

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.534

Я.А. Виролайнен

**Связь между оптическими параметрами аэрозоля в полосах
молекулярного поглощения ближней ИК-области спектра**

*Научно-исследовательский институт физики
Санкт-Петербургского государственного университета*

Поступила в редакцию 3.08.2006 г.

На основе современных данных об оптических характеристиках тропосферного (0–12 км) аэрозоля смоделирован ряд региональных статистических ансамблей коэффициентов аэрозольного ослабления (КАО), рассеяния (КАР), а также параметра асимметрии индикатрисы рассеяния (ПА). Для континентального и морского ансамблей рассчитаны ковариационные матрицы и исследованы корреляции, в том числе и спектральные, между различными аэрозольными оптическими параметрами в каналах 0,76; 1,61 и 2,06 мкм. Указанные каналы являются центрами полос поглощения кислорода (0,76 мкм) и углекислого газа (1,61 и 2,06 мкм), которые планируется использовать для высокоточного определения общего содержания CO₂ в проекте ОСО (Orbital Carbon Observatory). Показано, что значительные корреляции (0,7–1,0) существуют между КАО и КАР во всех каналах. Корреляции между КАО и ПА значительно меньше (0,05–0,55). Проведена аппроксимация спектрального хода КАО, КАР и ПА с использованием метода оптимальной параметризации и параметризации, основанной на формуле Ангстрема. На примере ансамблей континентального и морского аэрозолей показано, что метод оптимальной параметризации дает средние по трем каналам погрешности аппроксимации 0,02–1,5%, метод параметризации Ангстрема – 1,2–9,9%.

Введение

Проблемы изменения климата нашей планеты стимулировали интенсивные исследования глобального кругооборота углерода [1, 2]. Это связано с тем, что атмосферный CO₂ является одним из наиболее важных парниковых газов, имеющих значительные антропогенные источники. Для определения интенсивности источников и стоков CO₂, их географического распределения разрабатываются программы спутниковых измерений общего содержания CO₂. Цель этих измерений – получение регулярных глобальных карт содержания CO₂ и на их основе решение соответствующей обратной задачи – определение интенсивности различных источников и стоков CO₂ [3, 4].

В планируемых спутниковых экспериментах предлагается использовать измерения уходящего излучения в ближней инфракрасной (ИК) области спектра. Так, в проекте ОСО (Orbital Carbon Observatory) предполагаются измерения отраженного и рассеянного солнечного излучения в полосах поглощения O₂ (0,76 мкм) и CO₂ (1,61 и 2,06 мкм).

На основе предварительного анализа погрешностей определения общего содержания CO₂ был сделан вывод о том, что измерения в полосе 1,61 мкм обладают максимальной чувствительностью к вариациям CO₂ вблизи поверхности, а измерения в полосе кислорода и полосе CO₂ 2,06 мкм позволят получить необходимую информацию о приземном давлении, альбедо поверхности, температуре атмосферы, содержании водяного пара, характеристиках аэрозолей и облаков [3, 4].

Для эффективного спектрального разделения влияния различных параметров атмосферы и поверхности на уходящее излучение измерения будут осуществляться с высоким спектральным разрешением (разрешающая способность – не менее 17000). С учетом относительно малых пространственных и временных вариаций CO₂ требуемая точность спутниковых измерений очень высока (0,1–0,5%), что делает необходимым разработку высококачественной физико-математической модели спутникового эксперимента и оптимальной методики решения обратной задачи – определения общего содержания углекислого газа.

