

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.521.3

Параметризация среднего косинуса индикатрисы рассеяния света атмосферным аэрозолем

М.А. Свириденков¹, Е.Ф. Михайлов², Е.Ю. Небосько^{2*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, пер. Пыжевский, 3

²Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Поступила в редакцию 2.12.2016 г.

Анализируются возможности оценки среднего косинуса индикатрисы рассеяния света атмосферным аэрозолем по данным спектральных измерений ослабления и рассеяния света. Предложена эмпирическая формула, параметризующая средний косинус как функцию показателя Ангстрема и комплексного показателя преломления. Рассмотрено несколько подходов к определению среднего косинуса по данным интегрирующих нефелометров. Получено аналитическое выражение, связывающее средний косинус с измеряемым нефелометром отношением световых потоков, рассеянных в переднюю и заднюю полусферы. Рассчитаны значения среднего косинуса на трех длинах волн по данным натурных измерений в пригороде Санкт-Петербурга в 2015 г.

Ключевые слова: аэрозоль, рассеяние, поглощение, индикатриса рассеяния, средний косинус, интегрирующий нефелометр; aerosol, scattering, absorption, phase function, asymmetry factor, integrating nephelometer.

Введение

Средний косинус индикатрисы рассеяния света g (asymmetry factor в англоязычной литературе) — один из основных параметров, определяющих радиационно-климатические эффекты атмосферного аэрозоля. Для его непосредственного расчета необходимы измерения индикатрисы рассеяния в максимальном возможном диапазоне углов [1]. На сегодняшний день не существует коммерческих индикатрисометров атмосферного аэрозоля. Для не прямой оценки среднего косинуса может быть использовано несколько подходов. Например, теоретическое моделирование физико-химического состава аэрозоля и спектра его размеров; так называемая микрофизическая интерполяция — решение обратной задачи по измеряемым оптическим параметрам и последующий расчет среднего косинуса для восстановленных распределений частиц по размерам и показателя преломления; поиск эмпирических соотношений между измеряемыми параметрами (или их функциями) и средним косинусом [2, 3]. Для практического использования и анализа погрешностей желательны эти соотношения представить в аналитическом виде. В настоящее время наиболее часто используются два метода измерений оптических параметров аэрозоля — трассовый и нефелометрический. Спектральный ход измеренного коэффициента рассеяния (или оптической толщины

в случае наклонной трассы) обычно параметризуют с использованием формулы Ангстрема. Современные интегрирующие нефелометры дают возможность измерять не только коэффициент рассеяния, но и его составляющую, обусловленную рассеянием в заднюю полусферу, что позволяет рассчитать один из факторов вытянутости индикатрисы рассеяния света — отношение G потоков излучения, рассеянных в переднюю и заднюю полусферы.

В настоящей работе анализируются связи среднего косинуса индикатрисы рассеяния g с рассчитываемыми по данным измерений отношением G и показателем Ангстрема A .

1. Модели аэрозоля

Величина среднего косинуса определяется как микроструктурой аэрозоля, так и оптическими постоянными его вещества. В данной работе все расчеты делаются в приближении однородных сферических частиц. Реальный атмосферный аэрозоль представляет собой суперпозицию нескольких фракций, имеющих различные происхождение и физико-химические свойства. Мы использовали идеализированные модели с постоянными по спектру действительными и мнимыми частями показателя преломления, не зависящими от размера частиц.

Исторически одной из первых аналитических моделей распределений частиц по размерам было обратностепенное распределение (распределение Юнге) [4]:

$$dN/dr = br^{-a}, \quad (1)$$

* Михаил Алексеевич Свириденков (sviridenkov@ifaran.ru); Евгений Федорович Михайлов (eugene.mikhailov@spbu.ru); Евгений Юрьевич Небосько (zhenia84@gmail.com).

где N – счетная концентрация частиц; r – радиус; b и a – параметры распределения. Формально из (1) в предположении постоянного по спектру показателя преломления следует закон Ангрстрема для спектральной прозрачности (обратное, вообще говоря, неверно)

$$\tau(\lambda) \sim \lambda^{-A}. \quad (2)$$

Здесь τ – оптическая толщина (или коэффициент ослабления); λ – длина волны; $A = a - 3$.

