

Российская академия наук  
Сибирское отделение

# ОПТИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

Том 27, № 12 декабрь, 2014

Научный журнал

Основан в январе 1988 года академиком В.Е. Зуевым

Выходит 12 раз в год

## Главный редактор

доктор физ.-мат. наук Г.Г. Матвиенко

## Заместители главного редактора

доктор физ.-мат. наук Б.Д. Белан,

доктор физ.-мат. наук Ю.Н. Пономарев

## Ответственный секретарь

доктор физ.-мат. наук В.А. Погодаев

## Редакционная коллегия

Багаев С.Н., академик РАН, Институт лазерной физики (ИЛФ) СО РАН, г. Новосибирск, Россия;

Банах В.А., д.ф.-м.н., Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА) СО РАН, г. Томск, Россия;

Белов В.В., д.ф.-м.н., ИОА СО РАН, г. Томск, Россия;

Букин О.А., д.ф.-м.н., Дальневосточная морская академия им. адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия;

Голицын Г.С., академик РАН, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова (ИФА) РАН, г. Москва, Россия;

Еланский Н.Ф., чл.-кор. РАН, ИФА РАН, г. Москва, Россия;

Землянов А.А., д.ф.-м.н., ИОА СО РАН, г. Томск, Россия;

Кандидов В.П., д.ф.-м.н., Международный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия;

Кулмала М. (Kulmala M.), проф., руководитель Отдела атмосферных наук кафедры физики, Университет г. Хельсинки, Финляндия;

Лукин В.П., д.ф.-м.н., ИОА СО РАН, г. Томск, Россия;

Михайлов Г.А., чл.-кор. РАН, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия;

Павлов В.Е., д.ф.-м.н., Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Россия;

Панченко М.В., д.ф.-м.н., ИОА СО РАН, г. Томск, Россия;

Ражев А.М., д.ф.-м.н., ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия;

Тарасенко В.Ф., д.ф.-м.н., Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия;

Шабанов В.Ф., академик РАН, Красноярский научный центр СО РАН, г. Красноярск, Россия;

Шайн К. (Shine K.P.), член Английской академии наук, королевский профессор метеорологических и климатических наук, Департамент метеорологии, Университет г. Рединга, Великобритания;

Циас Ф. (Ciais P.), проф., научный сотрудник Лаборатории климатических наук и окружающей среды совместного научно-исследовательского подразделения Комиссариата атомной энергии и Национального центра научных исследований (НЦНИ) Франции, г. Жиф-сюр-Иветт, Франция

## Совет редколлегии

Борисов Ю.А., к.ф.-м.н., Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный Московской обл., Россия;

Заворуев В.В., д.б.н., Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Россия;

Ивлев Л.С., д.ф.-м.н., Научно-исследовательский институт физики им. В.А. Фока при СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия;

Игнатьев А.Б., д.т.н., ГСКБ концерна ПВО «Алмаз-Антей» им. академика А.А. Расплетина, г. Москва, Россия;

Кабанов М.В., чл.-кор. РАН, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия;

Михалев А.В., д.ф.-м.н., Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия;

Якубов В.П., д.ф.-м.н., Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

**Зав. редакцией** С.Б. Пономарева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Адрес редакции: 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Тел. (382-2) 49-24-31, 49-19-28; факс (382-2) 49-20-86

E-mail: psb@iao.ru

http://www.iao.ru

© Сибирское отделение РАН, 2014

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 2014

# СОДЕРЖАНИЕ

Том 27, № 12 (311), с. 1033–1128

декабрь, 2014 г.

## ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

- Веретенников В.В., Меньщикова С.С.** Годовой цикл в изменчивости микроструктурных параметров аэрозоля по данным солнечной фотометрии ..... 1035

## ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

- Алексимов Д.В., Букин О.А., Голик С.С., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б., Хорошаева Е.Е.** Пространственные характеристики области филаментации гигаваттных лазерных импульсов при их различной фокусировке на атмосферной трассе ..... 1042
- Сакерин С.М., Береснев С.А., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тащилин М.А., Турчинович Ю.С., Holben B.N., Smirnov A.** Анализ подходов моделирования годового и спектрального хода аэрозольной оптической толщи атмосферы в регионах Сибири и Приморья ..... 1047
- Виноградова А.А.** Эмиссии антропогенного черного углерода в атмосферу: распределение по территории России ..... 1059
- Павлов В.Е., Голобокова Л.П., Хвостов И.В., Ходжер Т.В.** О временной изменчивости содержания ряда ионов в приземном растворимом аэрозоле в некоторых пунктах Южного Прибайкалья и Приморского края ..... 1066
- Кулипанов Г.Н., Лисенко А.А., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Кубарев В.В., Чесноков Е.Н., Бабченко С.В.** Экспериментальные исследования взаимодействия терагерцового излучения новосибирского лазера на свободных электронах с водным аэрозолем ..... 1070
- Баженов О.Е.** Исследование квазидвухлетней цикличности общего содержания и концентраций озона на отдельных высотных уровнях над Арктикой и Томском по данным спутниковой аппаратуры TOMS ..... 1074
- Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я.** Региональные особенности долгопериодного изменения облачного покрова в Сибирском секторе Северного полушария за последние 45 лет (1969–2013 гг.) ... 1079
- Михалев А.В., Подлесный С.В., Стоева П.В.** Оптические характеристики ночного неба в Восточной Сибири после падения Челябинского метеорита. I. Яркость ночного неба ..... 1085
- Черемисин А.А., Кушнарченко А.В.** Фотофоретическое взаимодействие аэрозольных частиц и его влияние на коагуляцию в атмосфере ..... 1090

## АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Банах В.А., Маракасов Д.А., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш.** Экспериментальные исследования акустического поля, возбуждаемого сверхзвуковой струей ..... 1098
- Трофимов В.Ф., Архипов В.А., Жарова И.К.** Диагностика дисперсного состава жидкокапельных аэрозолей методом малоуглового рассеяния ..... 1102

## ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Губарев Ф.А., Евтушенко Г.С.** Частотно-импульсное кодирование генерации CuVg-лазера ..... 1107
- Тригуб М.В., Огородников Д.Н., Димаки В.А.** Исследование источника накачки лазера на парах металлов с импульсным зарядом рабочей емкости ..... 1112

## ИНФОРМАЦИЯ

- Указатель статей и кратких сообщений, опубликованных в журнале «Оптика атмосферы и океана» за 2014 г. ....** 1116
- Именной указатель 27-го тома. ....** 1126

## CONTENTS

Vol. 27, No. 12 (311), p. 1033–1128

December 2014

### Inverse problems of atmospheric and ocean optics

- Veretennikov V.V., Men'shchikova S.S. Annual cycle in variability of aerosol microstructure parameters determined from solar photometry data. . . . . 1035

### Optical models and databases

- Apeksimov D.V., Bukin O.A., Golik S.S., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V., Sokolova E.B., Khoroshaeva E.E. Spatial characteristics of the filamentation region of gigawatt laser pulses at their various focusing along an atmospheric path . . . . . 1042
- Sakerin S.M., Beresnev S.A., Kabanov D.M., Kornienko G.I., Nikolashkin S.V., Poddubnyi V.A., Tashchilin M.A., Turchinovich Yu.S., Holben B.N., Smirnov A. Analysis of approaches to modeling the annual and spectral behaviors of the atmospheric aerosol optical depth in regions of the Siberia and Primorye . . . . . 1047
- Vinogradova A.A. Anthropogenic black carbon emissions to the atmosphere: surface distribution through Russian territory . . . . . 1059
- Pavlov V.E., Golobokova L.P., Khvostov I.V., Khodzher T.V. On temporal variability of ion content in surface soluble aerosol in some sites of the Southern Baikal and Primorsky Krai . . . . . 1066
- Kulipanov G.N., Lisenko A.A., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Kubarev V.V., Chesnokov E.N., Babchenko S.V. Experimental study of the interaction between terahertz radiation from the Novosibirsk free-electron laser and water aerosol . . . . . 1070
- Bazhenov O.E. Study of the quasi-biennial oscillation of total ozone and ozone concentrations at individual altitude levels over Arctic and Tomsk according to data of TOMS satellite instrumentation . . . . . 1074
- Komarov V.S., Matvienko G.G., Il'in S.N., Lomakina N.Ya. Regional features of long-term changes of cloud cover in the Siberian sector of the Northern hemisphere during the last 45 years (from 1969 to 2013). . . . . 1079
- Mikhalev A.V., Podlesnyi S.V., Stoeva P.V. Optical characteristics of the night sky over Eastern Siberia after the Chelyabinsk meteorite fall. I. Night sky brightness . . . . . 1085
- Cheremisin A.A., Kushnarenko A.V. Photophoretic interaction of aerosol particles and its effect on coagulation in the atmosphere . . . . . 1090

