импульсном лазерном нагреве наночастиц до высоких температур и анализе их теплового излучения. Амплитуда сигнала ЛИИ от нагретых конденсированных частиц определяется их концентрацией, излучательной способностью и плотностью энергии нагревающего лазера. Преимущество метода ЛИИ для определения оптических свойств заключается в том, что он не требует предположений о размерах частиц и структуре их агрегатов. На основе анализа сигналов ЛИИ определяется функция показателя преломления $E(m)$ на длине волны излучения нагревающего лазера, а при использовании двух длин волн для нагрева определяется отношение $E(m, \lambda_1)/E(m, \lambda_2)$, которое позволяет восстановить спектральную зависимость $E(m)$ в линейном приближении в диапазоне длин волн от λ_1 до λ_2 .

Значение функции показателя преломления сажи на $\lambda = 1064$ нм $E(m, 1064)$ было впервые измерено методом ЛИИ в одной точке диффузионного этиленового пламени [7]. Позже в тех же условиях было измерено значение $E(m, 532)$ на $\lambda = 532$ нм [8]. В [9, 10] авторы измерили $E(m, 1064)$ методом ЛИИ в предварительно перемешанном пламени этилен/воздух на различных высотах над срезом горелки, что соответствует различным стадиям роста частиц. Аналогичная зависимость $E(m, 1064)$ от высоты пламени была получена при горении смеси метан/воздух [11]. В [12] значения $E(m, 1064)$ были измерены для сажевых частиц, синтезированных при пиролизе ацетилена за отраженными ударными волнами в ударной трубе, в зависимости от их размера.

Для исследования зависимости $E(m)$ от длины волны в [13] была предложена методика возбуждения частиц излучением импульсного Nd:YAG-лазера на $\lambda = 532$ и 1064 нм. Было определено отношение $E(m, 1064)/E(m, 532)$ для наночастиц сажи, которые сформировались в диффузионном метановом пламени и в предварительно перемешанном пламени ацетилен/воздух. Аналогичные измерения проводились в [14–18] для сажи, сформировавшейся в различных углеводородо-воздушных пламенах при различном давлении. В вышеупомянутых работах было показано, что оптические свойства сажи в зависимости от условий синтеза, а также от вида углеводородов, существенно различаются по температуре, давлению, времени реакции.

В работах, связанных с влиянием сажевых частиц на климат Земли, при описании оптических

свойств часто используются устаревшие данные. Так, например, в [19] при описании оптических свойств тропосферных аэрозолей для сажевых частиц коэффициент преломления для диапазона $\lambda = 200–300$ нм $m = 1,8 - 0,74i$ ($E(m) = 0,27$). Это значение заимствовано из книги 1986 г. [20], авторы которой, в свою очередь, ссылаются на более раннюю работу по оптическим свойствам сажи [21]. Отметим, что это значение коэффициента преломления использовалось как обобщенная характеристика всех сажевых частиц независимо от размера и условий формирования.

Для видимой и ближней ИК-областей спектра к настоящему времени накоплен огромный массив данных по оптическим свойствам сажевых частиц и их зависимостям от длины волны. В первую очередь это касается сажевых частиц, образующихся в процессах горения и измеренных различными методами. На основании этих данных в [22] для расчетов влияния поглощения сажевых частиц на $\lambda = 550$ нм в климатических моделях была рекомендована величина $m = 1,74 - 0,44i$ ($E(m) = 0,178$). Это значение в [22] было предложено использовать для сажевых частиц любого размера, сформированных в различных условиях, что, по нашему мнению, является несколько упрощенным подходом.

