

Об определении микроструктуры стратосферного аэрозоля по измерениям рассеянного солнечного излучения горизонта Земли

С.Г. Семакин, Ю.М. Тимофеев, А.В. Поляков, Я.А. Виролайнен*

Санкт-Петербургский государственный университет
198504, г. Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1

Поступила в редакцию 14.08.2009 г.

Рассмотрена обратная задача восстановления микрофизических параметров стратосферного аэрозоля (интегральных площадей частиц S и интегральных объемов V) по измерениям спектров рассеянного солнечного излучения горизонта Земли с помощью аппаратуры SAGE III с учетом вариаций всех важнейших параметров атмосферы и поверхности. Исследованы численными методами погрешности восстановления S и V для различных условий спутниковых экспериментов и различных длин волн. Показано, что погрешности восстановления S и V для высот 12–45 км составляют 28–33 и 33–40% соответственно. Информативность дистанционного метода измерений составляет 60–75% для S и 65–75% для V . Осреднение априорных профилей микрофизики аэрозоля по 5-км слоям дает уменьшение погрешностей восстановления S на 10–13 и V на 15–20%.

Ключевые слова: дистанционное зондирование атмосферы, стратосферный аэрозоль, рассеянное в лимбе солнечное излучение; remote sensing, stratospheric aerosol, limb scatter solar radiation.

Введение

Стратосферный аэрозоль — важный компонент различных атмосферных процессов по влиянию на радиационный баланс и химию атмосферы. Во время и после мощных вулканических извержений он активно участвует в гетерогенных процессах, приводящих к разрушению озонового слоя, к нагреванию стратосферы и охлаждению тропосферы [1, 2]. В фоновом состоянии стратосферный аэрозоль играет заметную роль в балансе ряда газов, в частности семейства NO_x . Анализ пространственно-временных вариаций стратосферного аэрозоля позволяет исследовать динамику атмосферы.

Оптические и микрофизические характеристики стратосферного аэрозоля уже длительное время исследуются с помощью различных локальных и дистанционных методов [3]. Значительное количество информации о стратосферном аэрозоле было получено в последние десятилетия с помощью спутниковых методов, в частности затменным методом в последовательных спутниковых экспериментах с аппаратурой SAGE I, II и III [4–6]. Однако основным недостатком этого метода является малое число измерений за сутки, что существенно затрудняет исследования пространственно-временных вариаций

атмосферных параметров. В связи с этим в последние годы активно исследуется спутниковый метод, основанный на использовании измерений рассеянного солнечного излучения горизонта Земли [7, 8].

В работе [9] предложена новая методика интерпретации спутниковых измерений рассеянного солнечного излучения в лимбе планеты, использующая в качестве априорной информации при решении обратной задачи статистические модели оптических характеристик стратосферного аэрозоля. В работе авторов [10] исследованы погрешности восстановления важнейшего оптического параметра аэрозолей — коэффициента аэрозольного рассеяния (КАР) на основе численного моделирования рассматриваемого спутникового метода измерений с помощью радиационного кода SCIATRAN [11].

Более полные оптические характеристики аэрозоля включают в себя не только коэффициент рассеяния, но и индикатрису рассеяния. В работе [12] проанализированы потенциальные погрешности восстановления КАР и характеристики индикатрисы рассеяния — параметра асимметрии (ПА), т.е. в общей постановке обратной задачи по сравнению с работой [10]. В [10] учитываются вариации всех основных параметров атмосферы и поверхности — профилей температуры и давления, содержания озона и альбедо поверхности. В качестве метода решения обратной задачи использовался метод множественной линейной регрессии.

В данной статье анализируются потенциальные точности определения интегральных микрофизических характеристик стратосферного аэрозоля — суммарных площадей S и объемов частиц V .

* Сергей Геннадьевич Семакин (sgs@rbcmail.ru); Юрий Михайлович Тимофеев (tim@troll.phys.spbu.ru, Yu.M.Tim@JT14934.spb.edu); Александр Викторович Поляков (polyakov@troll.phys.spbu.ru, alexandr@AP13786.spb.edu); Яна Акселевна Виролайнен (Yana.Virolainen@JV14952.spb.edu).

