

На правах рукописи

Колготин Алексей Викторович

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МНОГОВОЛНОВОГО ЛИДАРНОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ В ПРИМЕНЕНИИ К ГЛОБАЛЬНОМУ
МОНИТОРИНГУ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология и агрометеорология

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

2013

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Аэрозоли являются важной составляющей атмосферы, влияющие на климат, радиационный бюджет Земли, а также на точность дистанционных измерений, проводимых при исследованиях с Земли или из космоса. Влияние атмосферных аэрозолей может быть прямым, обусловленным рассеиванием и поглощением ими падающего излучения, и косвенным как результат модификации свойств облаков и изменения содержания газовых примесей вследствие химических реакций.

Существуют аэрозоли естественного и антропогенного происхождения. К первым относятся вулканический пепел, пыль, морская соль, продукты горения биомассы. Вторые возникают при сгорании угля, нефти и др. продуктов жизнедеятельности человека. Они характеризуются различными геометрической формой частиц, показателем преломления, распределением по размеру и пр. Для исследования влияния аэрозолей необходима долговременная достоверная информация о временных и пространственных вариациях указанных характеристик.

Решения этой задачи возможно благодаря применению дистанционных методов зондирования. Дистанционные методы дают возможность получать глобальную информацию о параметрах аэрозолей и облаков. Подобные измерения могут проводиться как с земли, так и из космоса. Хотя системы наземного базирования являются более простыми в обслуживании и способны поставлять достоверные данные о параметрах аэрозолей в выбранном районе, они уступают спутниковым системам по глобальности предоставляемой информации. В связи с этим в настоящее время реализуются различные космические миссии по выявлению влияния аэрозолей и солнечной радиации на климат Земли. Наиболее крупная из них – это система спутников A-Train, среди которых в эксплуатации уже находятся спутники Glory, CALIPSO, в стадии разработки – Aqua, Aura, OCO-2 и др.

Одним из перспективных инструментов дистанционного зондирования является лидар. Преимущество использования лидара состоит в том, что он позволяет проводить измерения с высоким разрешением по высоте, работать как в дневное, так и ночное время суток. В зависимости от конфигурации лидара решаются задачи различного уровня сложности. Для выявления высотного распределения аэрозольных слоев достаточно применения одноволновой системы. С помощью системы, работающей на нескольких длинах волн, возможна классификация аэрозолей, измерение коэффициентов обратного рассеяния, ослабления и деполяризации. Многоволновые системы, основанные на рамановских лидарах и лидарах высокого спектрального разрешения, позволяют делать оценки микрофизических параметров аэрозолей, их пространственно-временного распределения, и как следствие исследовать динамику, протекающих в атмосфере процессов.

В последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс как в создании усовершенствованных лидарных систем, так и в разработке математических алгоритмов обработки данных лидарного зондирования для

оценки параметров аэрозолей. Однако на сегодняшний день существует ряд проблем, которые сдерживают дальнейшее развитие дистанционных методов зондирования в целом и применение уже разработанных алгоритмов обработки данных лидарного зондирования в частности. Наиболее существенные из них связаны со следующими особенностями:

- данные многоволнового зондирования аэрозолей в зависимости от конфигурации лидара включают набор из 3-6 коэффициентов обратного рассеяния, 1-2 коэффициентов ослабления, 1-3 значений деполяризации излучения в диапазоне длин волн от 355 до 1064 нм, который является очень ограниченным для оценки важнейших характеристик аэрозолей, присутствующих в атмосфере;

- лидарные данные имеют высокую измерительную погрешность, особенно в случае зондирования системами космического базирования, вследствие чего необходимы дополнительная стабилизация, повышение устойчивости и надежности работы алгоритмов для обработки этих данных;

- обработка большого объема данных многоволнового лидарного зондирования в реальном времени при глобальном мониторинге параметров аэрозолей предъявляет повышенные требования к скорости расчетов, выполняемых используемыми алгоритмами;

- отсутствует априорная информация о распределении аэрозолей по размерам, комплексном показателе преломления, при этом их размеры могут варьироваться в широком диапазоне от 0.05 до 20 мкм, а показатель преломления в реальной части от 1.3 до 1.7 и в мнимой части от 0 до 0.05;

- разработанные ранее алгоритмы применимы для оценки параметров сферических аэрозолей, имеющих фиксированный показателем преломления, однако в общем случае атмосферные аэрозоли представлены частицами нерегулярной формы, а их показатель преломления зависит от длины волны падающего излучения.

Создание комплексного аппарата для решения указанных проблем позволит сделать важный шаг в дальнейшем развитии дистанционных методов лидарного зондирования.

Целью настоящего исследования является разработка методов оценки параметров атмосферных аэрозолей по лидарным измерениям коэффициентов обратного рассеяния, ослабления и деполяризации в условиях ограниченного числа длин волн, высокой измерительной погрешности, отсутствия априорной информации о форме, показателе преломления и распределении аэрозолей по размерам.

Методы исследования. При проведении научного исследования были реализованы теоретические и эмпирические методы исследования. Решения задач базируются на экспериментальных данных и теоретических положениях теории рассеяния света на малых частицах, численных методов и математического моделирования. В работе были использованы дистанционное измерение оптических коэффициентов атмосферных аэрозолей с помощью многоволнового рамановского лидара, результаты обработки

данных солнечного радиометра и локального забора проб на борту самолёта для контроля точности восстановления параметров аэрозолей дистанционным методом.

На защиту выносятся:

1) алгоритм восстановления параметров атмосферных аэрозолей сферической и нерегулярной формы на основе обработки данных многоволнового лидарного зондирования, которые включают, кроме коэффициентов обратного рассеяния и ослабления, деполяризацию на нескольких длинах волн как дополнительную информацию для решения обратной задачи;

2) двумерный регуляризирующий алгоритм восстановления профиля параметров аэрозолей по всей дистанции зондирования, обеспечивающий более высокую устойчивость и надежность при использовании в условиях ограниченного набора оптических данных и значительной погрешности их измерения (до 20 %);

3) быстрый алгоритм для линейной оценки поля физических параметров аэрозолей, основанный на разложении неизвестного распределения аэрозолей по размерам в ряд по ядрам интегрального уравнения, применимый для обработки большого объёма данных лидарного зондирования;

4) результаты математического моделирования применения разработанной методики в реальных условиях, обеспечивающих точность оценки эффективного размера и общего объёма аэрозолей до 30 %, реальной части показателя преломления и альбедо однократного рассеяния до 0.05 при погрешности оптических данных до 10 %;

5) сравнение результатов восстановления параметров аэрозолей, полученных лидарным методом, методом с использованием солнечного радиометра и путем локальных измерений с борта самолёта, которое демонстрирует, что разработанные алгоритмы могут быть использованы в глобальном мониторинге атмосферы.

Научная новизна диссертационного исследования.

1) Построена математическая модель задачи многоволнового лидарного зондирования, основанная на описании ансамбля аэрозолей в виде смеси из двух компонент, одна из которых представлена частицами сферической формы, а другая – случайно ориентированными сфероидами; продемонстрирована её адекватность путем сравнения решения прямой задачи и результатов многоволнового лидарного зондирования пылевых аэрозолей.

2) Построен двумерный стабилизатор, применение которого в методе Тихонова позволяет повысить устойчивость и точность восстановления профиля параметров аэрозолей в результате регуляризации решения обратной задачи одновременно по размеру частиц и по дистанции зондирования.

3) Получено поле микрофизических параметров аэрозолей, описывающего пространственно-временное поведение частиц и их динамику, в

результате применения быстрого алгоритма обработки временного ряда данных лидарного зондирования.

4) Определен оптимальный набор оптических данных для распознавания смеси аэрозолей, состоящей из сферических и нерегулярных частиц, который включает коэффициенты обратного рассеяния, ослабления и деполяризацию на длинах волн 355, 532 и 1064 нм, измеряемых с погрешностью до 10 %.

5) Определена минимальная конфигурация лидара, измеряющего коэффициенты обратного рассеяния на длинах волн 355, 532, 1064 нм и ослабления на длине волны 355 нм, которая позволяет проводить оценку физических параметров аэрозолей с точностью, достаточной для климатологических исследований.

6) Проведено моделирование использования разработанных алгоритмов для восстановления различных типов атмосферных аэрозолей, характеризующихся одно- и бимодальным распределением частиц по размерам сферической и нерегулярной формы и показателем преломления, зависящим от длины волны падающего излучения.

7) Разработан подход для коррекции решения обратной задачи многоволнового лидарного зондирования, учитывающий спектральную зависимость комплексного показателя преломления аэрозолей.

8) Выполнено сравнение результатов обработки лидарных данных, полученных с помощью разработанных алгоритмов, результатов обработки данных пассивного зондирования на основе солнечного радиометра, а также результатов локального забора проб с борта самолёта; продемонстрирована сходимость полученных результатов.

Практическая значимость исследования. Разработанная методика реализована в программном комплексе, который обеспечивает автоматизированную обработку большого объема лидарных данных в реальном времени. Программный комплекс позволяет моделировать различные факторы, влияющие на оптические свойства аэрозолей и точность восстановления их микрофизических параметров. Возможны экспертный режим работы, допускающий углубленный анализ пространства решений, и оптимизированный режим, служащий для быстрой обработки большого массива данных. В разработке, внедрении и применении программно-математического обеспечения принимает участие группа молодых ученых и аспирантов, способствуя созданию и становлению новой научной школы.

Реализация результатов. Разработанный программный комплекс в настоящее время используется в отечественных и зарубежных научных центрах, таких как ЦФП ИОФАН (Троицк, акт выполненных работ № 1-11 от 11.01.2011), Институт лазерной техники и технологий (С.-Петербург, акт выполненных работ № 1505-12 от 15.05.2012 г.), Мармарский Исследовательский Центр (Турция, акт выполненных работ №1-10 от 11.05.2010), ИТИ (Германия), ГИИТ (Ю. Корея), АНТУ (Греция) и пр.

Апробация работы. Результаты по теме диссертации получены в ходе выполнения хозяйственных и инновационных работ в рамках междуна-

родного сотрудничества при поддержке Германской Службы Академических Обменов (DAAD, 2005 г.), Европейского Космического Агентства (проект ICARONS, контракт № 22169/NL/СТ), НАСА/ГЦКП (фонд внутренних исследований и разработок), Корейской Метеорологической Администрацией (грант CATER 2009-3112), Министерства культуры и науки Саксонии (гранты №4-7531.50-04-842-02/2, №4-7531.50-04-842-03/4, и №4-7531.50-04-842-06/4) и др. Материалы исследования докладывались и получили положительную оценку на 11 научных международных конференциях и симпозиумах по лазерным радарам (№20-26), тропосферным измерениям (№6-8) и радиации (№8). Ведущими научными организациями как отечественными, так и зарубежными, представлены положительные отзывы, подтверждающие эффективность предлагаемого программного комплекса.

Личный вклад автора. В диссертацию вошли исследования, проведенные автором за время его научной работы в ЦФП ИОФАН, ГИИТ, ИТИ. Лично автором поставлены научные задачи, предложены и разработаны методы их решения. В проведении расчетов и экспериментов участвовали И. Веселовский, Д. Мюллер, Д. Вайтман, В. Грязнов, В. Алехнович, М. Коренский, Э. Чемякин и др.