В недавней статье [23] было детально исследовано изменение оптических свойств сажевых частиц, образованных разными способами, включая горение и ударно-волновой пиролиз различных углеводородов. Помимо собственных экспериментальных данных, в [23] проанализированы данные многих других авторов. В результате показано, что в качестве основной характеристики, отражающей изменение оптических свойств, можно использовать средний размер сажевых частиц. Было предложено описать совокупность имеющихся экспериментальных данных по значениям функции $E(m, 1064)$ затухающей экспоненциальной зависимостью:

$$E(m, 1064) = 0,45 \left(1 - \exp\left(-\frac{d-6}{5}\right) \right), \quad (2)$$

где d – средний диаметр частиц сажи, нм. При этом средняя величина функции коэффициента преломления на $\lambda = 1064$ нм при размерах частиц более 20 нм стремится к $E(m, 1064) = 0,45 \pm 0,1$ (рис. 1). Физической причиной такого поведения оптических свойств является процесс трансформации структуры сажевых частиц от полностью неупорядоченной до частично упорядоченной при увеличении их размера. Этот процесс выражается в увеличении степени графитизации, т.е. в появлении все большего количества параллельных базовых элементов (крупных плоских полиароматических молекул размерами $\sim 1,2–1,3$ нм) в структуре сажевых частиц и уменьшении расстояния между параллельными плоскостями, которое стремится к межплоскостному расстоянию в кристалле графита 0,335 нм. Такая трансформация структуры приводит к уменьшению ширины оптической запрещенной зоны от нескольких электронвольт до $\sim 0,1$ эВ [24] и, следовательно,

к увеличению поглощения электронами электромагнитного излучения в ближнем ИК- и видимом диапазонах спектра.

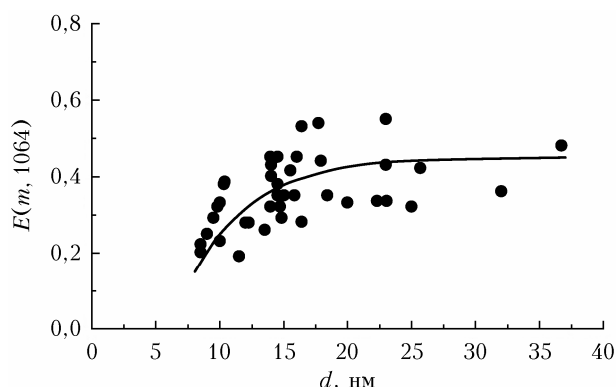


Рис. 1. Обобщенная зависимость функции коэффициента преломления сажи на длине волны 1064 нм от среднего размера сажевых частиц по данным [23]

Спектральная зависимость $E(m)$ в линейном приближении на произвольной длине волны в ближнем ИК- и видимом диапазонах спектра может быть восстановлена из отношения $E(m, 1064)/E(m, 532)$ (рис. 2).

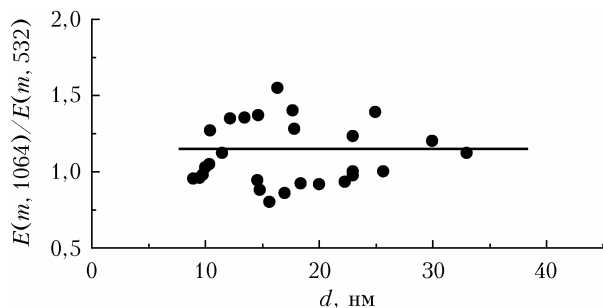


Рис. 2. Отношение $E(m, 1064)/E(m, 532)$ в зависимости от размеров сажевых частиц по данным [23]

Исходя из данных, представленных на рис. 2, усредненное значение $E(m, 1064)/E(m, 532)$ практически не зависит от размера частиц и равно $1,15 \pm 0,3$. Следовательно, в среднем $E(m, 532)$ меньше, чем $E(m, 1064)$, на 15% и составляет 0,39. С другой стороны, из приведенных в [20] коэффициентов преломления $E(m, 1060) = 0,22$ и $E(m, 550) = 0,256$, что в 1,5–2 раза меньше значений, приведенных в [23]. Более того, отличие данных [22], где рекомендована величина $E(m, 550) = 0,178$, от данных [23] для этой длины волны составляет ~ 2,2 раза.