Очевидно, что (1) можно использовать только в ограниченном интервале размеров частиц. Поэтому соотношение $A = a - 3$ не является точным. Тем не менее обратностепенные распределения удобны для исследования связей оптических характеристик и параметров микроструктуры с показателем Ангрстрема. В численных экспериментах мы использовали распределение (1) с a от 3 до 5 (шаг 0,5) в диапазоне радиусов частиц 0,01–12 мкм. Действительная часть n показателя преломления изменялась в диапазоне 1,40–1,65 с шагом 0,01, а мнимая χ – от 0 до 0,03 с шагом 0,005. Таким образом, общее число моделей составило 776.

Реальные распределения оптически-активного континентального атмосферного аэрозоля в большинстве ситуаций являются бимодальными (в представлении $dV/d\ln r$; V – объемная концентрация) [5]. Часто для каждой из фракций используется аналитическая аппроксимация логарифмически-нормальной функцией. В нашей работе, так же как и в [6], модельными распределениями служили результаты решения обратной задачи [7] по данным измерений на станции Zvenigorod сети AERONET в 2010 и 2011 гг. Так как на сайте AERONET сведения о показателе преломления приводятся только для ситуаций со значительным замутнением атмосферы ($\tau(440 \text{ нм}) > 0,4$), то моделям приписывались значения действительной и мнимой частей показателя преломления в тех же интервалах, что и для обратностепенных распределений. Общее число эмпирических моделей – 462.

2. Связь среднего косинуса с показателем Ангрстрема

Средний косинус индикатрисы рассеяния вычислялся путем интегрирования с переменным шагом рассчитанной по теории Ми [8] индикатрисы рассеяния. Число узлов интегрирования равнялось 60. Точность интегрирования контролировалась сравнением результата с точным значением коэффициента рассеяния. Ошибка расчета коэффициента рассеяния не превышала 0,1%. Показатели Ангрстрема для коэффициентов рассеяния A_s и ослабления A_{ext} рассчитывались по двум длинам волн – 700 и 450 нм. Естественно, они несколько отличались между собой и от $a - 3$.

Анализ зависимостей среднего косинуса g от A и действительной и мнимой частей показателя преломления по отдельности показал, что с уменьшением A (укрупнением частиц) g увеличивается. К росту асимметрии индикатрисы рассеяния приводят также увеличение поглощения и уменьшение дейст-

вительной части показателя преломления. Для непоглощающих частиц была подобрана параметризация вида

$$g = (k_1 - k_2 A) \left(\frac{k_3}{n-1} \right)^{k_4}, \quad (3)$$

обеспечивающая точность в пределах 0,01. В анализируемом диапазоне изменения мнимой части показателя преломления оказалось возможным ограничиться линейной связью с ней. Окончательный вид предлагаемой параметризации следующий:

$$g = \chi(1,7 - 0,826A_s) + (0,775 - 0,12A_s) \left(\frac{0,45}{n-1} \right)^{0,35}. \quad (4)$$

Рис. 1, а иллюстрирует применимость (4) для набора обратностепенных моделей. Если же в (4) вместо A_s использовать A_{ext} , то для $a = 5$ наблюдается расщепление зависимостей от n при разных χ (рис. 1, б). Это связано с зависимостью альbedo однократного рассеяния от длины волны, которая проявляется сильнее для частиц с радиусами меньше длины волны. Очевидно, что аппроксимация (4) неприменима для сильнопоглощающих частиц.