1. Детали расчетов

При численном анализе погрешностей дистанционных измерений интегральных параметров микроструктуры стратосферного аэрозоля (площадей S и объемов V) моделировался спутниковый эксперимент SAGE III, в котором уходящее излучение горизонта планеты измерялось в 8 длинах волн (384, 449, 520, 601, 676, 755, 869, 1022 нм) и на прицельных высотах от 10 до 70 км с шагом 1 км при различных условиях освещения Солнца и геометрии измерений. Модель погрешностей измерений, соответствующая прибору SAGE III, успешно осуществившему лимбовые измерения в российско-американском эксперименте на МИСЗ «Метеор-3М», № 1, описана в работах [12, 13].

На первом этапе был создан ансамбль состояний атмосферы и поверхности (1200 реализаций) – вертикальных профилей S и V , профилей температуры и давления, содержания поглощающих газов, альbedo поверхности. Описание использованных для генерации реализаций S и V статистических моделей атмосферного аэрозоля содержится в работах [14, 15]. Естественные вариации (априорная неопределенность) интегральных параметров микрофизики аэрозоля для S и для V достигают относительных значений 60–150%, что характеризует «широту» использованных нами ансамблей. При построении реализаций вертикальных профилей температуры и давления использовался международный банк TIGR.

Следует отметить, что модельные микрофизические характеристики стратосферного аэрозоля – интегральные площади и объемы – были рассчитаны интегрированием функции распределения частиц по размерам с различными пределами размеров частиц. Исследование показало, что интегрирование в пределах от 0,005 до 5 мкм вполне достаточно для учета вклада в S и V всех возможных частиц аэрозоля в стратосфере.

На втором этапе исследований для всех 1200 состояний атмосферы и поверхности с помощью кода SCIATRAN решалась прямая задача – вычислялись спектры интенсивности рассеянного солнечного излучения горизонта планеты для набора прицельных высот и для различных условий освещения (зенитных и азимутальных углов Солнца и прицельных высот). Радиационный код SCIATRAN [11] позволяет рассчитывать интенсивности рассеянного излучения в УФ-, видимой и ближней ИК-областях спектра для сферической модели атмосферы. Код учитывает газовое поглощение, молекулярное рассеяние, рефракцию, отражение от поверхности или облаков, а также многократное рассеяние.

Каждому вычислению интенсивности в нашей задаче соответствовало отдельное значение альbedo подстилающей поверхности, отдельные профили температуры, давления, концентраций озона и водяного пара. Таким образом, предполагалось, что вариации интенсивности излучения горизонта планеты определялись вариациями всех основных физических и оптических параметров состояния атмо-

сферы. Наличие исходного ансамбля параметров S и V , других параметров состояния атмосферы и соответствующих им рассчитанных спектров уходящего рассеянного солнечного излучения позволило построить решающий оператор обратной задачи R в методике множественной линейной регрессии:

$$R = K_{xy}(K_{yy} + \Sigma)^{-1}, \quad (1)$$

где K_{yy} – ковариационная матрица интенсивностей (сосчитанных с помощью кода SCIATRAN); K_{xy} – кроссвариационная матрица интенсивностей (y) и параметров S и V модельных профилей параметров аэрозоля (x); Σ – ковариационная матрица погрешностей измерения (прибор SAGE III).

Решение обратной задачи дается выражением

$$x = \bar{x} + K_{xy}(K_{yy} + \Sigma)^{-1}(y - \bar{y}), \quad (2)$$

где x и \bar{x} – искомый и средний векторы параметров аэрозоля; y и \bar{y} – измеряемый и средний векторы интенсивности рассеянного в лимбе излучения. Вектор y в нашей задаче представлял собой составной вектор, элементами которого являются интенсивности уходящего излучения в 8 спектральных интервалах (384–1022 нм) прибора SAGE III на 61 прицельной высоте от 10 до 70 км (через 1 км). Вектор x представлял собой искомые вертикальные профили параметров S и V на 50 высотах в атмосфере (от 10 до 60 км).

Оценка матрицы ошибок косвенного метода \tilde{D} вычисляется по следующей формуле:

$$\tilde{D} = K_{xx} - K_{xy}(K_{yy} + \Sigma)^{-1}K_{yx}. \quad (3)$$

Корни из диагонали апостериорной матрицы \tilde{D} характеризуют абсолютную погрешность восстановления интегральных параметров стратосферного аэрозоля.

После построения решающего оператора были проведены численные эксперименты по замкнутой схеме по восстановлению векторов S и V для всех 1200 реализаций состояния атмосферы. В этих экспериментах использовались «измеренные» интенсивности излучения, полученные из расчетных значений добавлением «ошибок измерений» по алгоритму, описанному в работе [12] для прибора SAGE III. Отметим, что с увеличением длины волны погрешность измерений по модели, предоставленной R.P. Loughman, NASA, существенно возрастает, в то время как сама величина сигнала падает на полпорядка по большей части в силу уменьшения рэлеевского и аэрозольного рассеяния. Погрешности измерений интенсивности растут также и с высотой и составляют 0,2% на высотах 10–20 км на всем спектральном диапазоне и от 5 до 250% на высотах 50–60 км для длин волн 384 и 1022 нм соответственно.