Публикации. Основное содержание диссертации и выносимые на защиту результаты отражены в ведущих международных научных журналах в 15 научных работах.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 75 наименований и 3 приложений; изложена на 150 стр., включая 7 табл. и 19 рис.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, дан обзор существующих исследований в этой области, сформулированы цели исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Алгоритм восстановления параметров аэрозолей, состоящих из сфер и случайно ориентированных сфероидов» осуществляется построение математической модели. В рамках неё исследуется решение прямой задачи, анализируется адекватность модели путем сравнения полученного решения прямой задачи с экспериментальными данными, формулируется обратная задача, выбирается метод её решения, проводится его обоснование и оценка точности.

При построении математической модели предполагается, что аэрозоли представляют собой смесь сфер и случайно ориентированных сфероидов, при этом фракция сфероидов составляет некоторую долю η в общем объёме и не зависит от размера частиц r

$$v^{ns}(r) = \eta v(r), \quad (1)$$

где $v(r)$ – объёмное распределение смеси аэрозолей по размерам (РАР), а $v^{ns}(r)$ – объёмное распределение по размерам сфероидной фракции аэрозолей. Распределение по размерам сферической фракции аэрозолей $v^s(r)$ определяется автоматически как

$$v^s(r) = (1-\eta) v(r) \quad (2)$$

Оптические свойства аэрозолей $g_i(\lambda)$ характеризуются такими коэффициентами, как ослабления ($i=\alpha$), обратного рассеяния, поляризованного параллельно ($i=\beta_{\parallel}$) и перпендикулярно ($i=\beta_{\perp}$) падающему излучению на длине волны λ . Они связаны с РАР интегральным преобразованием с ядром $K_i(\lambda, m, r)$ следующим образом

$$\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_i(\lambda, m, r) v(r) dr = g_i(\lambda), \quad i=\alpha, \beta_{\parallel}, \beta_{\perp} \quad (3)$$

Здесь параметр $m=m_R - im_I$ характеризует комплексный показатель преломления (КПП) аэрозолей, размер которых варьируется от r_{\min} до r_{\max} . Принимая во внимание, что аэрозоли являются смесью сфер и случайно ориентированных сфероидов, данное интегральное преобразование примет вид

$$g_i(\lambda) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} [(1-\eta)K_i^s(\lambda, m, r) + \eta K_i^{ns}(\lambda, m, r)] v(r) dr, \quad (4)$$

с ядром

$$K_i(\lambda, m, r) = (1-\eta)K_i^s(\lambda, m, r) + \eta K_i^{ns}(\lambda, m, r) \quad (5)$$

Как видно из этого уравнения, ядро интегрального преобразования есть совокупность взвешенных функций $K_i^s(\lambda, m, r)$ и $K_i^{ns}(\lambda, m, r)$, которые зависят от формы частиц.

В случае, если форма частиц сферическая, соответствующая функция $K_i^s(\lambda, m, r)$ выражается через сечение обратного рассеяния ($i=\beta_{\parallel}$) и ослабления ($i=\alpha$) электромагнитного излучения индивидуальной частицей $\Sigma_i(\lambda, m, r)$, рассчитываемое на основе теории рассеяния Ми:

$$K_i^s(\lambda, m, r) = \frac{3}{4\pi r^4} \Sigma_i(\lambda, m, r) \quad (6)$$

В случае сфероидной формы частиц соответствующая функция $K_i^{ns}(\lambda, m, r)$ выражается через сечение обратного рассеяния ($i=\beta_{\parallel}, \beta_{\perp}$) и ослабления ($i=\alpha$) электромагнитного излучения индивидуальными частицами $C_i(\lambda, m, r, \varepsilon)$, которое получено Мищенко и Трависом с использованием метода T -матрицы:

$$K_i^{ns}(\lambda, m, r) = \int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} \frac{3}{4\pi r^4} C_i(\lambda, m, r, \varepsilon) n(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (7)$$

где $n(\varepsilon)$ представляет собой распределение характеристического отношения (отношение наибольшего размера к наименьшему) сфероидов ε в пределах от ε_{\min} до ε_{\max} . В предлагаемой модели предполагается следующее:

- сфероиды формируются путем вращения эллипса вокруг большой оси (продолговатый сфероид) и малой оси (сплюснутый сфероид), при этом количество продолговатых и сплюснутых сфероидов, имеющих эквивалентное характеристическое отношение, равно;
- распределение $n(\varepsilon)$ не зависит от размера сфероидов и фиксировано так, чтобы обеспечить наилучшее согласование с экспериментальными данными, полученными для образцов пыли в лабораторных условиях;

– характеристическое отношение варьируется от $\varepsilon_{\min}=1.44$ до $\varepsilon_{\max}=3.00$.

Расчет ядер (6) и (7) требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому для построенной модели создан банк данных. Используемая версия банка данных содержит т.н. усредненные ядра, определяемые выражением

$$\langle K_{ij}^{s,ns}(\lambda, m) \rangle = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} K_i^{s,ns}(\lambda, m, r) b_j(r) dr, \quad j=1, \dots, N_b=34 \quad (8)$$

Здесь $b_j(r)$ – полиномы 1-ого порядка или треугольные функции с основаниями на полуинтервалах $(r_{j-1}, r_{j+1}]$ и вершинами в узлах r_j , распределенных логарифмически эквидистантно от $r_0=R_{\min}=0.003$ мкм до $r_{N_b+1}=R_{\max}=25$ мкм.

При лидарном зондировании измеряются коэффициенты ослабления $g_\alpha(\lambda_k)$, общего обратного рассеяния

$$g_\beta(\lambda_k) = g_{\beta_{\parallel}}(\lambda_k) + g_{\beta_{\perp}}(\lambda_k) \quad (9)$$

и деполяризация

$$\delta(\lambda_k) = \frac{g_{\beta_{\perp}}(\lambda_k)}{g_{\beta_{\parallel}}(\lambda_k)} \times 100\% \quad (10)$$

на некоторых длинах волн λ_k , $k=1, 2, \dots, N_\lambda \leq 6$. Учитывая, что ядро $K_i(\lambda, m, r)$ полностью определено, а коэффициенты обратного рассеяния, поляризованного параллельно $g_{\beta_{\parallel}}(\lambda_k)$ и перпендикулярно $g_{\beta_{\perp}}(\lambda_k)$ падающему излучению, легко находятся из уравнений (9) и (10), то относительно РАР $\nu(r)$ возникает интегральное уравнение Фредгольма I рода. Поскольку в общем случае параметры η , m , r_{\min} и r_{\max} неизвестны, то данное уравнение имеет неточно заданное ядро и пределы интегрирования.

В рамках построенной математической модели производится сравнение ядер интегрального уравнения (5), соответствующих сферическим частицам, свойства которого хорошо изучены, и сфероидам, а также исследуется прямая задача: построение пространства оптических свойств частиц в зависимости от их формы, физических параметров, характеристик бимодального распределения по размерам. В качестве тестируемого бимодального распределения используется комбинация двух логнормальных распределений

$$\nu_i(r) = \sum_{i=1,2} \frac{4\sqrt{\pi}r^3 n_i}{\sqrt{18 \ln \sigma_i}} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_i)^2}{2 \ln^2 \sigma_i}\right), \quad (11)$$

где параметры r_i , σ_i и n_i являются соответственно модальным радиусом, дисперсией и общей концентрацией для ярко выраженной ($i=1$) и грубой ($i=2$) мод. В дальнейшем исследовании выбраны, в частности, такие значения параметров, как $r_{1,2}=0.1, 0.85$, $\ln \sigma_{1,2}=0.4, 0.6$, $n_1/n_2=100$, которые позволяют моделировать характерные особенности прямой и обратной задачи.

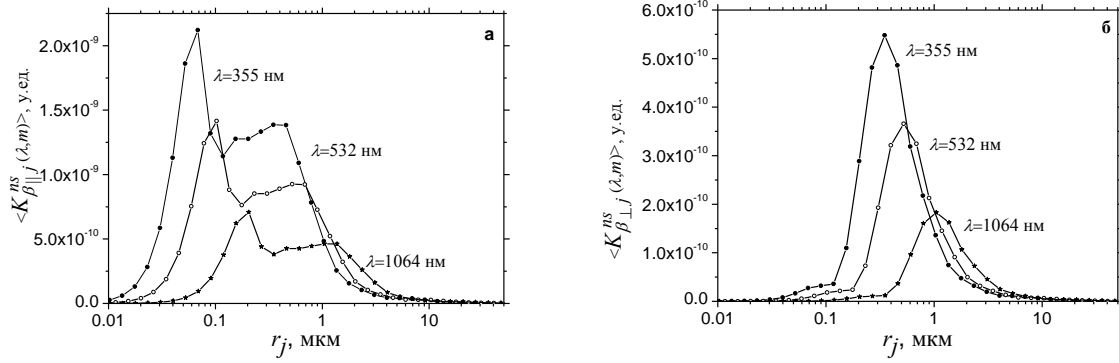


Рис. 1. Усредненные ядра обратного рассеяния, поляризованного параллельно (а) и перпендикулярно (б), соответствующие сфероидам при длинах волн $\lambda=355, 532$ и 1064 нм и показателе преломления $m=1.5-i0.0005$

Оптические свойства сферических частиц и случайно ориентированных сфероидов определяются особенностями соответствующих ядер (6) и (7). На рис. 1 показаны усредненные ядра обратного рассеяния $\langle K_{\beta_{||j}}^{ns}(\lambda, m) \rangle$ и $\langle K_{\beta_{\perp j}}^{ns}(\lambda, m) \rangle$, соответствующие сфероидам и рассчитанные по формуле (8) при длинах волн $\lambda=355, 532$ и 1064 нм и показателе преломления $m=1.5-i0.0005$ в узлах r_j . Различия между сферическими и сфероидными ядрами иллюстрируются на рис. 2, показывающем на длине волны $\lambda=355$ нм при реальной части показателя преломления $m_R=1.5$ и различных значениях мнимой части показателя преломления $m_I=0.0005, 0.005, 0.015$ отношение $\frac{\langle K_{\beta_j}^s(\lambda, m) \rangle}{\langle K_{\beta_j}^{ns}(\lambda, m) \rangle}$, где усредненное ядро общего обратного рассеяния

представляется как

$$\langle K_{\beta_j}^{s,ns}(\lambda, m) \rangle = \langle K_{\beta_{||j}}^{s,ns}(\lambda, m) \rangle + \langle K_{\beta_{\perp j}}^{s,ns}(\lambda, m) \rangle \quad (12)$$

До 0.1 мкм отношение близко к 1, но с ростом размера частиц оно увеличивается. Для больших частиц с размером, превышающим 1 мкм, отношение существенно зависит от величины мнимой части: оно уменьшается с увеличением m_I и для значений, больших 0.015 , сферические и сфероидные ядра приближаются друг к другу. Ядра ослабления обоих типов частиц практически совпадают, что демонстрирует рис. 3 при показателе преломления $m=1.5-i0.0005$ и длинах волн $\lambda=355, 532$ и 1064 нм. В целом, наблюдается заметная разница ядер всех типов для различных длин волн в диапазоне размеров вплоть до нескольких микрометров, что может означать хорошую обусловленность задачи многоволнового зондирования в указанном диапазоне. Одновременно можно сделать вывод о том, что диапазон размеров, где решение обратной задачи с использованием сфероидных ядер является возможным, должен быть сопоставим с тем, который установлен с использованием сфер и достигающим 10 мкм.