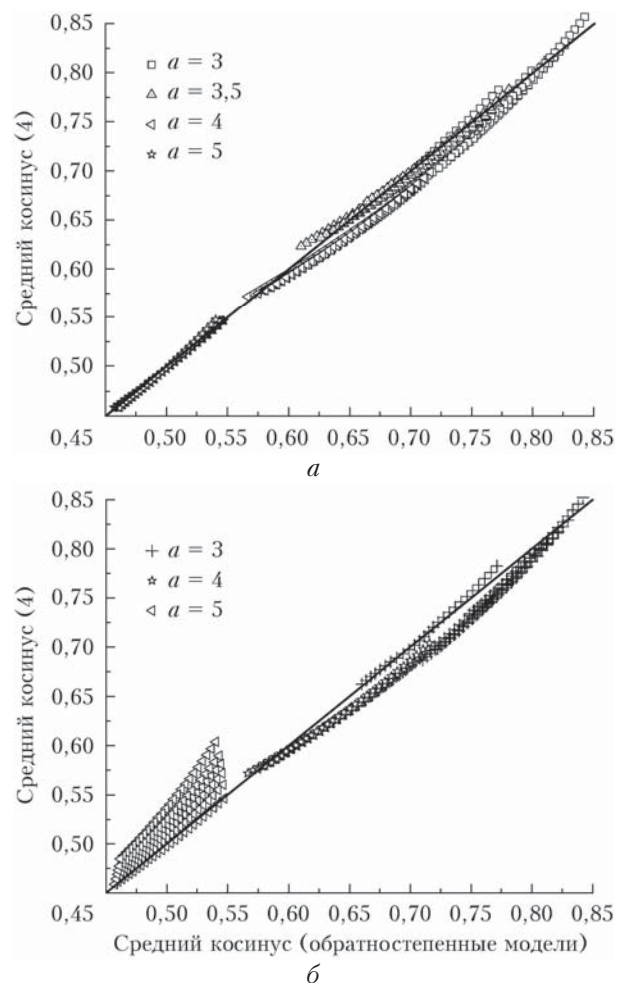


Рис. 1. Восстановление среднего косинуса для обратностепенных моделей по (4); показатель Ангрстрема для коэффициентов рассеяния (а) и ослабления (б)

Требует отдельного рассмотрения и возможность использования (4) применительно к реальному атмосферному аэрозолю. На практике наблюдаются как «выпуклые», так и «вогнутые» (в логарифмическом масштабе) спектральные зависимости коэффициентов ослабления или аэрозольной оптической толщины. Первый вариант характерен, например, для дымов от лесных пожаров [9]. Мы рассчитали по (4) средние косинусы для полуэмпирических моделей и сравнили с точными значениями. Показатель Ангстрема, так же как и в случае обратностепенных распределений, находился по паре длин волн 700 и 450 нм. Результаты расчетов показаны на рис. 2. Как следует из рисунка, для полуэмпирических моделей прослеживается спектральная зависимость среднего косинуса — с ростом длины волны его величина уменьшается. Средняя разность между восстановленными и истинными значениями минимальна для длины волны 700 нм. Коэффициенты корреляции при этом близки для всех трех длин волн.

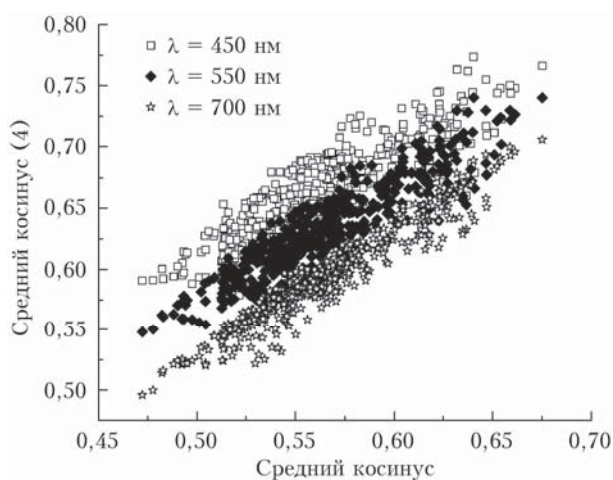


Рис. 2. Восстановление среднего косинуса по (4) для полуэмпирических моделей

Таким образом, можно рекомендовать использовать (4), рассчитывая дифференциальный показатель Ангстрема в сторону уменьшения длины волны. Как следует из (4), для слабопоглощающих частиц основной вклад в ошибку определения g вносит неточность задания действительной части показателя преломления. При изменении n от 1,4 до 1,6 восстановленный средний косинус меняется примерно на 15%. В отсутствие априорной информации о показателе преломления частиц аэрозоля можно задавать, например, $n = 1,45$. При этом вариации показателя преломления в реалистичных пределах 1,35–1,60 не приведут к ошибкам выше 10%.

