

Российская академия наук
Сибирское отделение

ОПТИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

Том 28, № 3 март, 2015

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, 2015

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Том 28, № 3 (314), с. 197–282

март, 2015 г.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

- Лысенко С.А., Кугейко М.М., Хомич В.В.** Метод определения концентраций аэрозольных фракций в приземном воздухе по данным многочастотного лидарного зондирования 199
- Бычков В.В., Непомнящий Ю.А., Пережогин А.С., Шевцов Б.М.** Лидарные сигналы верхней атмосферы и возможный механизм их формирования 210

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

- Скляднева Т.К., Ивлев Г.А., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Симоненков Д.В.** Радиационный режим г. Томска в условиях дымной мглы. 215
- Дудорова Н.В., Белан Б.Д.** Радиационный баланс подстилающей поверхности г. Томска в 2004–2005 гг. 223
- Дудорова Н.В., Белан Б.Д.** Тепловой баланс подстилающей поверхности г. Томска в 2004–2005 гг. 229
- Огородников В.А., Сересева О.В.** Мультипликативная численная стохастическая модель полей суточных сумм жидких осадков и ее использование для оценки статистических характеристик экстремальных режимов их выпадения 238

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

- Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Давлатшоев Т.** Элементный состав почв и пылевого аэрозоля юго-центральной части Таджикистана. 246
- Литау В.В., Таловская А.В., Язиков Е.Г., Лончакова А.Д., Третьякова М.И.** Оценка пылевого загрязнения территории г. Омска по данным снеговой съемки 256

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Шаманаев В.С.** Самолетные лидары ИОА СО РАН для зондирования оптически плотных сред. 260
- Тихомиров А.А., Татур В.В., Ляпунов В.М.** Лазерный дальномерный мониторинг положения гидротехнических сооружений (на примере Усть-Каменогорского шлюза) 267
- Алексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В.** Филаментация тераваттных лазерных импульсов на стометровой атмосферной трассе 274
- Леонович Л.А., Тащилин А.В., Леонович В.А.** Отклик эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм на резкие вариации параметров солнечного ветра 278

CONTENTS

Vol. 28, No. 3 (314), p. 197–282

March 2015

Remote sensing of atmosphere, hydrosphere, and underlying surface

- Lysenko S.A., Kugeiko M.M., Khomich V.V.** Method for determination of mass concentrations of aerosol fractions in ground air from the data of multifrequency lidar sounding 199
- Bychkov V.V., Nepomnyashchii Yu.A., Perezhogin A.S., Shevtsov B.M.** Lidar returns from upper atmosphere and possible mechanism of their formation 210

Atmospheric radiation, optical weather, and climate

- Sklyadneva T.K., Ivlev G.A., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Simonenkov D.V.** The radiation regime of Tomsk in conditions of a smoky haze. 215
- Dudorova N.V., Belan B.D.** Radiation balance of the underlying surface in Tomsk in 2004–2005. 223
- Dudorova N.V., Belan B.D.** Thermal balance of the underlying surface in Tomsk in 2004–2005. 229
- Ogorodnikov V.A., Sereseva O.V.** Multiplicative numerical stochastic model of daily sums of liquid precipitation fields and its use for estimation of statistical characteristics of extreme precipitation regimes 238

Optical models and databases

- Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I., Madvaliev U., Davlatshoev T.** The elemental composition of soil and dust aerosol in south-central part of Tajikistan 246
- Litau V.V., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Lonchakova A.D., Tretyakova M.I.** Dust pollution assessment on the territory of Omsk city using snow survey 256

Optical instrumentation

- Shamanaev V.S.** Airborne lidars of the IAO SB RAS for sensing optically dense media 260
- Tikhomirov A.A., Tatur V.V., Lyapunov V.M.** Laser rangefinder monitoring of hydro-technical utilities position (the case of Ust-Kamenogorsk shipping lock). 267
- Apeksimov D.V., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V.** Filamentation of terawatt laser pulses on a hundred-meter atmospheric path 274
- Leonovich L.A., Tashchilin A.V., Leonovich V.A.** The 557.7 and 630-nm atomic oxygen emission responses to the sharp solar wind variations. 278

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.508

Метод определения концентраций аэрозольных фракций в приземном воздухе по данным многочастотного лидарного зондирования

С.А. Лысенко, М.М. Кугейко, В.В. Хомич*

*Белорусский государственный университет
220030, г. Минск, пр. Независимости, 4, Беларусь*

Поступила в редакцию 24.01.2014 г.