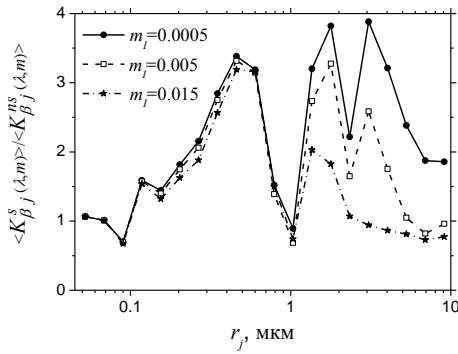


Рис. 2. Отношение усредненных ядер общего обратного рассеяния сфер и сфероидов на длине волны $\lambda=355$ нм при реальной части показателя преломления $m_R=1.5$ и различных значениях мнимой части показателя преломления $m_I=0.0005, 0.005, 0.015$

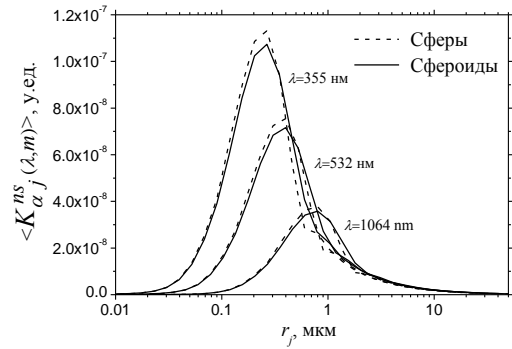


Рис.3. Усредненные ядра ослабления сфер и сфероидов при длинах волн $\lambda=355, 532$ и 1064 нм и показателе преломления $m=1.5-i0.0005$

Спектральное поведение коэффициентов обратного рассеяния и ослабления аэрозолей сферической и сфероидной формы, распределенных по закону (11), представлено на рис. 4. На рис. 4 также изображен закон РАР в виде вставки. Для данного РАР коэффициент обратного рассеяния сфер превышает более чем в два раза соответствующее значение для сфероидов, тогда как коэффициент ослабления сферических частиц примерно на 10 % ниже.

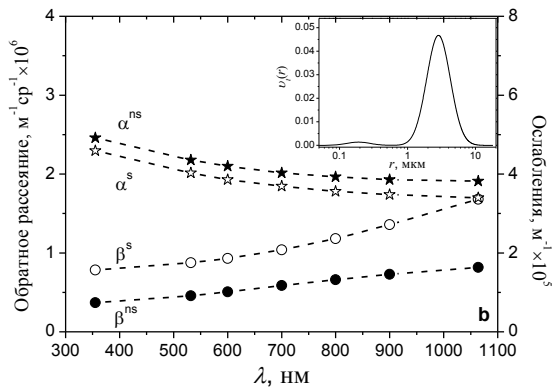


Рис.4. Спектральное поведение коэффициентов обратного рассеяния (круг) и ослабления (звезда) аэрозолей сферической (незаштрихованный маркер) и сфероидной (заштрихованный маркер) формы. Вставка показывает тестовое РАР; $n_1=100 \text{ см}^{-3}$, $m=1.55-i0.001$

На оптические свойства существенно влияет КПП. Зависимость коэффициентов обратного рассеяния ($\beta^{s,ns}$) и ослабления ($\alpha^{s,ns}$) от реальной части КПП показана на рис. 5. Коэффициент обратного рассеяния растет с увеличением m_R , хотя β^s растет быстрее, чем β^{ns} . Коэффициент ослабления для обоих типов аэрозолей не очень чувствителен к вариациям m_R : её изменение в диапазоне от 1.35 до 1.65 ведет к росту $\alpha^{s,ns}$ на 25 %.

Зависимость оптических свойств от мнимой части КПП иллюстрируется на рис. 6. В диапазоне $m_I \in (0, 0.02)$ коэффициент ослабления $\alpha^{s,ns}$ показывает несущественную зависимость. В то же время коэффициент обратного рассеяния $\beta^{s,ns}$ быстро падает с увеличением m_I , особенно этот эффект характерен для сфер. Из рис. 5 и 6 можно заключить, что значительное отличие между коэффициентами обратного рассеяния сфер и сфероидов возникает при больших значениях реальной части и малых значениях мнимой части КПП.

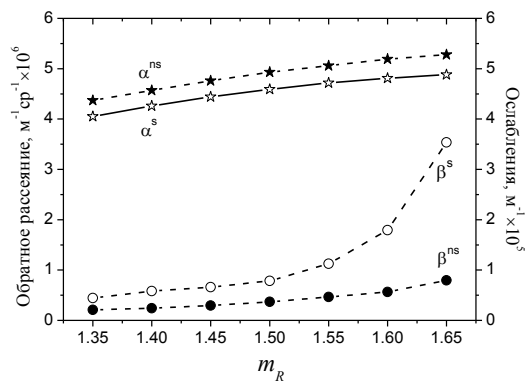


Рис. 5. Коэффициенты обратного рассеяния (круг) и ослабления (звезда) аэрозолей сферической (незаштрихованный маркер) и сфероидной (заштрихованный маркер) формы в зависимости от реальной части КПП. $n_1=100 \text{ см}^{-3}$, $m_r=0.001$

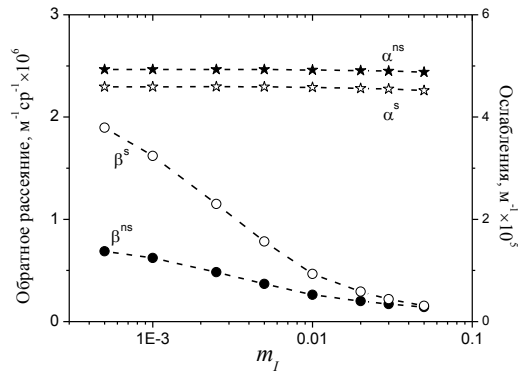


Рис.6. Коэффициенты обратного рассеяния (круг) и ослабления (звезда) аэрозолей сферической (незаштрихованный маркер) и сфероидной (заштрихованный маркер) формы в зависимости от мнимой части КПП. $n_1=100 \text{ см}^{-3}$, $m_r=1.55$

Полученные соотношения хорошо согласуются с экспериментальными данными, в соответствии с которыми фазовая функция для сфер в обратном направлении достигает пикового значения, тогда как для сфероидов при больших углах рассеяния ($160^\circ-180^\circ$) она остается практически неизменной. Кроме того, пиковое значение фазовой функции для сфер с увеличением мнимой части КПП сглаживается, в результате чего коэффициенты обратного рассеяния для обоих типов частиц становятся близкими

по значению.

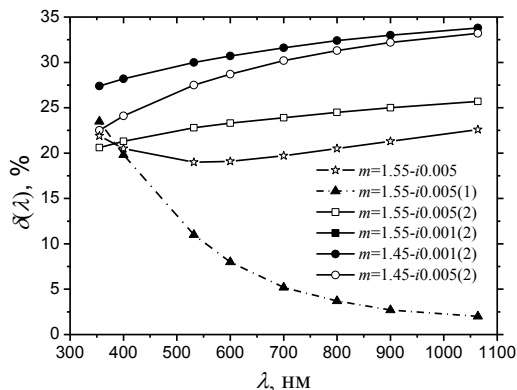


Рис. 7. Спектральная зависимость деполаризации, рассчитанной на основе бимодального распределения (звезда), ярко выраженной (треугольник) и грубой (круг и квадрат) моды РАР

Важной характеристикой рассеяния на несферических частицах является деполаризация излучения. Данный параметр стал возможным для измерений благодаря многоволновым рамановским лидарам и лидарам с высоким спектральным разрешением при зондировании нерегулярных аэрозолей. Сравнение соответствующих моделируемых и экспериментальных данных также позволяет оценить адекватность математической модели.

Спектральное поведение деполаризации, определяемой выражением (10), в котором коэффициенты обратного рассеяния рассчитаны на основе тестового РАР (11) и КПП $m=1.55-i0.005$, изображено на рис. 7. В диапазоне длин волн от 355 до 1064 нм она варьируется в пределах 20-23 %.

В процессе моделирования исследуется также поведение деполаризации отдельно для ярко выраженной (индекс 1) и грубой (индекс 2) моды тестового РАР (11). Деполаризация, рассчитанная на основе ярко выраженной моды (1) и том же КПП $m=1.55-i0.005$, уменьшается от 24 % на коротких длинах волн ($\lambda=355 \text{ нм}$) до 2 % в длинноволновой области ($\lambda=1064 \text{ нм}$). Её поведение, рассчитанное на основе грубой моды (2) при тех же ус-

ловиях, меняется на противоположное: рост от $\delta(355)=21\%$ до $\delta(1064)=25\%$. Таким образом, слабая спектральная зависимость результирующей деполяризации может быть обусловлена вкладом, который создают крупные частицы в рассеяние излучения.

В целом, при моделировании наблюдаемые значения деполяризации, соответствующие грубой моде, достигали 30 % и более. В частности, при $m=1.45-i0.001$ и $m=1.45-i0.005$ деполяризация слабо растет с увеличением длины волны от 28% и 23 % соответственно до 33%.

При лидарных измерениях пыли, проводимых над пустыней Сахара (SAMUM), деполяризация оценивалась на уровне 30 % без существенных колебаний в спектральном диапазоне от 355 до 1064 нм. Сравнение деполяризации излучения, полученной экспериментальным путем и при моделировании (см. рис. 7), показывает разумное соответствие между ними.

Кроме того, моделирование позволяет изучить чувствительность деполяризации к объёмному содержанию нерегулярных частиц. На рис. 8 изображена деполяризация на длинах волн 355, 532 и 1064 нм как функция сфероидной фракции η . С ростом последней деполяризация монотонно увеличивается, достигая 27 % на длине волны 1064 нм.

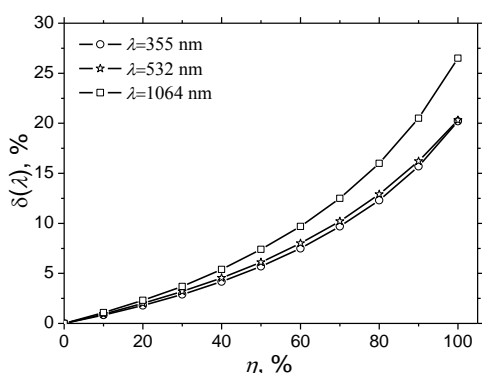


Рис. 8. Деполяризация как функция фракции сфероидов на длинах волн 355, 532, 1064 нм, $m=1.5-i0.005$

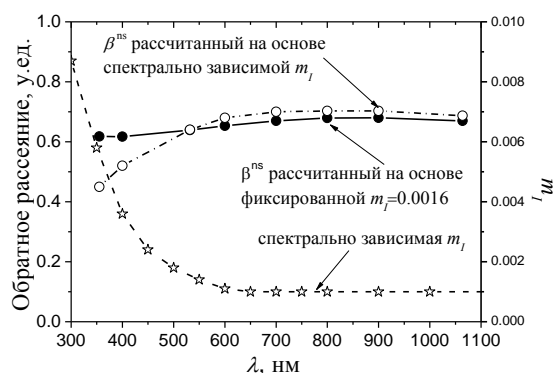


Рис. 9. Коэффициенты обратного рассеяния, рассчитанные на основе сфероидной модели, использующей переменную (незаштрихованный круг) и фиксированную (заштрихованный круг) мнимую часть КПП. Спектральное поведение мнимой части КПП представлено звездами, везде $m_R=1.55$

Важным фактором, влияющим на поведение оптических свойств частиц, является спектральная зависимость КПП. Из существующих лабораторных и экспериментальных измерений, проводимых с минеральной пылью, следует, что в диапазоне длин волн 355-1064 нм реальная часть КПП остается постоянной $m_R(\lambda)=const$, тогда как мнимая часть $m_I(\lambda)$ варьируется значительно. Рис. 9 показывает спектральную зависимость $m_I(\lambda)$, используемую при моделировании: на уровне 0.001 она не меняется в диапазоне длин волн 650-1064 нм, но на коротких длинах волн растет, достигая $m_I=0.0058$ при $\lambda=355$ нм. Одновременно рис. 9. представляет спектральное поведение общего коэффициента обратного рассеяния, рассчитанного на основе сфероидной модели при фиксированной ($m_I=0.0016$) и

переменной (в соответствии с кривой со звездами) мнимой частью КПП. В обоих случаях реальная часть КПП составляет 1.55. Как видно из рис. 9, зависимость КПП от длины волны влияет только на коротковолновую часть спектра коэффициента обратного рассеяния, при этом разница на длине волны 355 нм достигает 33 % между представленными случаями.