3. Связь среднего косинуса с параметром асимметрии светового потока

В работе [10] на основании статистического анализа ансамбля измеренных коэффициентов направленного светорассеяния в диапазоне углов 30° – 170° [1] было показано, что угловая зависимость логарифма

нормированной функции рассеяния (индикатрисы) может считаться однопараметрической в первом приближении и характеристики ее асимметрии связаны с одним статистическим параметром и, следовательно, между собой. В качестве такого параметра можно использовать, например, отношение G частных коэффициентов рассеяния, обусловленных рассеянием в переднюю и заднюю полусферы. В отечественной литературе G называют асимметрией светового потока. Коэффициенты рассеяния в заднюю полусферу измеряются, наряду с «полными», некоторыми типами интегрирующих нефелометров [11]. Схема и конструкция интегрирующих нефелометров не позволяют проводить интегрирование во всем диапазоне углов рассеяния 0 – 180° . В силу этого для расчета точных значений G необходимо осуществлять коррекцию результатов измерений. Второй возможный подход к оценке среднего косинуса по данным интегрирующих нефелометров — анализ связи между измеряемой величиной G_{meas} и средним косинусом индикатрисы рассеяния. Третий способ — использование всех шести (коэффициентов рассеяния и рассеяния в заднюю полусферу на трех длинах волн) измеряемых параметров. Для того чтобы определить общий вид зависимости среднего косинуса от G_{meas} , предварительно рассмотрим случай «идеального нефелометра».

3.1. Параметризация связи g — G

Формально область изменения среднего косинуса $(-1; 1)$, асимметрии светового потока $(0; \infty)$. В пределе бесконечно малых частиц $g = 0$ и $G = 1$. Второй предельный случай — δ -функция в направлении вперед. Для такой индикатрисы рассеяния $g = 1$, $G = \infty$. Простейшая функция, удовлетворяющая этим условиям:

$$g = 1 - G^{-\nu}. \quad (5)$$

Значение ν рассчитывалось как взятый с обратным знаком коэффициент линейной регрессии между логарифмами $1 - g$ и G . Оно оказалось равным 0,49, т.е. $1 - g$ близко к величине, обратной квадратному корню из коэффициента асимметрии светового потока. Ранее в [2] на основе результатов статистического анализа угловых зависимостей коэффициентов направленного светорассеяния методом главных компонент было получено соотношение

$$G = 1,1(1 - g)^{-1,85}, \quad (6)$$

из которого следует

$$g = 1 - 1,05G^{-0,54}. \quad (7)$$

Отметим, что в [2] в качестве экспериментальных данных использовались ансамбли индикатрисы рассеяния, измеренных в ночное время в осенние периоды, обычно при повышенной относительной влажности воздуха [1]. Кроме того, из измеренных коэффициентов направленного светорассеяния не вычитались их составляющие, обусловленные молекулярным рассеянием. Тем не менее параметризации (5) с $\nu = 0,49$ и (7) дают в диапазоне изменения g

от 0,50 до 0,75 его значения, варьирующиеся в пределах 0,01–0,02 (по (7) g больше, чем по (5)). Сопоставление результатов расчетов по (5) с точными значениями для полуэмпирических распределений проведено на рис. 3, *а*. Для обратностепенных распределений (5) также справедливо (рис. 3, *б*), но при этом показатель степени зависит от параметра Юнге: $\nu = 0,53$ для $a = 3$, $\nu = 0,57$ для $a = 4$, $a = 5$ соответствует $\nu = 0,55$.