Оценка влияния сажевого аэрозоля на нагрев атмосферы с учетом зависимости $E(m)$ от размера частиц сажи

Прямое воздействие частиц сажи на нагрев атмосферы выражается в поглощении и рассеивании солнечного света, которые конкурируют с нагревом

атмосферы в результате излучения от поверхности Земли. Это воздействие в течение года выражается в виде произведения четырех факторов [25]:

$$Q = M \cdot t \cdot \sigma_s \cdot \alpha, \quad (3)$$

где Q – плотность теплового потока, приводящего к дополнительному нагреву атмосферы ($\text{Вт}/\text{м}^2$); M – среднегодовой выброс сажи на единицу площади Земли ($\text{Гг}/\text{год} \cdot \text{м}^2$); t – среднее время жизни сажевых частиц в атмосфере в днях, деленное на число дней в году; σ_s – сечение поглощения частиц сажи на единицу массы ($\text{м}^2/\text{г}$); α – параметр, учитывающий эффективность нагрева атмосферы частицами сажи относительно нагрева от земной поверхности ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Энергетический баланс атмосферы определяется переменными окружающей среды, особенно отражательной способностью подстилающей поверхности. Таким образом, сажевые аэрозоли значительно сильнее нарушают энергетический баланс атмосферы над светлой поверхностью (льды, снега), чем над темной [26]. Среднее время жизни сажи в атмосфере оценивается от 3 до 10 дней [27]. Для приведенной ниже оценки взята максимальная величина 10 дней. Данные о выбросе частиц сажи взяты из [1] и [28]. Согласно этим данным среднегодовой выброс частиц сажи в 2000 г. составил 4510 Гг. Значение M определялось исходя из площади Земли $5,1 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$. Величина σ_s находилась из соотношения [29]:

$$\sigma_s(\lambda) = \frac{6\pi \cdot E(m, \lambda)}{\lambda \cdot \rho}. \quad (4)$$

Плотность сажи $\rho = 1,8 \text{ г}/\text{см}^3$ в соответствии с рекомендациями [22]; σ_s оценивалась для $\lambda = 550 \text{ нм}$.

На основании соотношения (3) оценка вклада сажевых частиц в нагрев атмосферы заключалась в сравнении прямого воздействия частиц сажи для двух случаев: 1) функция $E(m, 550)$ (σ_s) считалась одинаковой для всех сажевых частиц и равной 0,178 в соответствии с рекомендованным в [22] коэффициентом преломления сажи $m = 1,74 - 0,44i$; 2) для нахождения величины $E(m, 550)$ использовалась формула (2). Далее результат вычисления по формуле (2) был поделен на 1,15 (среднее отношение $E(m, 1064)/E(m, 532)$) [23], рис. 2). Данные о величине α были взяты из работы [1], в которой они представлены в виде распределения тепловых потоков по поверхности Земли; на их основе среднее значение α можно принять равным $200 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Для случая 1 при выбросе сажи 4510 Гг/год, средней продолжительности нахождения сажи в атмосфере 10 дней, $\sigma_s = 3,39 \text{ м}^2/\text{г}$ (при $E(m, 550) = 0,178$), $\alpha = 200 \text{ Вт}/\text{м}^2$ значение прямого воздействия частицы сажи равно $0,164 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Для расчетов в случае 2 была привлечена информация об источниках выбросов сажевых частиц, а также о среднем размере частиц для выбранных источников. В [1] приведено следующее распределение выбросов сажи: дизельные двигатели – 1320 Гг/год, промышленный уголь – 740 Гг/год,

твердое топливо в жилых домах – 1880 Гг/год, бензиновые двигатели – 110 Гг/год и остальные источники – 460 Гг/год. Средний размер частиц сажи в дизельных двигателях по данным [30] составляет ~ 13 нм, при этом величина функции коэффициента преломления $E(m, 550)$, определенная по формуле (2) и отношению $E(m, 1064)/E(m, 532)$ из [23] равна 0,3. В [31] проводился анализ структуры частиц сажи при горении угля, при этом размеры сажевых частиц оценивались в диапазоне 30–50 нм. Для этих частиц $E(m, 550) = 0,39$ [23]. В [32] проводился анализ частиц сажи при различных режимах горения дерева. Средний размер этих частиц при наиболее эффективном режиме составлял 25 нм ($E(m, 550) = 0,38$ [23]). Данные о размерах сажевых частиц в выхлопах бензиновых двигателей взяты из [33], где их средний размер оценивался как 12 нм ($E(m, 550) = 0,27$ [23]). Для остальных разнородных источников с суммарным выбросом 460 Гг/год величина $E(m, 550) = 0,39$ рассчитывалась из данных [23] исходя из максимальных размеров сажевых частиц > 25 нм. Для удобства все использованные для оценок данные сведены в таблицу.