В общем случае величина интенсивности I уходящего отраженного и рассеянного солнечного излучения на длине волны λ определяется совокупностью ряда параметров атмосферы и поверхности:

$$I(\lambda) = I(\lambda, q_i(z), \alpha_r(z, \lambda), \chi_r(z, \gamma, \lambda), \alpha_a(z, \lambda), \sigma_a(z, \lambda), \chi_a(z, \gamma, \lambda), A, \dots), \quad (1)$$

где q_i – отношение смеси i -го поглощающего газа; α_r, χ_r – коэффициент ослабления и индикатриса рэлеевского рассеяния, определяемые вертикальным профилем плотности атмосферы; $\alpha_a, \sigma_a, \chi_a$ – коэффициенты аэрозольного ослабления (КАО), рассеяния (КАР), индикатриса рассеяния; A – оптические характеристики поверхности (в простейшем случае – альбедо). Аэрозольные оптические характеристики определяются, в свою очередь, параметрами микроструктуры аэрозолей и их комплексным показателем преломления [5].

Таким образом, функционалы уходящего излучения, измеряемые спутниковыми приборами, определяются многими параметрами атмосферы и поверхности. Эти параметры должны восстанавливаться в процессе решения обратной задачи, или их влияние должно тем или иным способом исключаться. Атмосферный аэрозоль является одним из самых изменчивых параметров атмосферы, его вклад в формирование уходящего излучения в ближней ИК-области спектра очень изменчив. При этом оптические характеристики аэрозоля являются функциями длины волны и высоты (КАО и КАР), а также угла рассеяния (индикатриса), что приводит к тому, что число параметров аэрозоля, подлежащих восстановлению, очень большое.

В связи с этим при рассмотрении влияния аэрозольной компоненты целесообразно использовать статистические методы анализа [6]. Современный подход к построению статистических моделей аэрозоля, а также различные способы его использования в прямых и обратных задачах атмосферной оптики изложены и продемонстрированы в работах [7–9]. В предлагаемой статье указанный подход используется для анализа корреляций между оптическими характеристиками аэрозоля в ближней ИК-области спектра. Величина этих корреляций будет в значительной степени определять эффективность учета влияния аэрозоля или его исключения при решении обратной задачи восстановления содержания углекислого газа.

Это связано с тем, что независимо от используемого подхода к определению CO_2 (решение линейаризованного аналога уравнения переноса излучения, методика DOAS, использование концепции оптических длин путей) необходимо задавать основные оптические характеристики аэрозоля (КАО и КАР, индикатрису рассеяния) в полосах поглощения O_2 и CO_2 для решения прямой задачи переноса излучения. Эффективная оценка оптических параметров аэрозоля из самих измерений уходящего излучения во всех рассматриваемых спектральных областях возможна только при наличии достаточно тесных спектральных корреляционных связей между ними.

1. Построение статистических моделей тропосферного аэрозоля

При статистическом моделировании изменчивости оптических характеристик тропосферного аэрозоля за основу принимались данные модели OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds) [10], базирующейся на многочисленных натуральных измерениях (подробнее на сайте <http://www.lrz-muenchen.de/~uh234an/www/radaer/opac.html>). В этой модели содержатся оптические характеристики аэрозоля (КАО, КАР и параметр асимметрии (ПА) индикатрисы рассеяния) в диапазоне длин волн 0,25–40 мкм в расчете на одну частицу для следующих 10 тропосферных фракций: WASO (водорастворимый аэрозоль, состоящий из различных

сульфатов, нитратов и других органических и неорганических соединений), INSO (нерастворимые в воде частицы – смесь частиц пыли, почвы и различных нерастворимых частиц органического происхождения), SOOT (сажевые частицы), MINM, MIAM, MICM, MITR (минеральные кварцевые и глиняные частицы), SSAM, SSCM (частицы морской соли) и SUSO (стратосферные сульфатные частицы, на 75% состоящие из капель серной кислоты). Оптические свойства таких фракций, как WASO, SSAM, SSCM и SUSO, зависят от влажности атмосферы. Количество частиц фракций SSAM и SSCM, содержащихся в единице объема, также зависит от скорости ветра.

Таким образом, при построении статистических ансамблей оптических свойств глобального тропосферного аэрозоля нами варьировались 13 независимых параметров: концентрации частиц 10 аэрозольных фракций, относительная влажность атмосферы, высота рассматриваемого аэрозольного слоя (с вертикальным разрешением 1 км) и скорость ветра для фракций SSAM и SSCM.