### Optical instrumentation

- Banakh V.A., Marakasov D.A., Sazanovich V.M., Tsvyk R.Sh. The results of research of the acoustic field generated by a supersonic jet . . . . . 1098
- Trofimov V.F., Arkhipov V.A., Zharova I.K. Diagnostics of liquid-drop aerosols dispersity by small-angles scattering method . . . . . 1102

### Optical sources and receivers for environmental studies

- Gubarev F.A., Evtushenko G.S. Pulse-frequency modulation of CuBr laser emission. . . . . 1107
- Trigub M.V., Ogorodnikov D.N., Dimaki V.A. Study of metal vapor laser power supply with pulsed charging of storage capacitance . . . . . 1112

### Information

- Subject Index . . . . . 1116
- Author Index . . . . . 1126

## ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

УДК 551.501.793

# Годовой цикл в изменчивости микроструктурных параметров аэрозоля по данным солнечной фотометрии

В.В. Веретенников, С.С. Меньщикова\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зueva, 1*

Поступила в редакцию 22.07.2014 г.

Рассмотрены особенности годового хода микроструктурных параметров аэрозоля, восстановленных путем решения обратной задачи солнечной фотометрии. В качестве исходных данных для обращения были взяты среднечасовые измерения аэрозольной оптической толщины (АОТ) в спектральном диапазоне 0,37–4 мкм, выполненные в Томске. Обработка экспериментальных спектров проводилась с использованием алгоритма, разработанного на основе метода интегральных распределений. По восстановленным интегральным распределениям были определены такие микроструктурные параметры, как объемная концентрация, геометрическое сечение и средний радиус частиц. В частности, установлено, что объемная концентрация аэрозоля минимальна в ноябре и максимальна в апреле. Также исследованы статистические связи между АОТ и восстановленными микроструктурными параметрами.

**Ключевые слова:** микроструктура аэрозоля, аэрозольная оптическая толщина, обратные задачи; aerosol microstructure, aerosol optical depth, inverse problem.

## Введение

Применение техники измерения спектральной прозрачности атмосферы в сочетании с методами решения обратных задач уже давно стало эффективным инструментом при изучении микрофизических свойств атмосферного аэрозоля [1–4].

С целью получения информации о параметрах микроструктуры аэрозоля в вертикальном столбе атмосферы по данным солнечной спектрометрии авторами [5] создан программный комплекс для решения обратной задачи на основе метода интегральных распределений [6]. В качестве микроструктурных параметров, восстанавливаемых при обращении аэрозольной оптической толщиной (АОТ), рассматриваются проинтегрированные по всей толще атмосферы объемная концентрация, геометрическое сечение и средний радиус аэрозольных частиц. Также предусмотрена возможность раздельной оценки указанных параметров для субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля.