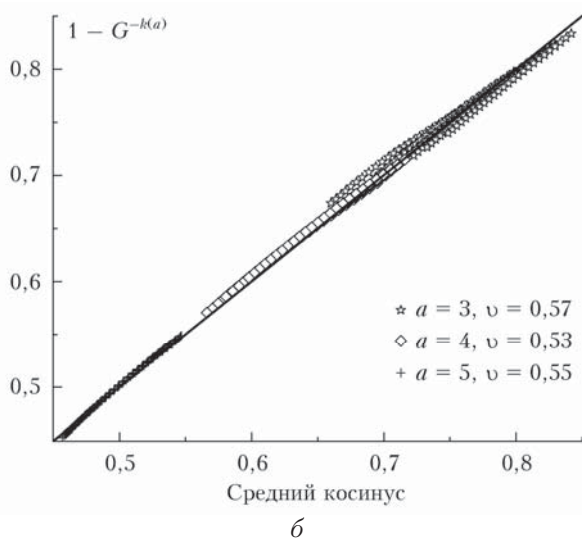
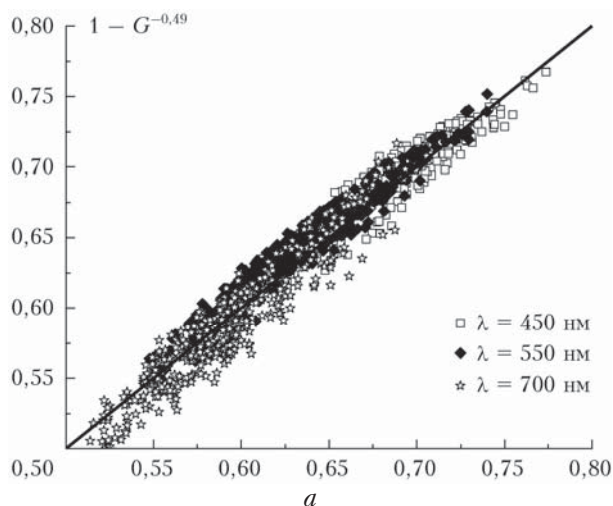


Рис. 3. Восстановление среднего косинуса по (5) для полуэмпирических (*а*) и обратностепенных моделей (*б*)

Из рис. 3 следует, что показатель степени в (5) слабо зависит от коэффициентов преломления и поглощения, но может изменяться в зависимости от формы распределения частиц по размерам.

3.2. Оценка среднего косинуса по данным измерений на интегрирующем нефелометре TSI 3563

Ошибки измерений асимметрии светового потока с помощью интегрирующих нефелометров вызваны двумя основными причинами — невозможностью

получения сигнала, соответствующего рассеянию на углах, близких к направлениям вперед и назад, и неидеальностью угловой чувствительности прибора. Как и в [6], мы использовали угловые зависимости чувствительности нефелометра из работы [12]. Для массива полуэмпирических моделей были рассчитаны измеряемые нефелометром значения составляющих коэффициентов рассеяния в переднюю и заднюю полусферу и их отношения G_{meas} . Регрессионное соотношение между G_{meas} и G было получено в виде

$$G = 1,18G_{meas} - 1,2. \quad (8)$$

Результаты расчетов по (5) и (8) представлены на рис. 4, *а*. Нефелометр TSI 3563 измеряет шесть параметров аэрозольного светорассеяния — коэффициенты рассеяния и их составляющие, обусловленные рассеянием в заднюю полусферу, на трех длинах волн. Использование всей этой информации может уменьшить ошибки восстановления среднего косинуса по данным нефелометра.

Мы применяли два подхода — регрессионный и метод микрофизической экстраполяции. Первый основан на методе множественной регрессии. Линейная регрессия строилась для логарифмов измеряемых величин и $1 - g$:

$$\ln(1 - g) = C_0 + \sum C_i \ln(\sigma_i), \quad (9)$$

где σ_i — полные и частные коэффициенты рассеяния; C_0 — свободный член уравнения линейной регрессии.