Для построения глобальной и локальных статистических моделей были определены средние значения и среднеквадратические отклонения (СКО) числа частиц описанных фракций с учетом соотношения числа различных частиц, частоты реализации аэрозольных типов по всей земной атмосфере, а также высотного распределения аэрозоля, различной скорости ветра и влажности. Поскольку значения числа частиц разных фракций отличаются на порядки друг от друга, то при моделировании все расчеты проводились не для самих концентраций, а для их натуральных логарифмов. На основе полученных значений дисперсии числа частиц для каждой фракции в тропосфере строились модельные ковариационные матрицы с радиусом корреляции между слоями атмосферы 2 км. Средние значения и ковариационные матрицы были использованы для построения высотных профилей числа частиц разных фракций (с помощью генератора случайных чисел). По полученным реализациям количества частиц рассчитывались КАО, КАР, ПА и их спектральные зависимости. Более подробно особенности моделирования статистических моделей тропосферного аэрозоля изложены в работе [8], где также продемонстрировано хорошее согласование статистических свойств смоделированных и экспериментальных ансамблей.

Как уже было указано ранее, кроме глобального ансамбля тропосферного аэрозоля нами были также построены аналогичным способом несколько локальных ансамблей той же размерности. Локальные ансамбли относились к зоне пустынь, океанической зоне, к континентальной зоне и т.д. В табл. 1 представлены некоторые характеристики двух локальных ансамблей тропосферного аэрозоля: континентального и морского, на примере которых далее рассмотрены связи между оптическими характеристиками в измерительных каналах спутникового прибора ОСО.

Таблица 1

Характеристики локальных моделей тропосферного аэрозоля (толщина слоя, высота однородной атмосферы H , аэрозольные фракции и разброс их приземных концентраций N_0)

Модель	Слой, км	H , км	Фракция (разброс N_0)
Континент	0–2	8	WASO (906–114385), INSO (0,04–3,9), SOOT (78–2096980)
Морская	0–2	1	WASO (25–11890), SOOT (1–88492), SSAM (0,8–56), SSCM (0,0001–0,007)
Свободная тропосфера	2–12	8	WASO (34–1045), INSO (0,02–0,14), SOOT (26–735)

Во втором столбце табл. 1 приведены границы слоев, на которые делится при моделировании тропосфера, в третьем — высота аэрозольной однородной атмосферы, по которой экспоненциально вычисляется вертикальный ход числа частиц, в четвертом — фракции, которые учитываются при моделировании, а также приземные значения концентрации аэрозольных частиц каждой фракции. Видно, что и в континентальной, и в морской модели присутствуют аэрозольные частицы таких фракций, как WASO и SOOT. В свободной атмосфере и в континентальном пограничном слое также содержатся частицы INSO. В пограничном слое морской модели, кроме того, учитываются фракции SSAM и SSCM.

Для лучшего понимания спектрального хода оптических характеристик ансамблей (типов) тропосферного аэрозоля нами предварительно был проанализирован спектральный ход оптических характеристик отдельных фракций аэрозоля, входящих в состав рассматриваемых ансамблей. Анализ мнимой части комплексного показателя преломления, определяющей в значительной степени поглощение атмосферного аэрозоля, показал, что в рассматриваемой области спектра его зависимость от длины волны различна для разных фракций тропосферного аэрозоля, а наибольшие значения наблюдаются для частиц фракции SOOT. При этом анализ спектрального поведения КАО и КАР в расчете на одну частицу показал, что только для частиц SOOT характерны значительные отличия между КАР и КАО, для остальных аэрозольных фракций — основное ослабление излучения происходит за счет рассеяния. Кроме того, было определено, что индикатриса рассеяния имеет различную форму для частиц разных фракций. Так, значения ПА, близкие к нулю (т.е. к изотропному рассеянию), в особенности в длинноволновой области, наблюдаются для фракции SOOT ($ПА = 0,1 \pm 0,3$), для фракции WASO — ПА несколько больше ($0,45 \pm 0,65$). Для аэрозольных частиц фракций INSO, SSAM и SSCM индикатриса имеет вид, наиболее вытянутый вперед ($ПА = 0,8 \pm 0,9$).