Источники выбросов сажевых аэрозолей, средний размер частиц сажи и соответствующие значения функции коэффициента преломления на $\lambda = 550$ нм

Источник выбросов	Объем выбросов, Гг/год	Средний размер частиц, нм	$E(m, 550)$
Дизельные двигатели	1320 [1]	13 [30]	0,30 [23]
Промышленный уголь	740 [1]	30–50 [31]	0,39 [23]
Твердое топливо	1880 [1]	25 [32]	0,38 [23]
Бензиновые двигатели	110 [1]	12 [33]	0,27 [23]
Остальные источники	460 [1]	> 25 (настоящая работа)	0,39 [23]

Путем расчета величины воздействия Q для каждого источника частиц сажи и их суммирования было получено значение $0,327 \text{ Вт/м}^2$, что в два раза больше, чем в случае 1. При этом средневзвешенная величина $E(m, 550)$ для всех источников сажи оказалась равной 0,36, что также примерно вдвое превышает значение $E(m, 550) = 0,178$, рекомендованное в [22].

Добавим, что в недавнем обзоре поглощающих свойств сажи [29] авторы, основываясь на новейших экспериментальных и расчетных данных, также пришли к выводу о том, что для «взрослой» сажи (находящейся на заключительной стадии формирования), после которой ее структура уже не изменяется) среднее значение $E(m, 550)$ существенно больше, чем рекомендованное в [22] ($E(m, 550) = 0,178$), и лежит в диапазоне 0,32–0,4, что неплохо согласуется с данными [23]. Однако авторы [29] не исследовали связь оптических свойств со средними размерами сажевых частиц, ограничившись только

качественными различиями между так называемой «молодой» (находящейся на начальных стадиях формирования) и «взрослой» сажей.

Суммируя полученные результаты оценок Q , справедливо будет отметить, что прямое воздействие сажевых частиц на нагрев атмосферы в [1] оценивается в весьма широком диапазоне от 0,08 до $1,27 \text{ Вт/м}^2$ (вследствие огромного количества других неопределенностей, не связанных с оптическими свойствами сажи). Лучшая оценка равна $0,71 \text{ Вт/м}^2$, что, в свою очередь, более чем в два раза выше приведенных нами оценок. Таким образом, значения Q , полученные в настоящей работе с использованием зависимости оптических свойств сажи от их среднего размера, не выходят за пределы диапазона, указанного в обзоре [1].

Заключение

Разнообразие сажевых частиц, эмитируемых различными источниками, выражается в разнообразии их теплофизических и оптических свойств. Эти свойства определяются внутренней структурой сажевых частиц, которая, в свою очередь, зависит от стадии формирования частиц.

В настоящей работе показано, что одним из обобщающих параметров, который характеризует стадию формирования сажевых частиц и определяет их оптические свойства, является средний размер сажевых частиц. На основе последних данных об изменении оптических свойств сажевых частиц в зависимости от их размеров проведены оценки нагрева атмосферы Земли, которое вызвано поглощением солнечного излучения техногенными сажевыми аэрозолями различного происхождения. Таким образом, показано, что использование зависимости функции коэффициента преломления от размера сажевых частиц может приводить к увеличению оценок нагрева атмосферы сажевыми аэрозолями в два раза относительно оценок, основанных на неизменном значении функции коэффициента преломления для частиц сажи различных размеров и генезиса.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержки РФФИ (проект № 21-19-00390).