На основе всестороннего исследования решения прямой задачи получена оценка меры её обусловленности, выполнен анализ информационного содержания данных лидарного зондирования и их линейной независимости при различных диапазонах изменения размеров частиц, комплексного показателя преломления, измерительной погрешности. Проведенное исследование позволяет сделать вывод о существовании решения обратной задачи и его точности.

Обратной задачей является нахождение РАР $\nu(r)$ на основе данных лидарного зондирования $g_i(\lambda)$, включающих коэффициент общего обратного рассеяния на 3-6 длинах волн в диапазоне от 355 нм до 1064 нм, коэффициент ослабления на 355 и 532 нм и деполяризацию излучения на 1-3 длинах волн в диапазоне от 355 нм до 1064 нм, путем решения интегрального уравнения Фредгольма I рода (3) с неточно заданным ядром (5) и пределами интегрирования. Используемые функции удовлетворяют условиям

$$\nu \in V \subseteq C_2[r_{\min}, r_{\max}], \quad g \in G \subseteq \ell_2, \quad \int_{\lambda_1}^{\lambda_{N_\lambda}} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} [K_i(\lambda, m, r)]^2 dr d\lambda < +\infty,$$

где

$$\begin{aligned} 1.30 \leq m_R \leq 1.60; & & 0.00 \leq m_I \leq 0.05; \\ 0.05 \leq r_{\min} \leq 0.30; & & 0.05 \leq r_{\max} \leq 10.00; \quad [\text{мкм}] \\ \lambda_1 = 0.355 & & \lambda_{N_\lambda} = 1.064 \quad [\text{мкм}] \end{aligned} \quad (13)$$

$$0 \leq \eta \leq 1$$

В операторном виде имеет место представление

$$A(\eta, m) \nu = g, \quad (14)$$

где $A(\eta, m)$ – оператор Фредгольмовского типа I рода, зависящий от параметров η и m .

Данная задача относится к классу некорректных, поэтому для нахождения её решения привлекается регуляризирующий алгоритм Тихонова. В соответствии с регуляризирующим алгоритмом решение в операторном виде находится по следующему правилу

$$\nu = [A^T(\eta, m)A(\eta, m) + \gamma H]^{-1} A^T(\eta, m) g^{e_r}, \quad (15)$$

где $A^T(\eta, m)$ – оператор, сопряженный $A(\eta, m)$, H – стабилизатор, γ – неотрицательный параметр регуляризации, оптимальное значение которого неизвестно. Символ e_r означает, что исходные данные g в уравнении (14) заданы приближённо.

Т.к. в общем случае параметры η , m , r_{\min} и r_{\max} неизвестны, правило (15) применяется по следующему алгоритму:

а) задается ряд значений для каждого из параметров η , m , r_{\min} и r_{\max} , равномерно распределенных в диапазонах, на которых соответствующие параметры заданы [см. ограничения (13)];

б) для каждой комбинации полученных значений находится т.н. индивидуальное решение $\nu^{(q)}$ по правилу (15), при этом оптимальный параметр регуляризации определяется так, чтобы обеспечить минимум модифицированной невязки

$$\rho(\gamma) = \|A|\nu(\gamma) - g^{e_r}\|_G, \quad (16)$$

где знак $|\bullet|$ означает, что в каждой точке функции $\nu(\gamma)$, определяемой при некоторой γ , берётся в расчёт только абсолютное значение;

в) найденные индивидуальные решения $\nu^{(q)}$, $q=1, 2, \dots, N_\nu \leq 10000$, ранжируются по невязке (16) от минимального до максимального значения;

г) окончательное решение ν_{cp} уравнения (14) определяется путем усреднения индивидуальных решений, имеющих модифицированную невязку, лежащую в окрестности минимального значения;

д) оценка параметров η и m также осуществляется усреднением предварительно заданного ряда соответствующих значений, при котором были получены усредняемые индивидуальные решения;

е) вычисляются микрофизические параметры аэрозолей на основе усредненного решения ν_{cp} , такие как эффективный размер r_{eff} , общая концентрация n_o , площадь поверхности s_o и объём v_o , а также коэффициенты рассеяния $g_{sca}(\lambda)$ и поглощения $g_{abs}(\lambda)$, альbedo однократного рассеяния $\omega(\lambda)$.

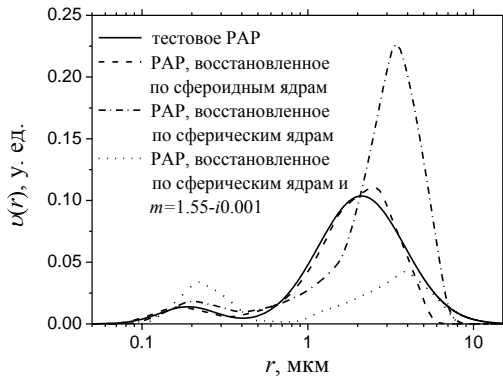


Рис. 10 Восстановление РАР, включающее только сфероиды, на основе только сфероидных или сферических ядер. Точечная кривая соответствует восстановлению на основе только сферических ядер и известного КПП.

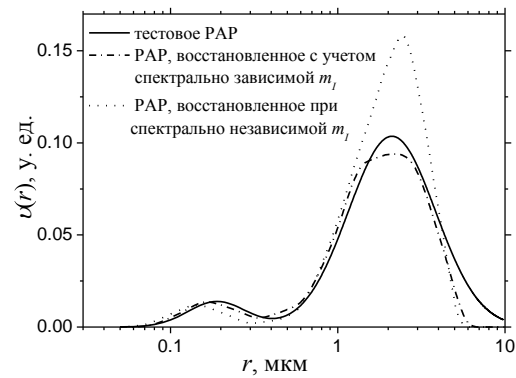


Рис. 11. РАР, восстановленные в предположении спектрально независимой мнимой части КПП и с учетом спектрально зависимой мнимой частью.

Вычисляемые на шаге е) показатели связаны с объёмным РАР следующим образом:

$$v_o = \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{\nu(r)}{r} dr, \quad s_o = 3 \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{\nu(r)}{r^2} dr, \quad n_o = \frac{3}{4\pi} \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{\nu(r)}{r^4} dr, \quad r_{eff} = \frac{3v_o}{s_o},$$

$$g_{sca,abs}(\lambda) = \int_{r_{min}}^{r_{max}} K_{sca,abs}(\lambda, m, r) \nu(r) dr, \quad \omega(\lambda) = \frac{g_{sca}(\lambda)}{g_{sca}(\lambda) + g_{abs}(\lambda)}$$

Здесь функции $K_{\text{sca}}(\lambda, m, r)$ и $K_{\text{abs}}(\lambda, m, r)$, также как и $K_{\alpha}(\lambda, m, r)$, являются энергетическими характеристиками рассеянного излучения и выражаются через соответствующие сечения рассеяния и поглощения.

Для проверки корректности алгоритма решения обратной задачи (3), стабильности его работы и устойчивости к возмущениям в исходных данных проводится математическое моделирование. В рамках математического моделирования сначала решается прямая задача, а затем на основе решения прямой задачи формируются исходные данные для обратной задачи. В качестве исходных данных используется т.н. набор $3\beta+2\alpha$, состоящий из трех коэффициентов общего обратного рассеяния на длинах волн 355, 532 и 1064 нм, двух коэффициентов ослабления на длинах волн 355 и 532 нм. При наличии нерегулярных частиц к этому набору может быть добавлена деполяризация δ на трех длинах волн. Выбор указанных исходных данных обусловлен особенностями конфигурации многоволнового рамановского лидара на основе Nd:YAG лазера с генератором третьей гармоники.

РАР, восстановленное на основе невозмущенного набора $3\beta+2\alpha$ и известной $\eta=1$, показано на рис. 10. При генерации исходных данных для обратной задачи использовалось тестовое бимодальное распределение и КПП $m=1.55-i0.001$. Восстановленное РАР близко к тестовому, при этом ошибка в оценке общего объема v составляет менее 5%, а оценка для КПП – $1.57-i0.001$. Рис. 10 также показывает решение обратной задачи в предположении, что все частицы являются сферическими, т.е. $\eta=0$. В этом случае ошибка в оценке общего объема аэрозолей v достигает уже 48 %, хотя характерные свойства бимодального РАР воспроизводятся хорошо, а КПП оценивается с еще большей ошибкой и равен $1.43-i0.004$. Попытка восстановить РАР с использованием только сферической модели аэрозолей и известного $m=1.55-i0.001$ ведет к более худшему результату, при котором грубая мода не воспроизводится должным образом.

На рис. 11 демонстрируется влияние спектрально зависимого КПП на точность решения. В этом случае при формировании исходных данных для обратной задачи используется зависимость КПП от длины волны, изображенная на рис. 9. Как видно из рис. 11, данный фактор ухудшает качество восстановления РАР, и, как следствие, ошибка в оценке общего объема аэрозолей увеличивается с 5 до 17 %. Восстановленное значение КПП составляет около $m=1.55-i0.003$, из чего можно заключить, что алгоритм дает среднюю оценку мнимой части КПП из всех значений, наблюдаемых на заданном диапазоне длин волн.

Несмотря на незначительное влияние спектрально зависимого КПП на точность решения обратной задачи, разработанный алгоритм может быть модифицирован так, чтобы снизить негативный эффект. Для этого на шаге б) алгоритма вместо фиксированной m_l задается спектрально зависящая мнимая часть. При этом $m_l(532)$ принимает текущее значение из предварительно заданного ряда на шаге а), а на длинах волн 355 и 1064 нм мнимая часть вычисляется, используя отношения $m_l(355)/m_l(532)$ и

$m_I(532)/m_I(1064)$ соответственно, которые вытекают из модельного поведения (см. рис. 9). Решение, полученное с помощью модифицированного алгоритма, также показано на рис. 11. В результат его применения, ошибка в оценке общего объёма уменьшается до 7 %, а восстановленное значение КПП оценивается около $m=1.56-i0.002$ на длине волны 532 нм, что близко к модельному значению $m=1.55-i0.0016$.