Предложен метод дистанционного определения массовых концентраций аэрозольных частиц размерами ≤ 1 ; 2,5; 10 и 30 мкм в приземном воздухе. Метод включает лидарное зондирование атмосферы на длинах волн $\lambda = 0,355$; 0,532; 1,064; 2,13 мкм, восстановление из лидарных сигналов спектрально-пространственных распределений аэрозольного коэффициента ослабления и преобразование их в пространственные распределения концентраций аэрозольных фракций на основе регрессионных соотношений между оптическими и микрофизическими характеристиками аэрозоля. Для повышения точности и устойчивости решения системы лидарных уравнений выбор калибровочных констант и лидарных отношений на длинах волн зондирующего излучения выполняется с учетом мультиколлинеарности спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления, выраженной в форме уравнения множественной регрессии. Используемые регрессии получены в рамках оптической модели городского аэрозоля, принятой Всемирной метеорологической организацией, при широкой вариации модельных параметров, характеризующих распределение частиц по размерам и комплексный показатель преломления аэрозольного вещества. Проведены численные эксперименты по лазерному зондированию концентраций аэрозольных фракций в атмосфере, демонстрирующие правомочность предложенного метода.

Ключевые слова: городской аэрозоль, респирательные частицы, массовая концентрация, лазерное зондирование, множественные регрессии; urban aerosol, respirable particles, mass concentration, remote laser sounding, multiple regressions.

Введение

Среди неблагоприятных факторов окружающей среды, влияющих на здоровье населения, большое значение имеет загрязнение воздуха взвешенными частицами (аэрозолем). По данным последних исследований [1], примерно 2,1 млн смертей ежегодно происходят из-за увеличения объема мелкодисперсных (респирательных) частиц в воздухе, которые могут проникать глубоко в легкие человека, вызывая рак, сердечно-сосудистые и респираторные заболевания. Согласно американским и европейским стандартам качества атмосферного воздуха, индикаторами респирательных частиц в воздухе являются их массовые концентрации $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$ и PM_{10} , соответствующие ограничению по верхнему размеру частиц — 1,0; 2,5 и 10 мкм. В странах СНГ уровень загрязненности воздуха аэрозолем количественно характеризуется полной массовой концентрацией аэрозоля.

В настоящее время измерения массовой концентрации аэрозоля и его респирательных фракций,

как правило, выполняют гравиметрическим методом, а также с применением различного рода нефелометров и счетчиков частиц [2–4]. Главный недостаток таких измерений — локальность получаемой информации о степени загрязнения воздуха. Для мониторинга атмосферного воздуха в пределах целого города или региона требуются построение сети автоматизированных станций с выходом всех данных на центральный пульт управления либо использование передвижных экологических лабораторий.

Для исследования пространственно-временной изменчивости аэрозоля наиболее удобными являются лазерно-локационные методы, позволяющие оперативно и дистанционно определять характеристики аэрозоля вдоль горизонтальных и наклонных трасс, а также снимать круговую панораму распределения аэрозоля в воздушном бассейне населенного пункта. Однако из-за нерешенных методических задач, связанных с многопараметрической зависимостью регистрируемых сигналов, данные методы в настоящее время не в полной мере устраивают санитарно-гигиенические службы.

На практике интерпретация данных лидарного зондирования атмосферы, как правило, выполняется с привлечением дополнительной информации, получаемой на основе параллельных радиометрических [5], нефелометрических [6] или микрофизических

* Сергей Александрович Лысенко (lisenko@bsu.by); Михаил Михайлович Кугейко (kugeiko@bsu.by); Василий Васильевич Хомич.

аэрозольных измерений [7]. При этом комплексный показатель преломления аэрозольного вещества и распределение аэрозольных частиц по размерам, получаемые на основе дополнительных измерений, полагаются неизменными вдоль трассы зондирования. Разумеется, такое предположение может существенно сказываться на точности определения концентрации аэрозоля и его отдельных фракций. Кроме того, большинство существующих лидаров работают в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, что обуславливает наибольшую чувствительность соответствующих измерений к частицам субмикронного аэрозоля, имеющим размер от 0,1 до 1,0 мкм.

Спектр размеров городского аэрозоля, ввиду многообразия его источников, является значительно более широким и включает также промышленные частицы дисперсионного происхождения размерами от единиц до десятков микрометров [8, 9]. Большие возможности в экологическом мониторинге таких частиц открывают существующие и развивающиеся источники широкополосного когерентного излучения в ИК-области спектра [10]. В связи с этим актуальна разработка методов обработки данных оптического зондирования городских аэрозолей с использованием существующих и перспективных источников излучения, а также получение решений соответствующих обратных задач, устойчивых к погрешностям оптических измерений и к вариациям физико-химических свойств аэрозоля.