Список литературы

1. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Bernsten 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. P. 5380–5552.
2. Chýlek P., Ramaswamy V., Srivastava V. Albedo of soot-contaminated snow // J. Geophys. Res. 1983. V. 88, N C15. P. 10837–10843.
3. Гунзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей

- на глобальный и региональный климат // Рос. хим. журн. 2008. Т. LII, № 5. С. 112–119.
4. Schulz C., Kock B.F., Hofmann M., Michelsen H.A., Will S., Bougie B., Suntz R., Smallwood G. Laser-induced incandescence: Recent trends and current questions // Appl. Phys. B. 2006. V. 83. P. 333–354.
 5. Гуренцов Е.В., Еремин А.В., Михеева Е.Ю. Исследование термодинамических свойств углеродных наночастиц методом лазерного нагрева // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55, № 5. С. 737–745.
 6. Gurentsov E. A review on determining the refractive index function, thermal accommodation coefficient and evaporation temperature of light absorbing nanoparticles suspended in gas the phase using the laser-induced incandescence // Nanotechnol. Rev. 2018. V. 7. P. 583–604.
 7. Snelling D.R., Liu F., Smallwood G.J. Determination of the soot absorption function and thermal accommodation coefficient using low-fluence LII in a laminar coflow ethylene diffusion flame // Combust. Flame. 2004. V. 136. P. 180–190.
 8. Snelling D., Thomson K., Liu F., Smallwood G. Comparison of LII derived soot temperature measurements with LII model predictions for soot in a laminar diffusion flame // Appl. Phys. B. 2009. V. 96. P. 657–669.
 9. Bladh H., Johnsson J., Olofsson N.-E., Bohlin A., Bengtsson P.-E. Optical soot characterization using two-color laser-induced incandescence (2C-LII) in the soot growth region of a premixed flat flame // Proc. Combust. Inst. 2011. V. 33. P. 641–648.
 10. Olofsson N.-E., Simonsson J., Török S., Bladh H., Bengtsson P.-E. Evolution of properties for aging soot in premixed flat flames studied by laser-induced incandescence and elastic light scattering // Appl. Phys. B. 2015. V. 119. P. 669–683.
 11. Bejaoui S., Batut S., Therssen F., Lamoureux N., Desgroux P., Liu F. Measurements and modeling of laser-induced incandescence of soot at different heights in a flat premixed flame // Appl. Phys. B. 2015. V. 118. P. 449–469.
 12. Eremín A.V., Gurentsov E.V., Popova E., Priemchenko K. Size dependence of complex refractive index function of growing nanoparticles // Appl. Phys. B. 2011. V. 104. P. 285–295.
 13. Therssen E., Bouvier Y., Schoemaeker-Moreau C., Mercier X., Desgroux P., Ziskind M., Focsa C. Determination of the ratio of soot refractive index function $E(m)$ at the two wavelengths 532 and 1064 nm by laser induced incandescence // Appl. Phys. B. 2007. V. 89. P. 417–427.
 14. Michelsen H.A., Schrader P.E., Goulay F. Wavelength and temperature dependences of the absorption and scattering cross sections of soot // Carbon. 2010. V. 48. P. 2175–2191.
 15. López-Yglesias X., Schrader P.E., Michelsen H.A. Soot maturity and absorption cross sections // J. Aerosol Sci. 2014. V. 75. P. 43–64.
 16. Yon J., Lemaire R., Therssen E., Desgroux P., Coppalle A., Ren K.F. Examination of wavelength dependent soot optical properties of diesel and diesel/rapeseed methyl ester mixture by extinction spectra analysis and LII measurements // Appl. Phys. B. 2011. V. 104. P. 253–271.
 17. Cléon G., Amodeo T., Faccinetto A., Desgroux P. Laser induced incandescence determination of the ratio of the soot absorption functions at 532 nm and 1064 nm in the nucleation zone of a low pressure premixed sooting flame // Appl. Phys. B. 2011. V. 104. P. 297–305.
 18. Bejaoui S., Lemaire R., Desgroux P., Therssen F. Experimental study of the $E(m, k)/E(m, 1064)$ ratio as a function of wavelength, fuel type, height above the burner and temperature // Appl. Phys. B. 2013. V. 116. P. 313–323.
 19. Панченко М.В., Козлов В.С., Польшин В.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.