Рамановский лидар, также как и лидар высокого спектрального разрешения, обеспечивает данными с точностью около 10 %. Поскольку задача некорректна, ошибка алгоритма в оценке параметров аэрозолей очень чувствительна к возмущению в исходных данных. Для оценки влияния измерительной погрешности на размер ошибки алгоритма исходные данные возмущаются случайным образом так, что относительная погрешность на каждой длине волны может достичь 10%: $|e_r| = |g^{er} - g|/g \leq 10\%$. Один и тот же набор $3\beta+2\alpha$ подвергается возмущению много раз, после чего каждая реализация обрабатывается с помощью предлагаемого алгоритма. Чувствительность алгоритма к возмущению исходных данных иллюстрируется на рис. 12, на котором показано десять РАР, соответствующих различным реализациям случайных возмущений. Очевидно, что восстановление ярко выраженной моды вполне стабильно, а рассеяние решений в диапазоне размеров частиц более 5 мкм становится большим.

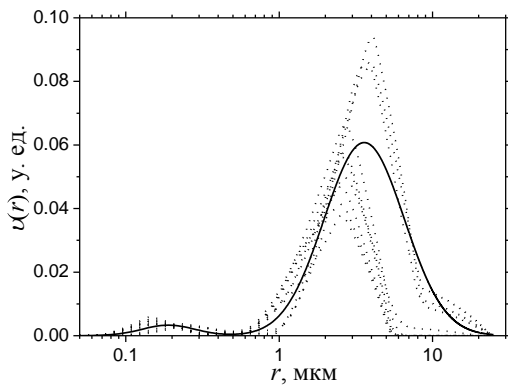


Рис. 12. РАР, восстановленные для 10 реализаций возмущенного набора $3\beta+2\alpha$ с уровнем погрешности 10 %. Сплошная кривая – тестовое РАР

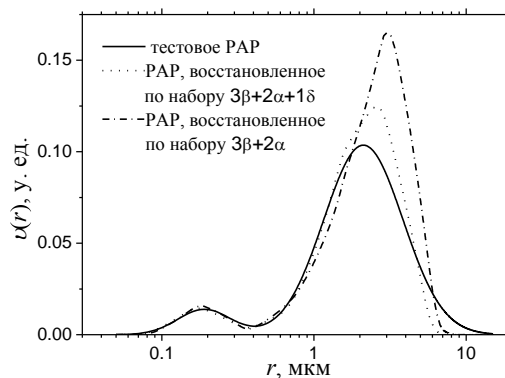


Рис. 13. Восстановление РАР, состоящее из смеси сфер и сфероидов, на основе набора $3\beta+2\alpha$ и $3\beta+2\alpha+1\delta$. Сплошная кривая – тестовое РАР

Результаты моделирования с возмущением в исходных данных до 10 % суммируются в табл. 1, в которой приводится ошибка алгоритма для различных параметров аэрозолей с вероятностью не ниже 90%. Общий объём и эффективный радиус аэрозолей восстанавливаются с точностью не хуже $e_r^{eff,Vo} = 30\%$, общая концентрация – $e_r^{no} = 60\%$. Наиболее стабильным параметром в восстановлении является общая площадь поверхности, точность которой составляет около $e_r^{so} = 12\%$. Оценка реальной части КПП возможна с точностью $e_r^{mR} = \pm 0.04$. Наиболее проблематичной представляется оценка мнимой части КПП. Если её реальное значение превышает 0.005, точность оценки составляет около 50 %, в противном случае удастся оценить только верхнюю границу.

Еще одним важным аспектом при применении нового алгоритма является роль деполяризации в восстановлении параметров аэрозолей. Представленные результаты были получены на основе набора оптических данных $3\beta+2\alpha$ при условии, что известна фракция сфероидов η , равная 1. Близкие результаты наблюдаются и при использовании набора $3\beta+2\alpha+1\delta$. Это объясняется тем, что ядра ослабления и обратного рассеяния, поляризованного перпендикулярно падающему излучению, очень близки по своему поведению (см. рис. 1б. и 3), и добавление последних не приносит новой информации, полезной для решения обратной задачи.

Таблица 1.

Ошибка алгоритма при оценке параметров аэрозолей по оптическим данным, измеренным с погрешностью 10% (20 %???)

$e_r^{v_0}$	$e_r^{s_0}$	$e_r^{n_0}$	$e_r^{r_{eff}}$	$e_r^{m_R}$
25%	12%	60%	30%	± 0.04

Ситуация меняется, если параметр η неизвестен и должен быть оценен. Значимость привлечения деполяризации в этом случае иллюстрируется на рис. 13, который показывает результаты работы алгоритма при использовании набора $3\beta+2\alpha$ и $3\beta+2\alpha+1\delta$. Исходные данные для обратной задачи формируются при $m=1.55-i0.005$, $\eta=0.6$ и $\lambda=355$ нм для расчета деполяризации. РАР, восстановленное на основе набора $3\beta+2\alpha+1\delta$, близко к тестируемому, в результате чего общий объём оценивается с точностью до 5 %. Однако при использовании набора $3\beta+2\alpha$ соответствующая точность ухудшается до 25 %, а оценка КПП $m=1.51-i0.007$ отличается от точного значения.

Проверка алгоритма также проводится в условиях неизвестного параметра η и возмущенного набора $3\beta+2\alpha+1\delta$ с уровнем погрешности 10 %. Полученная ошибка аналогична той, которая наблюдалась при моделировании только со сфероидами (см. табл. 1).

Выполненные теоретические исследования и численное моделирование позволяют перейти к следующему этапу апробации алгоритма, включающему обработку экспериментальных данных, сравнение получаемых результатов с независимыми измерениями и их интерпретацию (см. гл. 4).

Во второй главе «Двумерный регуляризирующий алгоритм восстановления профиля параметров аэрозолей» обобщается одномерная математическая модель на двумерный случай, формализуется двумерная концепция обратной задачи, разрабатывается регуляризирующий алгоритм её решения, в котором сглаживающий функционал позволяет стабилизировать решение в двух направлениях одновременно: по размеру частиц (r) и по дистанции зондирования (z).

Классическая одномерная математическая модель описывается уравнением (3). При его решении с помощью регуляризирующего алгоритма реализуется условие сглаживания искомого РАР ν как функции радиуса частиц r . Другими словами, осуществляется регуляризация, или стабилизация, решения в направлении радиуса r .

Для обобщения одномерной модели на двумерный случай полезно преобразование (3) переписать в матрично-векторной форме

$$\mathbf{A}\mathbf{w} = \mathbf{g} \quad (17)$$

Здесь вектор-столбец \mathbf{g} описывает набор всевозможных оптических данных g_p на нескольких длинах волн: $p=(i,\lambda_k)=1, 2, \dots, N_O$. Вектор-столбец \mathbf{w} состоит из неизвестных элементов w_j , т.н. весовых факторов, которые с помощью линейной комбинации базовых функций-треугольников $B_j(r)$, аналогичных $b_j(r)$, но теперь $j=1, \dots, N_B \leq 8$ и $r_0=r_{\min}$, $r_{N_B+1}=r_{\max}$, позволяют аппроксимировать РАР

$$v(r) \approx \sum_{j=1}^{N_B} w_j B_j(r) \quad (18)$$

Элементы матрицы \mathbf{A} определяются выражением:

$$a_{pj} = \int_{r_{j-1}}^{r_{j+1}} K_p(m, r) B_j(r) dr \quad (19)$$

Таким образом, выражение (17) является системой линейных алгебраических уравнений с вектором неизвестных \mathbf{w} и заданной правой частью \mathbf{g} . В соответствующей матрично-векторной форме решение уравнения (3) с помощью регуляризирующего алгоритма находится по правилу

$$\mathbf{w} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \gamma \mathbf{H})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{g}, \quad (20)$$

где \mathbf{A}^T – матрица, транспонированная к \mathbf{A} , стабилизатор \mathbf{H} определяет способ сглаживания искомой функции v . Если потребовать от функции v неразрывность, то матрица \mathbf{H} вырождается в единичную \mathbf{E} . В случае гладкости 1-ой производной функции v , \mathbf{H} является матрицей квадратичной формы суммы квадратов вторых конечно-разностных производных для функции v .

Оптические данные измеряются лидаром по всей трассе зондирования и характеризуются удалением z от лидарной системы. Тогда закономерно ввести еще одно направление, z , выделить в данном направлении слои z_l , $l=1, 2, \dots, N_L \leq 20$, толщиной $\Delta z = (z_{N_L} - z_1) / (N_L - 1)$ последовательно распределенные от минимального z_1 до максимального z_{N_L} расстояния, и рассмотреть на каждом из них уравнение (3). В этом случае возникает N_L интегральных уравнений

$$\int_{r_{\min}^{(l)}}^{r_{\max}^{(l)}} K_p(m^{(l)}, r) v^{(l)}(r) dr = g_p^{(l)}, \quad l=1, 2, \dots, N_L \quad (21)$$

и соответствующих им N_L систем линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{A}^{(l)} \mathbf{w}^{(l)} = \mathbf{g}^{(l)}, \quad l=1, 2, \dots, N_L \quad (22)$$

Чтобы одновременно решить эти системы, можно построить обобщенную систему линейных алгебраических уравнений вида

$$\tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{w}} = \tilde{\mathbf{g}} \quad (23)$$

с блочными матрицей и векторами

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{A}^{(1)}]_{N_0 \times N_B} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [\mathbf{A}^{(2)}]_{N_0 \times N_B} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & [\mathbf{A}^{(N_L)}]_{N_0 \times N_B} \end{bmatrix}_{N_L N_0 \times N_B N_L}, \quad \tilde{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{w}^{(1)}]_{N_B \times 1} \\ [\mathbf{w}^{(2)}]_{N_B \times 1} \\ \dots \\ [\mathbf{w}^{(N_L)}]_{N_B \times 1} \end{bmatrix}_{N_B N_L \times 1}, \quad \tilde{\mathbf{g}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{g}^{(1)}]_{N_0 \times 1} \\ [\mathbf{g}^{(2)}]_{N_0 \times 1} \\ \dots \\ [\mathbf{g}^{(N_L)}]_{N_0 \times 1} \end{bmatrix}_{N_L N_0 \times 1},$$

при этом решение находится с помощью регуляризирующего алгоритма по правилу

$$\tilde{\mathbf{w}} = (\tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{A}} + \gamma \tilde{\mathbf{H}})^{-1} \tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{g}}, \quad (24)$$

где матрица-стабилизатор также имеет блочную структуру:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{H}]_{N_B \times N_B} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [\mathbf{H}]_{N_B \times N_B} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & [\mathbf{H}]_{N_B \times N_B} \end{bmatrix}_{N_B N_L \times N_B N_L}$$

Как видно из этого правила, решения $\mathbf{w}^{(1)}, \dots, \mathbf{w}^{(N_L)}$ определяются независимо друг от друга и не отличаются от решения в классической постановке задачи (17) в соответствующем высотном слое l , однако такая переформулировка одномерной модели позволяет сделать обобщение на двумерный случай. В связи с этим целесообразно ввести следующие функции:

$$\begin{aligned} K(m^{(l)}, r) &\rightarrow K(m(z), r), & \nu^{(l)}(r) &\rightarrow \nu(r, z), & g_p^{(l)} &\rightarrow g_p(z), \\ a_{pj}^{(l)} &\rightarrow a_{pj}(z), & w_j^{(l)} &\rightarrow w_j(z), & r_{\min, \max}^{(l)} &\rightarrow r_{\min, \max}(z) \end{aligned} \quad (25)$$

Тогда интегрирование выражения (21) по z от z_1 до z_{N_L} ведет к двумерному интегральному уравнению:

$$\int_{z_1}^{z_{N_L}} \int_{r_{\min}(z)}^{r_{\max}(z)} K_p(m(z), r) \nu(r, z) dr dz = G_p \quad (26)$$

Здесь функция

$$G_p = \int_{z_1}^{z_{N_L}} g_p(z) dz \quad (27)$$

описывает оптические данные, проинтегрированные по всей трассе зондирования, и в случае с коэффициентом ослабления называется оптической толщиной, а поверхность $\nu(r, z)$ – распределение аэрозолей по двум направлениям: размеру и дистанции зондирования.