Таким образом, на основе смоделированных ансамблей числа частиц (500 вертикальных профилей числа частиц различных аэрозольных фракций,

каждый на 25 высотах тропосферы 0–12 км) нами были рассчитаны ансамбли оптических характеристик аэрозоля в трех областях спектра и построены ковариационные матрицы рассматриваемых параметров. Эти матрицы в дальнейшем могут быть использованы в процессе решения обратной задачи, в качестве, например, априорной информации или в регрессионном подходе к определению искомым параметров [8, 9, 11]. Более подробная информация о моделях, а также сами модели в ближайшее время будут размещены на сайте лаборатории дистанционного зондирования кафедры физики атмосферы СПбГУ (<http://troll.phys.spbu.ru>).

В настоящей статье на основе ковариационных матриц исследованы:

- спектральные корреляции оптических характеристик,
- корреляции между разными оптическими параметрами,
- точность оптимальной параметризации оптических аэрозольных характеристик для трех длин волн — как элемент построения методики определения аэрозольного типа и решения обратной задачи.

2. Статистические характеристики построенного оптического ансамбля

Для количественной характеристики сформированных ансамблей аэрозольных оптических характеристик проанализируем оптические толщи тропосферного аэрозоля в рассматриваемых ансамблях. На рис. 1 представлены средние значения и СКО аэрозольных оптических толщ (в дальнейшем, оптических толщ) в трех областях спектра для тропосферных моделей континентальной и морской аэрозоля.

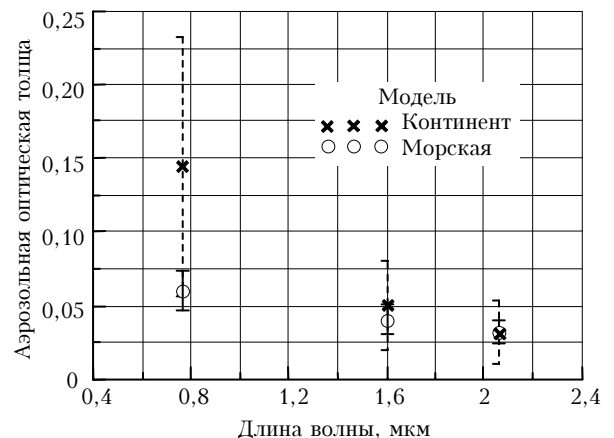


Рис. 1. Средние значения и СКО оптических толщ тропосферного аэрозоля в различных измерительных каналах для разных моделей тропосферного аэрозоля

Из рис. 1 видно, что наибольшие средние значения оптических толщ наблюдаются в ансамбле континентальной модели, наименьшие — в ансамбле морской модели. При этом для континентальной модели тропосферного аэрозоля наблюдаются значительные изменения оптических толщ при переходе

из канала 0,76 мкм к каналу 2,06 мкм. Подобные изменения характерны для условий атмосферы средних широт, близких к фоновым (см. [12]). Сами средние значения для континентальной модели также хорошо согласуются со средними данными многолетних наблюдений [12], в большей степени для незамутненной атмосферы.

Наибольшая изменчивость оптических толщ имеет место в канале 0,76 мкм. Так, для ансамбля континентальной модели значение СКО составляет примерно 60% от среднего. Средние значения оптических толщ в морской модели близки к средним данным измерений в центральной зоне Атлантики, вне зоны влияния Африканского континента, в южной части Индийского океана и в Южном океане [12], т.е. также в районах с относительно высокой прозрачностью атмосферы. Таким образом, можно сказать, что построенные нами ансамбли континентального и морского тропосферного аэрозоля отражают статистические свойства незагрязненной атмосферы.