С использованием разработанного программного комплекса в работе [7] исследована изменчивость параметров микроструктуры аэрозоля в июле–августе 2003 г. Исходными данными для анализа служили измерения АОТ в спектральном диапазоне 0,37–4 мкм, выполненные в ИОА СО РАН С.М. Сакриным и Д.М. Кабановым с помощью солнечного

фотометра. Анализ полученных данных показал, что полная объемная концентрация аэрозольных частиц составляет в среднем за период наблюдений около  $0,06 \text{ см}^3/\text{м}^2$  при среднем радиусе 0,27 мкм. При этом в большинстве реализаций основной вклад в суммарный объем аэрозоля вносит грубодисперсная фракция частиц при среднем значении ее концентрации, равном  $0,036 \text{ см}^3/\text{м}^2$ , что в 1,44 раза превышает аналогичный параметр для субмикронного аэрозоля. Восстановленные средние радиусы частиц субмикронной и грубодисперсной фракций равны соответственно 0,1 и 2,05 мкм. Также были рассмотрены корреляционные связи между АОТ и микроструктурными параметрами аэрозоля. В частности, установлено, что корреляция между объемной концентрацией отдельных фракций и АОТ имеет выраженную спектральную зависимость.

Представляет интерес вопрос, в какой степени микроструктурные свойства аэрозоля, установленные для летних месяцев, будут трансформироваться на протяжении года. О внутригодовой изменчивости аэрозольного ослабления оптического излучения в атмосфере, которая обусловлена трансформацией микрофизического состава аэрозоля, свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные, полученные с использованием методов солнечной фотометрии [8–11], спутниковых измерений [12, 13] и наземных измерений на горизонтальных трассах [14–20].

Развивая исследования [7], в настоящей статье рассмотрим особенности годового хода микроструктурных параметров аэрозоля в Томске, которые выявлены

\* Виктор Васильевич Веретенников (vvv@iao.ru); Светлана Сергеевна Меньщикова (mss@iao.ru).

на той же экспериментальной и методической базе в результате решения обратной задачи солнечной спектрофотометрии.

## 1. Исходные данные и метод решения

В качестве исходных данных для решения задачи рассматривались спектральные измерения АОТ  $\tau(\lambda)$  на 13 длинах волн в диапазоне 0,37–4 мкм, полученные на той же площадке, что и в [7], с помощью солнечного спектрофотометра в период с сентября 2003 г. по июнь 2004 г. в ИОА СО РАН С.М. Сакериным и Д.М. Кабановым. При решении обратной задачи экспериментальные спектры предварительно усреднялись на часовом интервале. Общий объем обработанных спектров на протяжении года составил в сумме около 1250 усредненных реализаций.

На рис. 1 представлена гистограмма распределения числа среднечасовых спектров за период с июля 2003 г. по июнь 2004 г., использованных для обращения. Максимальное число реализаций получено в летние месяцы (август 2003 г., июнь 2004 г.), а минимальное — в декабре 2003 г.

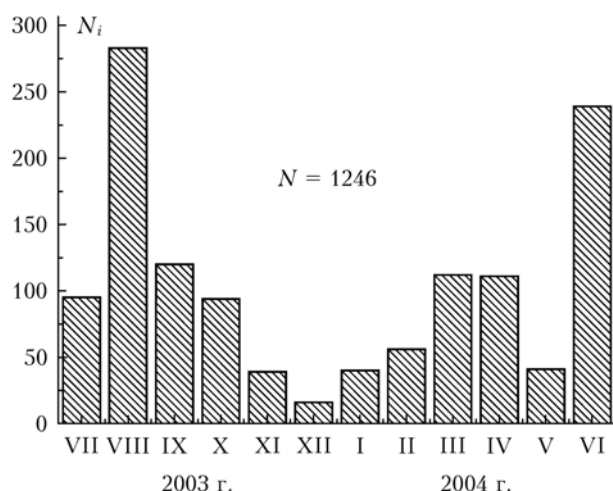


Рис. 1. Гистограмма распределения количества среднечасовых спектров АОТ, полученных в течение годового цикла