Уравнение (26) может быть снова сведено к одномерному случаю, но уже в направлении z . Для этого проводится интегрирование по r с учетом того, что используется аппроксимация (18), в которой предварительно сделана замена (25). В результате возникает сумма

$$\sum_{j=1}^{N_B} \int_{z_1}^{z_{N_L}} a_{pj}(z) w_j(z) dz = G_p, \quad (28)$$

которую всегда можно разбить с помощью некоторых факторов ϕ_j , таких, что $\sum_{j=1}^{N_B} \phi_j = 1$, на N_B интегральных уравнений Фредгольма I рода относи-

тельно функции $w_j(z)$, представляющей собой объёмное распределение по высоте аэрозолей радиусом r_j :

$$\int_{z_1}^{z_{N_L}} a_{pj}(z)w_j(z)dz = \phi_j G_p, \quad j=1,2,\dots, N_B \quad (29)$$

К решению данного уравнения можно применить тот же самый подход, как и для уравнения (21). В частности, использование аппроксимации $w_j(z)$ с помощью полиномов нулевого порядка на соответствующем отрезке $[z_l, z_{l+1}]$ (формально $z_{N_L+1} = z_{N_L} + \Delta z$), представляющей искомую функцию как ступенчатую, позволяет прийти к N_B системам линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{A}_j \mathbf{w}_j \cong \phi_j \mathbf{G} / \Delta z, \quad j=1,2,\dots, N_B, \quad (30)$$

где матрица \mathbf{A}_j и вектор-столбцы \mathbf{w}_j и \mathbf{G} имеют компоненты $a_{pj}^{(l)}$, $w_j^{(l)}$ и G_p соответственно, причем здесь $l=1,2,\dots, N_L$, $p=1, 2, \dots, N_O$, а индекс j – фиксированный.

Продолжая аналогию, на основе N_B систем (30) строится обобщенная система линейных алгебраических уравнений вида

$$\bar{\mathbf{A}} \bar{\mathbf{w}} \cong \bar{\mathbf{g}} \quad (31)$$

с блочными матрицей и векторами

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{A}_1]_{N_O \times N_L} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [\mathbf{A}_2]_{N_O \times N_L} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & [\mathbf{A}_{N_B}]_{N_O \times N_L} \end{bmatrix}_{N_B N_O \times N_B N_L}, \quad \bar{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{w}_1]_{N_L \times 1} \\ [\mathbf{w}_2]_{N_L \times 1} \\ \dots \\ [\mathbf{w}_{N_B}]_{N_L \times 1} \end{bmatrix}_{N_B N_L \times 1}, \quad \bar{\mathbf{g}} = \frac{1}{\Delta z} \begin{bmatrix} \phi_1 [\mathbf{G}]_{N_O \times 1} \\ \phi_2 [\mathbf{G}]_{N_O \times 1} \\ \dots \\ \phi_{N_B} [\mathbf{G}]_{N_O \times 1} \end{bmatrix}_{N_B N_O \times 1},$$

решение которой находится по правилу

$$\bar{\mathbf{w}} = (\bar{\mathbf{A}}^T \bar{\mathbf{A}} + \kappa \bar{\mathbf{H}})^{-1} \bar{\mathbf{A}}^T \bar{\mathbf{g}}, \quad (32)$$

где блочная матрица-стабилизатор $\bar{\mathbf{H}}$ имеет структуру:

$$\bar{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{H}]_{N_L \times N_L} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [\mathbf{H}]_{N_L \times N_L} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & [\mathbf{H}]_{N_L \times N_L} \end{bmatrix}_{N_B N_L \times N_B N_L},$$

а κ – параметр регуляризации, определяющий степень сглаживания в направлении z .

Оба вектора $\tilde{\mathbf{w}}$ и $\bar{\mathbf{w}}$ описывают искомое решение задачи (26), которая может быть сведена к обобщенной системе (23) или (31), но отличаются друг от друга порядком, в котором расположены соответствующие компоненты $w_j^{(l)}$. Переупорядочивание компонент $w_j^{(l)}$ (или строк) у вектор-столбца $\bar{\mathbf{w}}$ так, что вектор $\bar{\mathbf{w}} \rightarrow \tilde{\mathbf{w}}$, и одновременная перегруппировка соответствующих вектор-столбцов у матриц $\bar{\mathbf{A}}$ и $\bar{\mathbf{H}}$, в результате которой возникнут новые матрицы $\hat{\mathbf{A}}$ и $\hat{\mathbf{H}}$, приводит систему (31) к новой системе линейных алгебраических уравнений

$$\hat{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{w}} \cong \bar{\mathbf{g}}, \quad (33)$$

но с прежним решением, определяемым по правилу

В результате применения алгоритма находится поверхность $\nu(r, z)$, профили микрофизических параметров аэрозолей $r_{eff}(z)$, $n_o(z)$, $s_o(z)$, $v_o(z)$, $m(z)$ и пр.

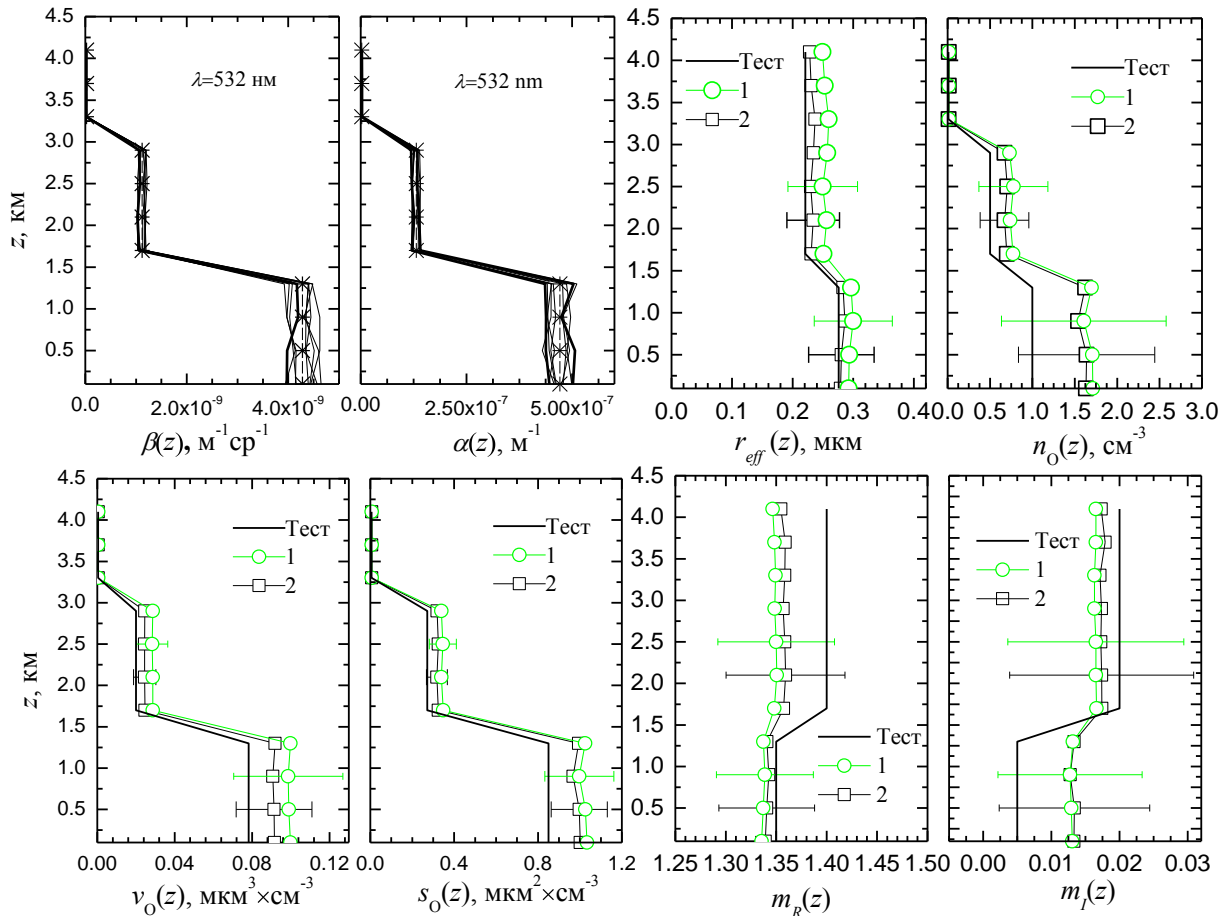


Рис. 14. Возмущенные (сплошные линии) и невозмущенные (звезды) профили коэффициентов обратного рассеяния $\beta(z)$ и ослабления $\alpha(z)$ на длине волны 532 нм и решения, полученные с помощью одномерного (1) и двумерного алгоритмов (2), для профилей эффективного размера $r_{eff}(z)$, общей концентрации $n_o(z)$, площади поверхности $s_o(z)$ и объёма $v_o(z)$, КПП $m(z) = m_r(z) - im_i(z)$. Сплошная линия (Тест) соответствует тестируемому (точному) профилю, планка погрешности – стандартному разбросу.

Для проверки корректности алгоритма проводится математическое моделирование тем же образом, что и в гл. 1: решается прямая задача (21) по вычислению профилей оптических данных (набор $3\beta+2\alpha$) на основе тестовой поверхности $\nu_l(r, z_l) = \nu^{(l)}(r)$, $l=1, 2, \dots, N_L$, затем полученные профили возмущаются, и, наконец, возмущенные профили оптических данных используются как исходная информация для двумерного регуляризирующего алгоритма. Чтобы оценить преимущества двумерной концепции над одномерной, оптические данные обрабатываются также с помощью «классического» регуляризирующего алгоритма, описанного в гл. 1.

На рис. 14 иллюстрируются основные этапы моделирования. Прежде всего, задается общее число слоев $N_L=11$, распределенных от $z_1=0.1$ км до $z_{N_L}=4.1$ км, в которых вычисляются оптические данные. Они изображены в виде звезд и соответствуют коэффициентам обратного рассеяния $\beta(z)$ и ослабления $\alpha(z)$ на длине волны 532 нм. При их расчете тестируемые РАР представляются в виде мономодального распределения (11) с параметрами,

приведенными в табл. 2. Рис. 15 показывает два из них сплошными линиями на высотах 0.9 км ($l=3$) и 2.1 км ($l=6$).

Таблица 2.