3. Корреляции между различными оптическими параметрами аэрозоля

Исследование корреляций, существующих между различными параметрами, позволяет оценить возможность определения одних параметров из других [8, 9]. Так, в проекте ОСО [3, 4] по измерению содержания углекислого газа планируется основную информацию об аэрозольных параметрах извлекать из измерений в полосе кислорода 0,76 мкм и экстраполировать ее в полосы поглощения углекислого газа 1,61 и 2,06 мкм. Рассмотрим на примере построенных ансамблей спектральные статистические связи между оптическими параметрами аэрозоля.

Будем рассматривать три отдельных ансамбля: пограничный континентальный, пограничный морской и свободная тропосфера (см. табл. 1), называя их просто континентальной, морской моделью и моделью свободной тропосферы соответственно. Для упрощения расчетов и анализа мы смешали все значения оптических параметров внутри рассматриваемых моделей, т.е. исследовали статистические связи независимо от высоты в слое тропосферы, считая все реализации оптических параметров случайными величинами. Таким образом, ансамбли континентальной и морской модели включают в себя 2500 реализаций, а ансамбль свободной тропосферы – 10000 реализаций оптических параметров тропосферного аэрозоля.

На рис. 2 показана спектральная зависимость коэффициента корреляции между КАО в канале 0,76 мкм и КАО, КАР и ПА (сплошная, пунктирная и штрихпунктирная кривые соответственно) во всех каналах для трех моделей тропосферного аэрозоля.

Из рис. 2 видно, что для рассматриваемых ансамблей наблюдаются значительные корреляции (0,85–0,99) между КАО в канале 0,76 мкм и КАО и КАР в других каналах. Исключение составляет

ансамбль континентальной модели, для которого корреляции с КАР уменьшаются с 0,8 в канале 0,76 мкм до 0,55 в канале 2,06 мкм. Корреляции между КАО и ПА значительно меньше и практически не зависят от длины волны. Так, для ансамбля морской модели корреляции близки нулю, для ансамбля свободной тропосферы – составляют 0,40–0,45, для ансамбля континентального аэрозоля – 0,55 (по абсолютной величине).

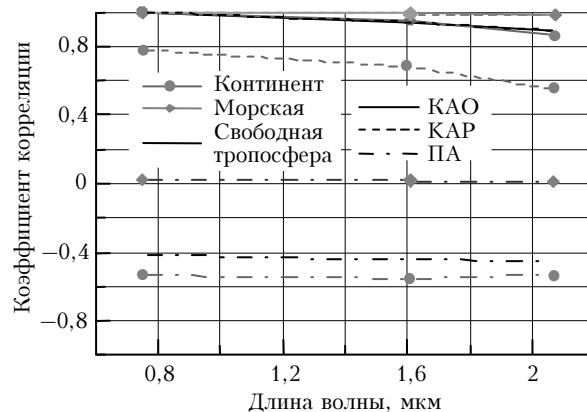


Рис. 2. Корреляции между КАО в канале 0,76 мкм и другими оптическими параметрами в различных измерительных каналах для разных ансамблей тропосферного аэрозоля

Следует также отметить, что, используя статистическую связь между натуральными логарифмами КАО и КАР (а не между самими значениями) для ансамбля континентальной модели, можно несколько повысить корреляции между ними. Для других ансамблей нет принципиальной разницы в величине корреляции при использовании самих значений коэффициентов или их логарифмов.