Второй подход основан на решении обратной задачи и последующем расчете g для восстановленного спектра размеров. Результаты реализации этих подходов представлены на рис. 4, *б*, *в*. Как следует из рис. 4, наилучшую точность обеспечивает регрессионный подход. Здесь надо иметь в виду, что регрессионные коэффициенты получены для того же массива моделей. В случае микрофизической экстраполяции нет необходимости использовать дополнительную информацию, но средние косинусы индикатрисы рассеяния на длине волны 700 нм восстанавливаются значительно хуже. Это обусловлено возрастанием неучитываемого вклада грубодисперсной фракции в рассеяние в диапазоне углов $0-7^\circ$, так как решение обратной задачи позволяет восстановить распределение частиц по размерам только в субмикронной области.

4. Вариации среднего косинуса индикатрисы рассеяния по данным регулярных натурных измерений в пригороде Санкт-Петербурга

В последние годы на фоновой станции Ресурсного центра «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета, расположенной в Петродворцовом районе Санкт-Петербурга на расстоянии ~35 км от его центра, ведутся регулярные натурные измерения полных коэффициентов рассеяния и коэффициентов рассеяния в заднюю полусферу на интегрирующем нефелометре TSI 3563. В 2015 г.

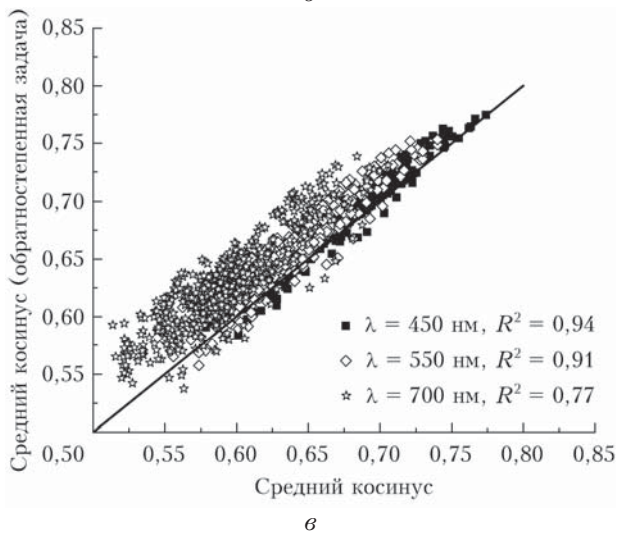
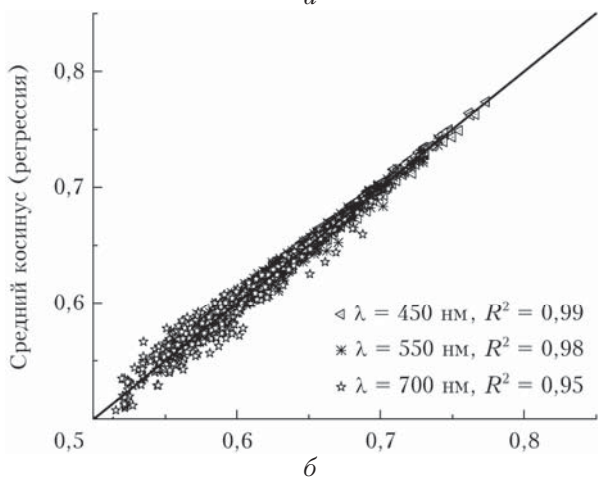
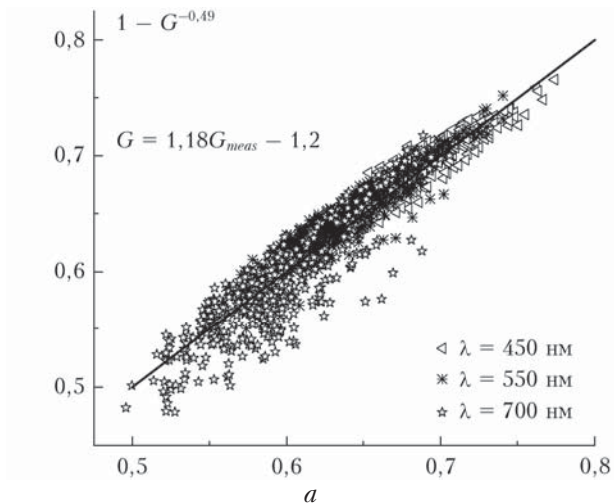