На последнем этапе исследований были вычислены различные характеристики рассогласований восстановленных вертикальных профилей S и V при сравнении их с точными значениями – погрешности решения обратной задачи. Анализ погрешностей проводился для различных условий

наблюдений и освещения — для зенитных углов Солнца (ЗУС) 0, 45, 85°, азимутов Солнца (АС) 20, 90, 160° и прицельных высот измерений 10–70 км с шагом 1 км.

2. Результаты исследования

Потенциальные возможности решения рассматриваемой задачи можно проанализировать, исследуя ковариационную матрицу K_{xy} , описывающую наличие связей между измеряемыми интенсивностями рассеянного солнечного излучения и определяемыми параметрами S и V . На рис. 1 приведены примеры коэффициентов корреляции между интегральными площадями частиц S на высотах 10–60 км и соответствующими интенсивностями рассеянного в лимбе солнечного излучения, рассчитанными с помощью радиационного кода SCIATRAN на прицельных высотах 10–60 км.

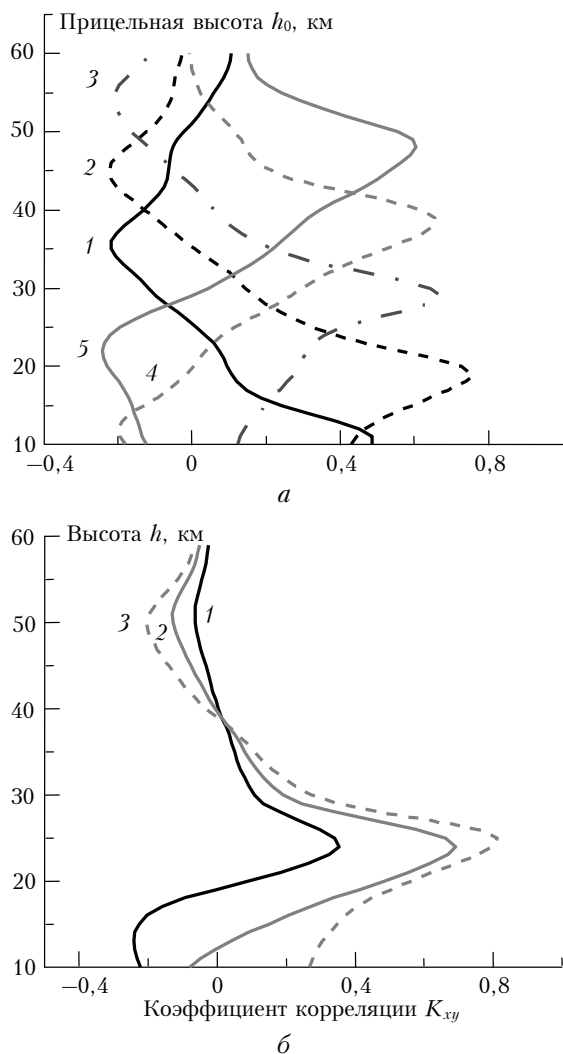


Рис. 1. Профили коэффициентов корреляции между площадями частиц и интенсивностями рассеянного солнечного излучения для длины волны 1022 нм на различных высотах $h = 10$ (1), 20 (2), 30 (3), 40 (4), 50 км (5) — a ; профили корреляции на прицельной высоте 25 км для $\lambda = 385$ (1), 520 (2), 1022 нм (3) — b

Следует отметить, что для интегральных объемов V графики корреляций выглядят аналогично, поэтому здесь не приведены. На рис. 1, a показаны профили коэффициента корреляции на длине волны 1022 нм для набора высот интегрального параметра S . Видно, что корреляции имеют выраженные максимумы от 0,6 до 0,75 на высотах, соответствующих прицельным высотам измерений. На длине волны 1022 нм указанные корреляции максимальны (см. рис. 1, b , на котором представлены профили корреляции на прицельной высоте 25 км для трех различных длин волн — 384, 520 и 1022 нм).

На рис. 2 приведены вертикальные профили относительных погрешностей восстановления S и V для различных условий освещения и геометрии спутниковых наблюдений, а также априорные неопределенности этих интегральных параметров.