4. Оптимальная параметризация спектрального хода оптических параметров аэрозоля

При решении прямых и обратных задач атмосферной оптики часто используется параметризация спектральных характеристик оптических параметров аэрозоля. Наличие статистического ансамбля аэрозольных параметров позволяет для аппроксимации спектрального хода того или иного параметра использовать его разложение по собственным векторам соответствующей ковариационной спектральной матрицы, образующим эмпирический ортогональный базис [7, 13]. Напомним, что оптимальная параметризация спектрального хода аэрозольного параметра (КАО, КАР или ПА) $\sigma(\lambda_i)$ может быть записана как

$$\sigma(\lambda_i) = \bar{\sigma}(\lambda_i) + \sum_{p=1,n} a_p f_p(\lambda_i),$$

где $f_p(\lambda_i)$ – собственные векторы спектральной ковариационной матрицы аэрозольного параметра; a_p – соответствующие коэффициенты разложения.

На примере построенных ансамблей мы провели сравнение метода оптимальной параметризации и другого часто используемого метода, основанного на распределении числа частиц по размерам в соответствии с формулой Ангстрема [5, 14]: $\sigma(\lambda) = \sigma_0 \lambda^{-a}$, где σ_0 и a – некоторые параметры. В табл. 2 показана средняя по всем трем каналам относительная погрешность аппроксимации КАО, КАР и ПА с использованием оптимальной параметризации и параметризации Ангстрема. Отметим, что в обоих случаях использовалась двухпараметрическая параметризация.

Таблица 2
Погрешность (%) разных видов спектральной параметризации (во всех трех каналах) аэрозольных параметров для различных ансамблей тропосферного аэрозоля

Вид	Параметр	Континентальный 0–2 км	Морской 0–2 км	Свободная тропосфера
Ангстрем	КАО	5,9	3,9	2,1
	КАР	9,9	4,1	1,2
	ПА	5,4	1,4	6,5
Оптимальная	КАО	0,3	0,03	0,02
	КАР	0,3	0,02	0,02
	ПА	1,5	0,04	0,07

Из табл. 2 видно, что оптимальная параметризация имеет значительное преимущество перед параметризацией, основанной на формуле Ангстрема. Это преимущество сильнее всего проявляется для случая параметризации КАР в ансамбле континентальной модели, когда в ослаблении аэрозоля за счет сажевых частиц заметную роль начинает играть поглощение. В целом же видно, что оптимальная параметризация дает погрешности спектральной аппроксимации КАО и КАР 0,02–0,3%, ПА – 0,04–1,5%. При этом погрешности параметризации Ангстрема для всех трех рассматриваемых параметров и ансамблей составляют 1,2–9,9%.

Нами также был проанализирован спектральный ход относительной погрешности оптимальной параметризации и параметризации Ангстрема. Было получено, что для КАО и КАР погрешность параметризации Ангстрема растет с длиной волны. Так, погрешность аппроксимации КАР для канала 2,06 мкм в ансамбле континентального аэрозоля достигает 22%. Для оптимальной параметризации относительная погрешность аппроксимации КАО и КАР максимальна для канала 1,61 мкм, но при этом она не превышает 0,5%.

Заключение

В результате проведенных исследований:

1. Созданы глобальная и ряд региональных статистических моделей оптических свойств тропосферного аэрозоля. Сгенерированы ансамбли континентальной и морской моделей тропосферного аэрозоля, содержащие по 500 реализаций высотных

профилей (0–12 км) коэффициентов ослабления и рассеяния аэрозоля, а также параметра асимметрии индикатрисы Хэнви–Гринштейна (среднего косинуса рассеяния). Рассчитаны ковариационные матрицы построенных ансамблей оптических параметров.

2. Исследованы корреляции, в том числе и спектральные, между различными аэрозольными параметрами в каналах 0,76; 1,61 и 2,06 мкм. Показано, что значительные корреляции существуют между КАО и КАР во всех каналах. Коэффициент корреляции между натуральными логарифмами этих параметров равен 0,7–1,0, в зависимости от модели, канала и параметра. Корреляции между КАО и ПА значительно меньше (0,05–0,55) и практически не зависят от длины волны.