 20. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 256 с.
 21. Twitty J.T., Weinmann J.A. Radiative properties of carbonaceous aerosol // J. Appl. Met. 1971. V. 10. P. 725–731.
 22. Bond T.C., Bergstrom R.W. Light absorption by carbonaceous particles: An investigative review // Aerosol Sci. Technol. 2006. V. 40. P. 27–67.
 23. Гуренцов Е., Еремин А., Михеева Е., Колотушкин Р. Влияние размеров и структуры на оптические свойства сажевых частиц, синтезированных при пиролизе и горении углеводородов // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60, № 2. DOI: 10.31857/S0040364422020053.
 24. Russo C., Apicella B., Tregrossi A., Ciajolo A., Le K.C., Török S., Bengtsson P.-E. Optical band gap analysis of soot and organic carbon in premixed ethylene flames: Comparison of *in-situ* and *ex-situ* absorption measurements // Carbon. 2020. V. 158. P. 89–96.
 25. Schulz M., Textor C., Kinne S., Balkanski Y., Bauer S., Bernsten T., Berglen T., Boucher O., Dentener F., Gubert S., Isaksen I.S.A., Iversen T., Koch D., Kirkevåg A., Liu X., Montanaro V., Myhre G., Penner J.E., Pitari G., Reddy S., Seland Ø., Stier P., Takemura T. Radiative forcing by aerosols as derived from the AeroCom present-day and pre-industrial simulations // Atmos. Chem. Phys. 2006. V. 6. P. 5225–5246.
 26. Chleek P., Coakley J.A. Jr. Aerosols and climate // Science. 1974. V. 183. P. 5–77.
 27. Ogren J.A., Charlson R.J. Elemental carbon in the atmosphere: Cycle and lifetime // Tellus B. 1983. V. 35. P. 241–254.
 28. Bond T.C., Bhardwaj E., Dong R., Jogani R., Jung S., Roden C., Streets D.G., Trautmann N.M. Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850–2000 // Global Biogeochem. Cycles. 2007. V. 21. GB2018.
 29. Liu F., Yon J., Fuentes A., Lobo P., Smallwood G.J., Corbinet J.C. Review of recent literature on the light absorption properties of black carbon: Refractive index, mass absorption cross section, and absorption function // Aerosol Sci. Technol. 2020. V. 54. P. 33–51.
 30. Su D.S., Muller J.-O., Jentoft R.E., Rothe D., Jacob E., Schogl R. Fullerene-like soot from EuroIV diesel engine: Consequences for catalytic automotive pollution control // Top. Catal. 2004. V. 30. P. 241–245.
 31. Lu S., Tan Z., Liu P., Zhao H., Liu D., Yu Sh., Cheng P., Win M.S., Hu J., Tian L., Wu M., Yone-mochi Sh., Wang Q. Single particle aerosol mass spectrometry of coal combustion particles associated with high lung cancer rates in Xuanwei and Fuyuan, China // Chemosphere. 2017. V. 186. P. 278–286.
 32. Torvela T., Tissari J., Sippula O., Kaivosoja T., Leskinen J., Virén A., Lähde A., Jokiniemi J. Effect of wood combustion conditions on the morphology of freshly

emitted fine particles // Atmos. Environ. 2014. V. 87. P. 65–76.

33. Luo Y., Zhu L., Fang J., Zhuang Z., Guan C., Xia C., Xie X., Huang Z. Size distribution, chemical composi-

tion and oxidation reactivity of particulate matter from gasoline direct injection (GDI) engine fueled with ethanol-gasoline fuel // Appl. Therm. Eng. 2015. V. 89. P. 647–655.

E.V. Gurentsov, A.V. Eremin, R.N. Kolotushkin. The choice of optical properties of soot particles for description of solar radiation absorption in the atmosphere and on the Earth's surface.

New data are presented on the dependence of the function of the refractive index of soot particles on their average size in the visible and near-IR spectral regions found by the method of laser-induced incandescence. The sunlight absorption by soot aerosols is currently calculated with a value of the refractive index function of about 0.2 at a wavelength of 550 nm regardless of the origin of soot particles and their variability. The new data confirm the dependence of the optical properties of soot on the size of particles and conditions of their formation, which is related to the degree of their graphitization. It is shown that the solar radiation absorption by soot aerosol can double as compared to the commonly accepted values if taking into account the particle size distribution.