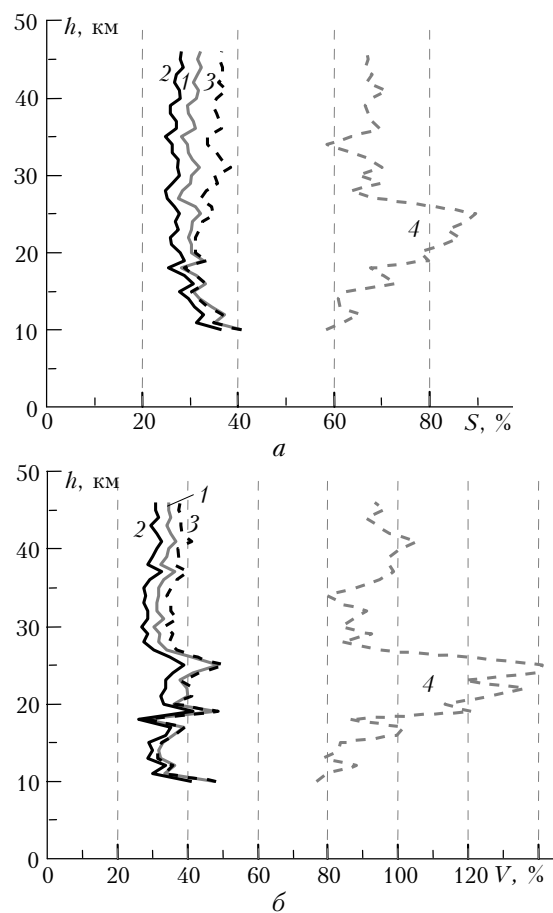


Рис. 2. СКО погрешности восстановления и априорная неопределенность (кривая 4) в площадях частиц (a) и объемах (b) для различных условий геометрии освещения атмосферы. Кривые 1 — ЗУС 54°, АС 51°; кривые 2 — ЗУС 85°, АС 20°; кривые 3 — ЗУС 0°, АС 90°

Результаты усреднены по 200 случайным восстановленным профилям. Погрешности восстановления S и V зависят от условий наблюдения, — для ЗУС 85° и АС 20°, т.е. для случая, когда Солнце близко к горизонту, а азимут наблюдения направлен к светилу, погрешности восстановления минимальны и составляют 25–30% для S и 25–35% для V соответственно на высотах 15–40 км. Это обусловлено

спецификой аэрозольной индикатрисы рассеяния — существенно большими ее значениями при малых углах рассеяния, что приводит к росту вклада аэрозольного компонента и увеличению вариаций интенсивности излучения за счет вариаций микрофизических параметров аэрозоля. Это в свою очередь повышает информативность измерений спутникового прибора.

Отметим, что априорные неопределенности S и V , как видно из рис. 2, имеют значения от 60–90 до 80–140% соответственно. Таким образом, информативность дистанционного измерения (в терминах относительного уменьшения априорной неопределенности восстанавливаемого параметра) составляет 60–70 и 65–75%.

Дополнительное исследование влияния вариаций альbedo подстилающей поверхности на восстановление интегральных площадей и объемов частиц аэрозоля показало, что для высот стратосферы изменение альbedo не вносит существенного вклада в погрешность восстановления S и V .

На рис. 3 представлены графики относительной погрешности \bar{D} восстановления S и V для модельных профилей площадей и объемов на сетке с шагом 1 км, а также с осреднением по высотам 5 км, в сравнении с априорными неопределенностями D .