Параметры тестируемых РАР для расчета профиля оптических данных

l	$r_1^{(l)}$, МКМ	$\ln \sigma_1^{(l)}$	$n_1^{(l)}$, см ⁻³	$m_R^{(l)}$	$m_I^{(l)}$
1-4	0.25	0.2	1.00	1.35	0.005
5-8	0.20	0.2	0.50	1.40	0.020
9-11	0.20	0.2	0.01	1.40	0.020

Полученные профили оптических данных для набора $3\beta+2\alpha$ возмущаются случайным образом в каждом слое до уровня погрешности 10 %. На рис. 14 можно увидеть по 10 реализаций для коэффициентов $\beta(z)$ и $\alpha(z)$ на длине волны 532 нм. Каждая из реализаций подвергается обработке с помощью одномерного и двумерного алгоритма, в результате чего возникает по 10 решений, таких как профиль эффективного размера $r_{eff}(z)$, общей концентрации $n_o(z)$, площади поверхности $s_o(z)$, объема $v_o(z)$ и КПП $m(z)$. Для удобства анализа 10 решений усредняются и находится их стандартный разброс. На рис. 14, 15 усредненные таким образом решения, полученные с помощью одномерного алгоритма, представлены кривыми, снабженными кружками (индекс 1), а с помощью двумерного – квадратами (индекс 2). Сплошные линии без маркеров означают тестируемый (точный) профиль, планка погрешности – стандартный разброс.

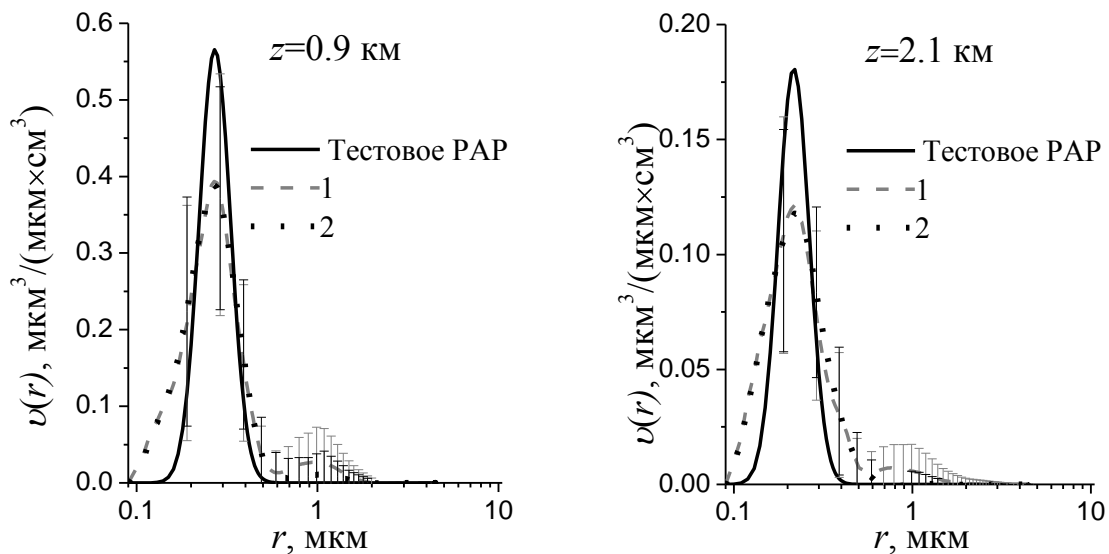


Рис. 15. РАР, восстановленные с помощью одномерного (1) и двумерного (2) алгоритмов на высотах 0.9 и 2.1 км.

Анализ результатов показывает, что в оценке профиля общей площади поверхности $s_o(z)$ значительной разницы между обоими алгоритмами не возникает. Данный параметр всегда характеризовался наибольшей точностью и стабильностью при восстановлении. При рассмотрении профилей $n_o(z)$, $v_o(z)$ и $r_{eff}(z)$ ситуация меняется и восстановленные значения двумерным алгоритмом лучше согласуются с точным решением. Это можно объяснить, если сравнить восстановленные РАР на высотах 0.9 км и 2.1 км

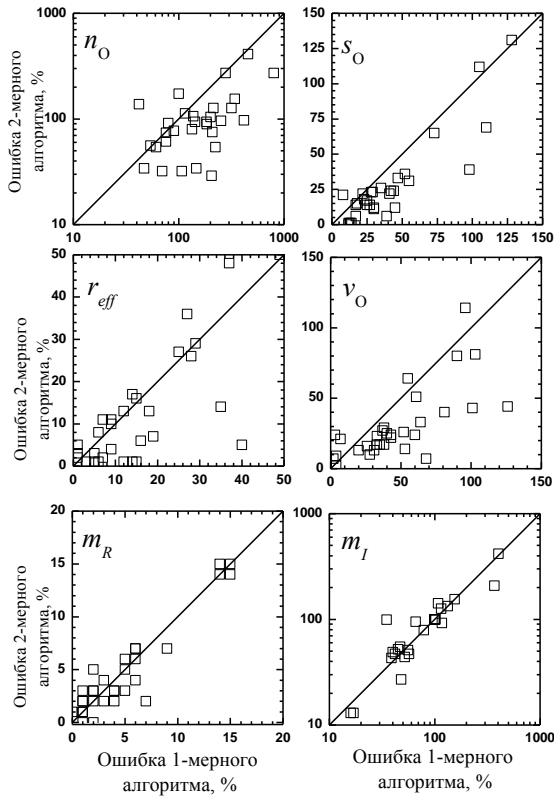


Рис. 16. Сравнение ошибки восстановления эффективного размера r_{eff} , общей концентрации n_0 , площади поверхности s_0 и объема v_0 , КПП $m = m_R - im_I$ между двумерным и одномерным алгоритмами.

улучшение результатов обнаружено в 50 % случаев. КПП восстанавливается обоими алгоритмами с сопоставимой точностью.

Проверка двумерного алгоритма при обработке данных лидарного зондирования в реальных условиях и сравнение полученных результатов с результатами локального забора проб для контроля точности восстановления параметров аэрозолей дистанционным методом проводится в гл. 4.

В третьей главе «Быстрый алгоритм для линейной оценки поля микрофизических параметров аэрозолей по данным лидарных измерений» разрабатывается метод, альтернативный регуляризации, основанный на разложении неизвестного РАР в ряд по ядрам интегрального уравнения. Здесь также математическая модель описывается уравнением (3) и соответствующим дискретным аналогом в матрично-векторной форме (17).

Основная идея метода состоит в разложении искомого вектора \mathbf{w} по ядрам, или по вектор-строкам матрицы \mathbf{A} с помощью некоторого вектора \mathbf{x} :

$$\mathbf{w} = \mathbf{A}^T \mathbf{x} + \mathbf{w}^\perp, \quad (39)$$

при этом возникает остаточный вектор \mathbf{w}^\perp , ортогональный вектор-строкам матрицы \mathbf{A} ($\mathbf{A} \mathbf{w}^\perp = \mathbf{0}$). Вектор \mathbf{x} содержит компоненты, по которым компоненты вектора \mathbf{w} раскладываются следующим образом

$$w_j = \sum_{p=1}^{N_0} x_p a_{pj} + w_j^\perp \quad (40)$$

(см. рис. 15). РАР, полученные методом двумерной регуляризации (точечные кривые), в отличие от РАР, полученных одномерным алгоритмом (пунктирные кривые), не имеют ложной грубой моды в диапазоне размеров частиц около 1 мкм.

Рис. 16 представляет статистический анализ ошибки восстановления микрофизических параметров аэрозолей, полученной по отдельным реализациям возмущенных оптических данных в каждом высотном слое. Как видно, общая концентрация, площадь поверхности и объем могут быть оценены с меньшей ошибкой двумерным алгоритмом: около 80 % случаев характеризуются лучшими результатами, когда дополнительно активируется сглаживание вдоль дистанции зондирования. При оценке эффективного размера

Подстановка разложения (39) в уравнение (17) ведет к промежуточному соотношению

$$\mathbf{A}\mathbf{A}^T \mathbf{x} = \mathbf{g}, \quad (41)$$

откуда вектор \mathbf{x} формально выражается как

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{g} \quad (42)$$

Умножение обеих частей этого выражения на матрицу \mathbf{A}^T слева и пренебрежение остаточным членом \mathbf{w}^\perp [см. разложение (39)] позволяет получить искомый вектор

$$\mathbf{w} \approx \mathbf{A}^T (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{g} \quad (43)$$

Чтобы перейти непосредственно к оценке микрофизических параметров аэрозолей, вводится вспомогательный вектор-строка \mathbf{y}'' , перемножение на который обеих частей выражения (43) слева дает окончательный результат

$$u \approx \mathbf{y}'' \mathbf{A}^T (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{g}, \quad u = v_o, s_o, n_o, g_{\text{sca}}, g_{\text{abs}}, \dots \quad (44)$$

В зависимости от оцениваемого параметра компоненты вектор-строки \mathbf{y}'' определяются по формулам:

$$y_j^{v_o} = \int_{r_{j-1}}^{r_{j+1}} \frac{B_j(r)}{r} dr, \quad y_j^{s_o} = 3 \int_{r_{j-1}}^{r_{j+1}} \frac{B_j(r)}{r^2} dr, \quad y_j^{n_o} = \frac{3}{4\pi} \int_{r_{j-1}}^{r_{j+1}} \frac{B_j(r)}{r^4} dr,$$

$$y_j^{g_{\text{sca}}, g_{\text{abs}}} = \int_{r_{j-1}}^{r_{j+1}} K_{\text{sca,abs}}(\lambda, m, r) B_j(r) dr, \quad j=1, \dots, N_B$$

Поскольку в общем случае матрица \mathbf{A} плохо обусловлена, нахождение решения по правилу (44) может приводить к его неустойчивости при малых возмущениях в исходных данных. Для стабилизации решения в данном подходе действительная симметричная матрица $\mathbf{A}\mathbf{A}^T$ представляется с помощью своих собственных векторов \mathbf{U}_p , $p=1, \dots, N_O$, и собственных чисел $\chi_1 \geq \dots \geq \chi_{N_O}$

$$\mathbf{A}\mathbf{A}^T = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{U}^T, \quad (45)$$

где матрица \mathbf{U} состоит из вектор-столбцов \mathbf{U}_p , а диагональная матрица \mathbf{D} содержит на диагонали собственные числа χ_p . Удаление из матрицы \mathbf{D} минимального собственного значения $\chi_{\min} = \chi_{N_O}$ и соответствующего собственного вектора \mathbf{U}_{N_O} из матрицы \mathbf{U} позволяет стабилизировать решение (44) без привлечения регуляризации.

Сложностью, связанной с нахождением решения по правилу (44), является следующее обстоятельство. При его использовании нельзя сравнить невязку каких-либо индивидуальных решений, полученных, например, при различных значениях параметра m , так как она всегда тождественно равна 0, какой бы ни был параметр m . В связи с этим применяется специальный способ определения вектора оптических данных \mathbf{g}^{inv} , соответствующего индивидуальному решению, полученному по правилу (44) при некоторых η , m , r_{\min} и r_{\max} . Согласно ему компонента g_p^{inv} вектора \mathbf{g}^{inv} также находятся по правилу (44), но при этом матрица \mathbf{A} заменяется на аналогичную матрицу \mathbf{A}' , в которой отсутствует p -ая вектор-строка, а вектор \mathbf{g} заменяется на аналогичный вектор \mathbf{g}' , в котором нет p -ой компоненты:

$$g_p^{\text{inv}} = \mathbf{y}^{g_p} \mathbf{A}'^T (\mathbf{A}' \mathbf{A}'^T)^{-1} \mathbf{g}' \quad p=1,2,\dots,N_0 \quad (46)$$

Теперь невязка индивидуального решения легко может быть рассчитана в норме пространства G

$$\rho = \|\mathbf{g}^{\text{inv}} - \mathbf{g}\|_G \quad (47)$$

Необходимо сделать несколько важных замечаний, связанных с применением предлагаемого метода:

1. Правило (44) фактически сводится к вычислению суммы:

$$u \approx \sum_{p=1}^{N_0} \varphi_p^u g_p, \quad (48)$$

где коэффициенты φ_p^u являются компонентами вектор-строки $\boldsymbol{\varphi}^u = \mathbf{y}^u \mathbf{A}'^T (\mathbf{A}' \mathbf{A}'^T)^{-1}$. Другими словами, параметры аэрозолей представляются в виде линейной комбинации взвешенных оптических данных, поэтому результат их восстановления с помощью рассматриваемого метода можно назвать линейной оценкой.