В качестве примера на рис. 2 приведены годовой ход среднечасовых значений АОТ и их стандартное отклонение (SD) в спектральном диапазоне 0,371–0,871 мкм. Видно, что на всех длинах волн максимальная прозрачность атмосферы наблюдалась в ноябре ( $\langle \tau(0,5) \rangle = 0,1$ ). Начиная с ноября происходит монотонный рост замутненности атмосферы и достигает максимума к апрелю ( $\langle \tau(0,5) \rangle = 0,26$ ). Затем ближе к летним месяцам прозрачность атмосферы вновь повышается. Примечательно, что средние значения АОТ в начале и конце интервала наблюдений оказались достаточно близки между собой.

Внутримесячная изменчивость АОТ, определяемая стандартным отклонением для каждого месяца, характеризуется невысоким уровнем в холодное время года (с ноября по март). Наибольшие значения стандартного отклонения наблюдаются в августе 2003 г.

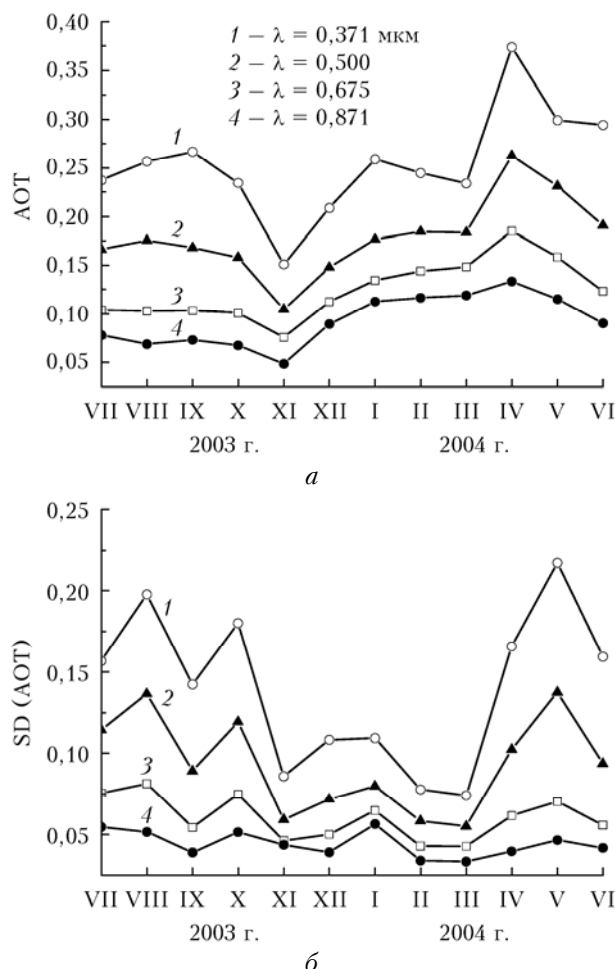


Рис. 2. Временная изменчивость среднечасовых значений АОТ (а) и их стандартных отклонений (б) для различных длин волн

и мае 2004 г. и составляют 75–79% от среднечасовых значений АОТ в зависимости от длины волны. Отмеченные тенденции в целом сохраняются также и в ИК-диапазоне спектра.

Решение обратной задачи осуществлялось с помощью алгоритма [5], разработанного на основе метода интегральных распределений. В качестве искомой функции в алгоритме [5] рассматривается суммарное геометрическое сечение частиц  $S(r)$  радиусом, большим или равным  $r$ , которые содержатся в вертикальном столбе атмосферы единичной площади. Использование интегральных аэрозольных распределений частиц по размерам для описания микроструктуры аэрозоля позволяет восстанавливать приближенное устойчивое решение обратной задачи путем минимизации функционала невязки на множестве монотонных ограниченных функций без каких-либо дополнительных ограничений на искомое решение и привлечения специальных регуляризующих процедур.

По восстановленной при обращении АОТ функции  $S(r)$  легко рассчитываются такие интегральные параметры микроструктуры аэрозоля, как объемная концентрация частиц  $V$  и их средний радиус