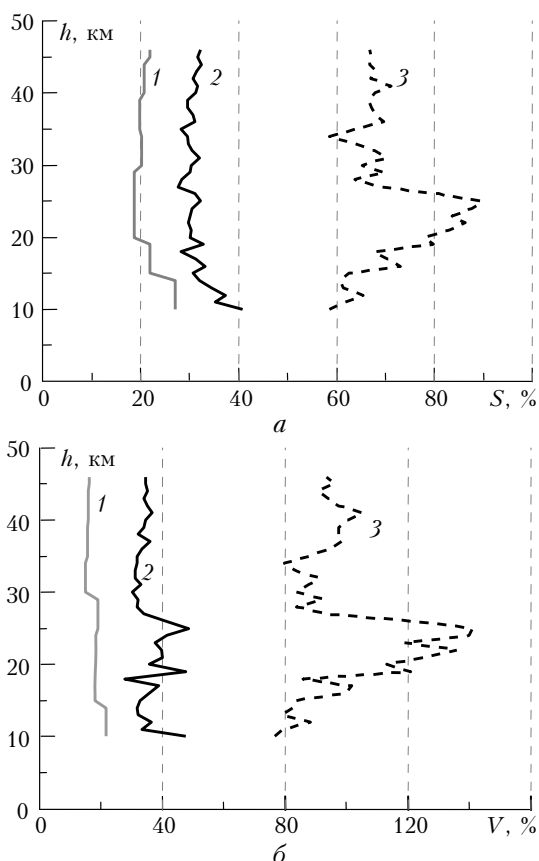


Рис. 3. Сравнение профилей погрешностей \bar{D} восстановления S и V для стандартного высотного шага 1 км (кривая 2) и для осредненных профилей по слоям толщиной 5 км (кривая 1), а также их априорная неопределенность (кривая 3) D

Видно, что при грубом высотном шаге погрешность восстановления S уменьшилась в 1,5 раза — с 28–33 до 18–20%, в то время как для V произошло уменьшение относительной неопределенности почти в 2 раза — с 33–40 до 18–20%.

В работах [16, 17] методом множественной линейной регрессии исследовалась и решалась существенно более простая обратная задача по восстановлению тех же параметров стратосферного аэрозоля — интегральных площадей и объемов аэрозольных частиц — по спектральным коэффициентам аэрозольного ослабления, восстановленным по данным затменного спутникового эксперимента SAGE III. Для тех же 5-км слоев стратосферы (на высотах 10–25 км) погрешности восстановления S и V по результатам этих работ составили 7,5–15 и 5–10%.

Сравнивая эти результаты с результатами нашей работы, можно сделать вывод, что затменный эксперимент, в отличие от рассмотренного нами лимбового, дает потенциально более точные восстановления микрофизических параметров стратосферного аэрозоля. Это обусловлено прежде всего простотой обратной задачи (восстановления S и V по спектральной зависимости коэффициента аэрозольного ослабления) и высоким отношением сигнал-шум в затменных экспериментах. Относительно большие погрешности восстановления связаны с более сложной физико-математической основой лимбового метода, когда на измеряемые значения рассеянного солнечного излучения влияет очень много дополнительных факторов — отражение от поверхности, рэлеевское рассеяние, многократное рассеяние и т.д. Однако значительное преимущество спутникового лимбового метода определения оптических и микрофизических характеристик стратосферного аэрозоля по сравнению с затменным методом заключается в существенно большем числе измерений над освещенной частью атмосферы.

Заключение

1. Рассмотрена общая постановка обратной задачи по восстановлению микрофизических параметров стратосферного аэрозоля — одновременное восстановление интегральных площадей S и объемов V при учете вариаций всех основных параметров атмосферы и поверхности — профилей температуры, давления, микрофизических параметров стратосферного аэрозоля, содержания озона и альbedo поверхности.

2. Проведены численные эксперименты по восстановлению S и V по замкнутой схеме на представительном ансамбле состояний атмосферы (1200 реализаций) с использованием метода множественной линейной регрессии при моделировании измерений прибора SAGE III рассеянного солнечного излучения горизонта Земли.

3. Погрешности восстановления S и V с помощью интерпретации спектральных измерений рассеянного солнечного излучения в видимой и ближней ИК-областях спектра лимба Земли при различных условиях спутниковых экспериментов состав-

ляют на высотах 12–45 км 28–33 и 33–40% соответственно для высотного шага восстановления на сетке через 1 км. При этом происходит уменьшение априорной неопределенности S примерно в 2 раза (с 60–90 до 28–33%) и примерно в 3 раза для V (с 80–140 до 33–40%). Информативность спутникового эксперимента с прибором SAGE III по восстановлению S и V составляет 60–70 и 65–75% соответственно для высот стратосферы. Погрешности восстановления S и V можно существенно уменьшить (до 18–20%) для слоев толщиной 5 км.

4. Погрешности определения S и V заметно зависят от условий освещения атмосферы и проведения спутникового эксперимента. Повышение точности определения интегральных параметров аэрозоля наблюдается при малых углах рассеяния солнечного излучения, что обусловлено спецификой аэрозольной индикатрисы рассеяния.

5. Использование спутниковых измерений рассеянного солнечного излучения лимба планеты позволяет определять интегральные микрофизические параметры стратосферного аэрозоля с большей погрешностью, чем более простые затменные методы. Однако лимбовый метод рассеяния по сравнению с затменным методом позволяет осуществлять в течение суток не 25–30 измерений, а сотни и тысячи, что важно при изучении пространственно-временных вариаций состояния стратосферы в глобальном масштабе.