Рис. 4. Определение среднего косинуса по данным интегрирующего нефелометра: *a* – по (5), (8); *б* – регрессионный метод; *в* – микрофизическая экстраполяция

наблюдения проводились с января по июнь, в последнюю декаду июля и с сентября по декабрь. На рис. 5, *a* приведен временной ход среднесуточных значений среднего косинуса на трех длинах волн, рассчитанных по (5) и (8), а на рис. 5, *б* представлены среднемесячные величины.

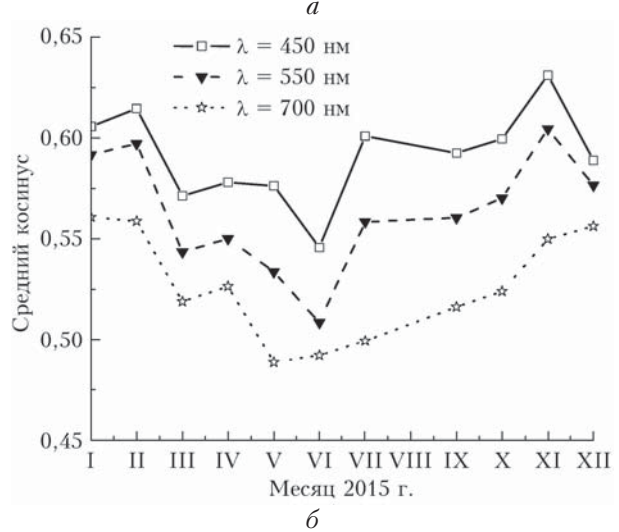
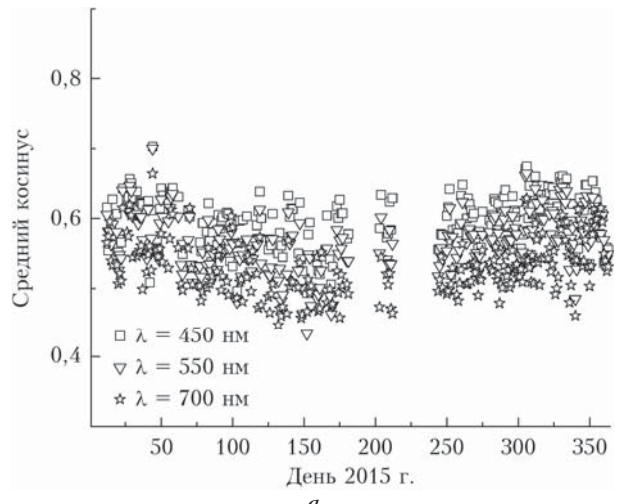


Рис. 5. Средние косинусы по данным натурных измерений в пригороде Санкт-Петербурга: *a* – среднесуточные; *б* – среднемесячные значения

Как среднесуточные, так и среднемесячные значения g характеризуются заметным спектральным ходом. Это свидетельствует о том, что распределения частиц по размерам существенно отличаются от обратностепенных. Среднемесячные величины $g(450 \text{ нм})$ варьируют в диапазоне 0,63–0,55; $g(550 \text{ нм})$ – в диапазоне 0,60–0,51; $g(700 \text{ нм})$ – 0,56–0,49. Что касается сезонного хода, то наблюдается тенденция к уменьшению среднего косинуса весной и в начале лета. Но она нуждается в подтверждении на более длительных рядах.

Заключение

Численные эксперименты с использованием аналитических и полуэмпирических моделей показали, что величина среднего косинуса индикатрисы рассеяния атмосферным аэрозолем может быть аналитически параметризована как функция показателя Ангстрема (рассчитываемого как односторонняя производная в сторону уменьшения длины волны) для коэффициента рассеяния и действительной и мнимой

частей показателя преломления. В случае использования интегрирующих нефелометров средний косинус с высокой точностью оценивается по измеряемому отношению G световых потоков, рассеянных в переднюю и заднюю полусферы. Величина, обратная $1 - g$, близка к квадратному корню из G .