Настоящая статья посвящена разработке метода дистанционного определения полной массовой концентрации аэрозоля и концентраций его респирбельных фракций (PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀) в городском воздушном бассейне. Поставленная задача решается на основе данных многоволнового лидарного зондирования атмосферы без привлечения дополнительных оптических и микроструктурных аэрозольных измерений. Обработка лазерно-локационных сигналов выполняется в рамках модели городского аэрозоля, принятой Всемирной метеорологической ассоциацией [11].

Восстановление профилей аэрозольных коэффициентов ослабления из лидарных сигналов

Дистанционное определение микрофизических параметров аэрозоля по данным многочастотного лидарного зондирования включает восстановление из регистрируемых эхосигналов пространственных распределений оптических параметров аэрозоля на длинах волн зондирующего излучения и решение обратной задачи аэрозольного светорассеяния относительно микроструктуры аэрозоля для каждой точки трассы зондирования. Связь лидарных сигналов $P(\lambda, r)$ с оптическими параметрами атмосферы описывается хорошо известным уравнением лазерной локации [12, 13]:

$$P(\lambda, r) = A(\lambda) \frac{G(r)}{r^2} [\beta_{\pi,a}(\lambda, r) + \beta_{\pi,m}(\lambda, r)] \times$$

$$\times \exp \left\{ -2 \int_0^r [\varepsilon_a(\lambda, x) + \varepsilon_m(\lambda, x)] dx \right\}, \quad (1)$$

где r — пространственная координата, отсчитываемая от источника излучения; A — аппаратная константа; G — геометрический фактор лидара, характеризующий перекрытие поля зрения приемника и посылаемого лазерного импульса; ε_a и $\beta_{\pi,a}$ — коэффициенты аэрозольного ослабления и обратного рассеяния; ε_m и $\beta_{\pi,m}$ — коэффициенты полного и обратного рассеяния света молекулами воздуха; x — переменная интегрирования. Характеристики молекулярного рассеяния рассчитываются аналитически в соответствии со значениями давления и температуры воздуха в районе проведения измерений [12, 14]. Для восстановления пространственного профиля аэрозольной оптической характеристики (ε_a или $\beta_{\pi,a}$) необходимо, во-первых, определить опорное значение этой характеристики на некотором участке трассы, а во-вторых, задать связь между ε_a и $\beta_{\pi,a}$ — так называемое лидарное отношение $S_a = \varepsilon_a / \beta_{\pi,a}$ [11]. Рассмотрим эти вопросы последовательно.

В зависимости от имеющейся априорной информации и возможностей ее получения из лидарных сигналов можно восстановить профиль коэффициента ослабления $\varepsilon_a(r)$ или коэффициента обратного рассеяния $\beta_{\pi,a}(r)$. Профиль $\beta_{\pi,a}(r)$, как правило, восстанавливают при вертикальном зондировании атмосферы, поскольку тогда можно провести калибровку лидара по сигналам молекулярного рассеяния с больших высот в атмосфере, на которых аэрозоль практически отсутствует [14]. При зондировании же приземных трасс в атмосфере подобная калибровка затрудняется высоким содержанием аэрозоля на всей трассе. В этих условиях для восстановления профиля $\beta_{\pi,a}(r)$ требуется привлечение дополнительных измерений $\beta_{\pi,a}$ на зондируемой трассе, что, разумеется, приводит к потере всех основных достоинств лазерно-локационных методов исследования аэрозоля (оперативность и возможность исследования пространственно-временной изменчивости аэрозоля). Кроме того, локальные измерения $\beta_{\pi,a}$ требуют использования сложной приемно-передающей оптики и высокочувствительных приемников излучения.

Определение ε_a на приземной трассе представляет значительно более простую в техническом плане задачу, чем определение $\beta_{\pi,a}$. Аэрозольный коэффициент ослабления, являясь интегральной характеристикой аэрозольного светорассеяния, в минимальной степени подвержен влиянию формы и комплексного показателя преломления рассеивающих частиц, что обуславливает преимущество его использования для определения количественного содержания частиц в единице объема воздуха. При наличии на трассе зондирования однородного участка опорное значение ε_a , необходимое для калибровки лидара, можно определить по скорости убывания логарифма сигнала $P(r)r^2$ на этом участке [15]. Проблема здесь заключается в отсутствии надежного метода нахождения такого участка по пространственной структу-