Авторы благодарят А.В. Розанова за предоставление программы SCIATRAN и полезные обсуждения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов Министерства образования и науки РФ (гранты АВЦП 1138 и АВЦП 3946) и гранта РФФИ № 08-05-00885-а.

1. Kondratyev K.Ya. Climate effects of aerosol and clouds. Springer/PRAXIS. Chichester, U.K., 1999. 264 p.
2. Кондратьев К.Я. Исследования Земли из космоса: Научный план системы EOS // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 3. С. 82–91.
3. Assessment of stratospheric aerosol properties (ASAP) / Edited by L. Thomason and Th. Peter. WCRP-124. WMO/TD. N 1295. SPARC Report N 4. 348 p. February 2006.
4. Lenoble J., Brogniez C. Information on stratospheric aerosol characteristics contained in the SAGE satellite multiwavelength extinction measurements // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 7. P. 1054–1063.
5. Yue G.K., McCormick M.P., Chu W.P. Retrieval of composition and size distribution of stratospheric aero-

sols with the SAGE II satellite experiment // J. Atmos. Ocean. Technol. 1986. N 3. P. 371–380.

6. Thomason L.W. A diagnostic stratospheric aerosol size distribution inferred from SAGE II measurements // J. Geophys. Res. D. 1991. V. 96. N 12. P. 22501–22508.
7. Flittner D.E., Bhartia P.K., Herman B.M. O₃ profiles retrieved from limb scatter measurements: Theory // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. N 17. P. 2601–2604.
8. McPeters R.D., Janz S.J., Hilsenrath E., Brown T.L. The retrieval of O₃ profiles from limb scatter measurements: Results from the Shuttles Ozone Limb Sounding Experiment // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. N 17. P. 2597–2600.
9. Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Васильев А.В., Виrolainen Я.А. Возможности определения оптических параметров аэрозоля по спутниковым измерениям рассеянного солнечного излучения // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 1. С. 19–24.
10. Семакин С.Г., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Виrolainen Я.А. Потенциальные точности восстановления коэффициента рассеяния стратосферного аэрозоля по лимбовым измерениям рассеянного солнечного излучения // Исслед. Земли из Космоса. 2009. № 4. С. 1–7.
11. Rozanov A., Rozanov V., Buchwitz M., Kokhanovsky A. and Burrows J.P. SCIATRAN 2.0 – A new radiative transfer model for geophysical applications in the 175–2400 nm spectral region // Adv. Space Res. 2005. V. 36. N 5. P. 1015–1019.
12. Семакин С.Г., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Виrolainen Я.А. Анализ погрешностей определения оптических характеристик стратосферного аэрозоля спутниковым методом лимбового рассеяния // Исслед. Земли из космоса. (Принято в печать).
13. Theoretical Basis document (ATBD) (Limb profile ozone) for the Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS). National Polar-Orbiting Operational Environmental Satellite System (NPOESS) Program.
14. Поляков А.В., Васильев А.В., Тимофеев Ю.М. Параметризация спектральной зависимости аэрозольного ослабления в задачах затменного зондирования атмосферы из космоса // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2001. Т. 37. № 5. С. 646–657.
15. Виrolainen 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.
16. Чайка А.М., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В. Стратосферный аэрозоль по данным измерений аппаратуры SAGE III // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 10–18.
17. Чайка А.М., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В. Интегральные микрофизические параметры стратосферного аэрозоля в 2002–2005 годах (спутниковый эксперимент с аппаратурой SAGE III) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 206–220.

S.G. Semakin, Yu.M. Timofeyev, A.V. Polyakov, Ya.A. Virolainen. On determination of stratospheric aerosol microstructure from measurements of the Earth's horizon scatter solar radiation.

The retrieval errors of determining the microphysical parameters of the stratospheric aerosol (integral surface S and integral volume V) from spectral measurements of scattered solar radiation on the horizon of the Earth with the aid of SAGE III device and with consideration of main atmospheric and underlying surface parameters variations was determined by numerical experiments. It is shown that the retrieval errors of S and V for 12–45 km compose 28–33% and 33–40%, respectively. The information content of satellite experiment with SAGE III device is 60–70% for S and 65–75% for V . The averaging of *a priori* profiles of stratospheric aerosol microphysical parameters on 5 km layers shows the retrieval error decrease by 10–13% for S and by 15–20% for V .