3. Проведена аппроксимация спектрального хода КАО, КАР и ПА с использованием метода оптимальной параметризации и параметризации Ангстрема. Показано, что метод оптимальной параметризации дает средние по трем каналам погрешности аппроксимации 0,02–1,5%, метод параметризации Ангстрема – 1,2–9,9%. При этом погрешности оптимальной параметризации в отдельных каналах для ансамблей морской модели (0–2 км) и модели свободной тропосферы (2–12 км) не превышают 0,1%. Погрешность параметризации Ангстрема для КАО и КАР растет с длиной волны и для КАР в канале 2,06 мкм в ансамбле континентального аэрозоля (0–2 км) достигает 22%.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов Минобрнауки России РНП.2.1.1.4166 и РНП.2.2.1.1.3836, а также гранта РФФИ № 06-05-64909.

1. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Глобальный круговорот углерода: состояние, проблемы и перспективы // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 3. С. 1–10.
2. Houghton J.T. Global warming: the complete briefing. The third edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 351 p.
3. Crisp D., Johnson C. The Orbiting Carbon Observatory Mission // Acta Astronautica. 2005. V. 56. N 1–2. P. 193–197.
4. Haring R.E., Pollock R., Sutin B.M., Crisp D. Current development status of the Orbiting Carbon Observatory instrument optical design // Proc. SPIE. / Ed. by M. Strojnik. 2005. V. 5883. P. 61–70.
5. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
6. Малкевич М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников. М.: Наука, 1973. 303 с.
7. Timofeyev Yu.M., Polyakov A.V., Steele H.M., Newchurch M.J. Optimal Eigenanalysis for the Treatment of Aerosols in the Retrieval of Atmospheric Composition from Transmission Measurements // Appl. Opt. 2003. V. 42. N 12. P. 2635–2646.
8. Виролайнен Я.А., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Статистические модели оптических свойств тропосферного аэрозоля // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2004. Т. 40. № 2. С. 255–266.
9. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Стил Х., Ньючерч М. Анализ решений обратной задачи по восстановлению микроструктуры стратосферного аэрозоля из спутниковых измерений // Изв.

- РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2006. Т. 42. № 6. С. 816–829.
10. Hess M., Koepke P., Schult I. Optical properties of aerosol and clouds: The software package OPAC // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. N 5. P. 831–844.
 11. Виrolайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Стил Х., Дрда Е., Ньючерч М. Моделирование полярных стратосферных облаков: II. Статистика спектрального коэффициента ослабления и возможности дистанционного зондирования ПСО // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 7. С. 586–591.
 12. Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К. Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 224 с.
 13. Обухов А.М. О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1960. № 3. С. 432–439.
 14. Lenoble J., Pruvost P. Inference of the aerosol Angstrom coefficient from SAGE short-wavelength data // J. Climate and Appl. Meteorol. 1983. V. 22. N 10. P. 1717–1725.

Ya.A. Virolainen. The correlation between aerosol optical properties in near infra-red molecular absorption bands.

Several regional statistical ensembles of tropospheric (0–12 km) aerosol optical properties (extinction – AEC, scattering – ASC and asymmetry parameter – AP) have been modeled based on up-to-date experimental data. The covariance matrices of optical parameters for continental and maritime ensembles have been calculated. The spectral correlation in molecular absorption bands (O_2 – 0.76 μm , CO_2 – 1.61 and 2.06 μm) between AEC, ASC and AP has been studied. These bands will be used in OCO (Orbital Carbon Observatory) mission for determination of CO_2 total column with high accuracy. It has been shown that significant correlation (0.7–1.0) takes place between AEC and ASC in these channels. The correlation between AEC and PA are smaller (0.05–0.55). The optimal parameterization method as well as Angstrom parameterization has been applied for spectral approximation of AEC, ASC and PA. It has been shown that approximation error of optimal parameterization totals 0.02–1.5%, of Angstrom parameterization – 1.2–9.9% for continental and maritime aerosol models.