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 16-05-00985 и 16-05-00718) и гранта СПбГУ № 11.37.220.2016 с использованием оборудования Ресурсного центра «Геомодель» СПбГУ.

1. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Исаков А.А., Свириденков М.А. Коэффициент направленного светорассеяния в области углов $0,5-170^\circ$ // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1976. Т. 12, № 10. С. 1034–1044.
2. Свириденков М.А. Некоторые эмпирические соотношения для интегральных параметров индикатрисы рассеяния // III Всесоюз. совещание по атмосферной оптике и актинометрии: Тезисы докл. Ч. 1. Томск: Изд-во ИОА СО АН СССР, 1981. С. 35–37.
3. Ricchiazzi P.J., Gautier C. Sensitivity of clear-sky diffuse radiation to in situ aerosol scattering parameters // Proc. 13th Atmos. Radiat. Measur. (ARM) Science Team Meeting. Broomfield, Colorado. 2003. http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf13/extended_abs/ricchiazzi-pj.pdf
4. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М.: Мир, 1965. 424 с.
5. Whitby K.T., Husar R.B., Liu B.Y.H. The aerosol size distribution of Los Angeles Smog // J. Colloid Interface. 1972. V. 39. P. 177–204.
6. Свириденков М.А., Веричев К.С., Власенко С.С., Емиленко А.С., Михайлов Е.Ф., Небосько Е.Ю. Определение характеристик атмосферного аэрозоля по данным

трехволнового интегрирующего нефелометра // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 3. С. 175–181; Sviridenkov M.A., Verichev K.S., Vlasenko S.S., Emilenko A.S., Mikhailov E.F., Nebos'ko E.Yu. Retrieval of atmospheric aerosol parameters from data of a three-wavelength integrating nephelometer // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 3. P. 230–236.

7. Dubovik O., King M.D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 16. P. 20673–20696; О статистической параметризации индикатрисы рассеяния // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1980. Т. 16, № 7. С. 751–754.
8. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
9. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A., Semoutnikova E.G., Emilenko A.S., Isakov A.A., Kopeikin V.V., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Verichev K.S., Kurbatov G.A., Ponomareva N.Ya. Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 2012 // Int. J. Rem. Sens. 2014. V. 35, N 15. P. 5698–5721.
10. Свириденков М.А. О статистической параметризации индикатрисы рассеяния // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1980. Т. 16, № 7. С. 751–754.
11. Waggoner A.P., Ahlquist N.C., Charlson R.J. Measurement of the aerosol total scatter-backscatter ratio // Appl. Opt. 1972. V. 11, N 12. P. 2886–2889.
12. Anderson T.L., Covert D.S., Marshall S.F., Laucks M.L., Charlson R.J., Waggoner A.P., Ogren J.A., Caldwell R., Holm R.L., Quant F.R., Sem G.J., Wiedensohler A., Ahlquist N.A., Bates T.S. Performance characteristics of a high-sensitivity, three-wavelength, total scatter/backscatter nephelometer // J. Atmos. Ocean. Technol. 1996. V. 13, N 5. P. 967–986.

M.A. Sviridenkov, E.F. Mikhailov, E.Yu. Nebos'ko. Parameterization of the asymmetry factor of the atmospheric aerosol phase function.

Possibilities of retrieving the asymmetry factor of the atmospheric aerosol phase function from spectral measurements of light extinction and scattering are analyzed. An empirical formula for parameterization of the relation between the asymmetry factor and Ångström exponent and complex refractive index has been suggested. Several approaches to the determination of the asymmetry factor from data of integrating nephelometers are considered. An empirical relation connecting the asymmetry factor with the ratio of the scattered radiation into forward and backward hemispheres has been derived. Using the data of field measurements in Saint Petersburg suburbs in 2015, the asymmetry factor has been calculated at three wavelengths.