2. Коэффициенты φ_p^u не требуют знания никакой априорной информации, поэтому целесообразно их сохранение в банк данных. В результате линейная оценка параметров аэрозолей (48) с вычислительной точки зрения является очень быстрой операцией и позволяет обрабатывать колоссальное количество наборов оптических данных в реальном времени.

3. Лидарная система обеспечивает непрерывное во времени измерение профилей оптических данных $g_p(z)$. Это означает, что результатами измерений является карта, или поле, оптических данных $g_p(z, \tau)$, распределенных по дистанции зондирования z и времени τ . Тогда применение быстрой линейной оценки (48) позволяет получить и поле микрофизических параметров аэрозолей, таких как эффективного размера $r_{\text{eff}}(z, \tau)$, общей концентрации $n_o(z, \tau)$, площади поверхности $s_o(z, \tau)$ и объема $v_o(z, \tau)$, а также поле КПП $m(z, \tau)$, коэффициентов рассеяния $g_{\text{sca}}(z, \tau)$ и поглощения $g_{\text{abs}}(z, \tau)$, альбедо однократного рассеяния $\omega(z, \tau)$.

4. Результатом применения предлагаемого метода является линейная оценка несколько независимых интегральных параметров, характеризующих неизвестное РАР $\nu(r)$: n_o , s_o и v_o . Возникает закономерный вопрос, а возможно ли дальнейшее упрощение лидарной системы, которая бы измеряла уменьшенный набор оптических данных, например, $3\beta+1\alpha$, достаточный для оценки указанных параметров с аналогичной точностью? Подтверждение такой возможности осуществляется путем математического моделирования и сравнения с результатами, получаемыми с помощью традиционных методов.

На основе сделанных замечаний быстрый алгоритм для линейной оценки поля микрофизических параметров аэрозолей по оптическим данным формализуется следующим образом:

а) задается ряд значений для каждого из параметров η , m , r_{min} и r_{max} , равномерно распределенных в диапазонах, на которых соответствующие параметры заданы [см. ограничения (13)];

б) для каждой комбинации полученных значений находятся индивидуальные интегральные параметры аэрозолей $u^{(q)}$ по правилу (44) и соответствующая им невязка (47);

в) найденные индивидуальные решения $u^{(q)}$, $q=1, 2, \dots, N_v$, ранжируются по невязке (47) от минимального до максимального значения;

г) окончательное решение u_{cp} уравнения (17) определяется путем усреднения индивидуальных решений, имеющих невязку, лежащую в окрестности минимального значения;

д) оценка параметров η и m осуществляется усреднением предварительно заданного ряда соответствующих значений, при котором были получены усредняемые индивидуальные решения.

Для определения точности быстрого алгоритма выполняются теоретические оценки и математическое моделирование, выявляющие влияние на результат остаточного члена w^\perp , измерительной погрешности оптических данных, отсутствия априорной информации о КПП. Выполненные исследования обобщаются нижеследующими результатами.

Наличие остаточного члена w^\perp в разложении (39) не приводит к значительной погрешности при оценке микрофизических параметров аэрозолей. Для общего объема аэрозолей она составляет не более 5% при восстановлении ярко выраженной моды РАР и 15 % при восстановлении грубой моды.

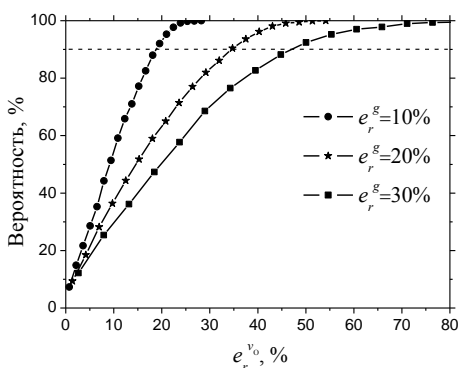


Рис. 17. Вероятность распределения ошибки $e_r^{v_0}$ в оценке общего объема аэрозолей при уровне погрешности оптических данных $e_r^g = 10, 20$ и 30% . Моделирование проводится для ярко выраженной моды.

Влияние измерительной погрешности оптических данных на точность алгоритма иллюстрируется на рис. 17 на примере оценки общего объема аэрозолей. Рис. 17 показывает распределение вероятности ошибки $e_r^{v_0}$ в оценке v_0 для уровней погрешности оптических данных $e_r^g = 10, 20$ и 30% , при этом статистика включает более 1000 реализаций погрешностей оптических данных. Тестируемое РАР имеет только ярко выраженную моду. Из рис. 17 следует, что ошибка $e_r^{v_0}$ в оценке общего объема с вероятностью 90 % составляет около 20, 35 и 50% при погрешности оп-

тических данных 10, 20 и 30 % соответственно. Для данного уровня вероятности определяется ошибка восстановления и остальных параметров.

Результаты моделирования сведены в таблице 3. Она содержит ошибки в оценке общего объема, площади поверхности и концентрации, эффективного размера и реальной части КПП аэрозолей, распределение по размеру которых включает только грубую или ярко выраженную моду, в зависимости от погрешности оптических данных.

Таблица 3.

Ошибка быстрого алгоритма при оценке параметров аэрозолей ярко выраженной и грубой моды в зависимости от погрешности оптических данных

Мода	$e_r^g, \%$	$e_r^{v_0}, \%$	$e_r^{s_0}, \%$	$e_r^{n_0}, \%$	$e_r^{r_{eff}}, \%$	$e_r^{m_R}$
Ярко выраженная	0	5	5	10	5	0.01
	10	20	20	40	25	0.05
	20	45	35	60	40	0.07
Грубая	0	15	2	25	15	0.015
	10	30	10	75	25	0.025
	20	45	30	110	35	0.04

На основе полученных результатов можно сделать ряд выводов. Быстрый алгоритм является стабильным при восстановлении интегральных параметров как крупных, так и малых частиц, при этом ошибка в оценке общего объёма составляет менее 45 % даже в случае погрешности оптических данных, достигающей 20 %. Ошибка в оценке эффективного размера, общей площади поверхности и объёма сопоставима для малых частиц, тогда как для крупных частиц их общая площадь является наиболее стабильным параметром в оценке, которая не превышает 30 % при погрешности $e_r^g=20\%$. Наиболее нестабильным параметром при восстановлении выступает общая концентрация частиц, ошибка в оценке которой для грубой моды превышает 100 % при $e_r^g=20\%$. Реальная часть КПП более точно восстанавливается для больших частиц с ошибкой ± 0.04 и $e_r^g=20\%$, для малых частиц ошибка увеличивается до ± 0.07 .

Как и в случае применения других подходов, описанных в гл. 1 и 2, наибольшей проблемой при решении рассматриваемой задачи многоволнового лидарного зондирования является оценка мнимой части КПП. Быстрый алгоритм приводит к аналогичной ошибке в её оценке. Проведенные исследования показывают, что разумная оценка мнимой части КПП требует привлечения априорной информации, которая позволила бы ограничить область возможных значений m_I [см. ограничения (13)], при этом исходная неопределенность, или диапазон варьирования мнимой части, должна составлять не более 100 % по сравнению с точным значением.

Представленные результаты были получены при использовании набора оптических данных $3\beta+2\alpha$. Аналогичные результаты быстрый алгоритм дает при обработке набора данных $3\beta+1\alpha$, в котором отсутствует коэффициент ослабления на длине волны 532 нм. Это означает, что уменьшенное количество исходной информации и, как следствие, более простая лидарная установка, могут быть использованы для оценки интегральных параметров аэрозолей при лидарном зондировании.

В следующей главе демонстрируются преимущества применения быстрого алгоритма при обработке экспериментальных данных, измеренных при лидарном зондировании, и проводится сравнение результатов, полученных с помощью различных подходов.

Четвертая глава «Обработка экспериментальных данных. Проверка достоверности результатов применения разработанных алгоритмов» содержит экспериментальное обоснование решения рассматриваемой задачи, описание методов экспериментальных исследований, анализ сходимости результатов, полученных методами активного (лидарного) и пассивного (на основе солнечного радиометра) зондирования, локального забора проб.

Экспериментальные данные активного зондирования были получены с помощью многоволновых рамановских лидаров, работающих в институте тропосферных исследований в Лейпциге, НАСА/ГЦКП, Мармарском исследовательском центре, расположенном в окрестности Стамбула и др. научных центрах. Они позволяют измерять профили коэффициентов обратного рассеяния на длинах волн 355, 532 и 1064 нм с погрешностью от 5 до 15 % и ослабления на длинах волн 355 и 532 нм с погрешностью 15-20%, а также деполяризацию излучения на длинах волн 355 и 532 нм.

Экспериментальные данные пассивного зондирования измеряются в рамках глобальной аэрозольной автоматизированной сети (AERONET) с помощью солнечных радиометров. Она обеспечивает в светлое время суток информацией об оптической толщине аэрозолей $G_{\alpha}(\lambda_k)$, интегральном РАР всего профиля зондирования

$$V(r) = \int_0^{\infty} v(r, z) dz \quad (49)$$

и о соответствующих микрофизических параметрах, КПП.

Локальный забор проб осуществлялся с борта самолета, курсировавшего в окрестности и в течение работы лидарной установки. Расположенный на борту самолета счетчик частиц позволяет определять РАР и соответствующие микрофизические параметры.

Крупнейшая в истории экспедиция по измерению минеральной пыли состоялась в 2006 г. в пустыне Сахара. Она проводилась при участии ведущих исследовательских групп, которые использовали различные измерительные инструменты. Собранные уникальные экспериментальные данные позволили сделать важный шаг в проверке разработанных инструментов, математических моделей и методов по количественным оценкам параметров аэрозолей нерегулярной формы.

Измерения, проводимые 4 июня 2006, были получены одновременно тремя инструментами, описанными выше. В этот день наблюдался пылевой шлейф высотой 4.5 км, в котором деполяризация достигала 35 %. Лидарные данные обрабатывались с высоты $z=3.78$ км. Для восстановления использовались два набора $3\beta+2\alpha+1\delta$ и $3\beta+2\alpha$, результаты которого представлены на рис. 18. Оба РАР близки друг к другу и имеют сильно доминирующую грубую моду с модальным радиусом около 4 мкм, хотя для полного набора оптических данных она смещена в сторону меньших размеров. Это согласуется с результатами 1 главы, где отмечалось, что максимум деполяризации (вплоть до 40 %) приходится на частицы размером 1 мкм, при этом реальная часть КПП составляет менее 1.5, а мнимая – близка

к 0. Как следствие, КПП оценивается около $m=1.45-i0.001$ и $1.55-i0.007$ для полного и уменьшенного набора оптических данных соответственно.

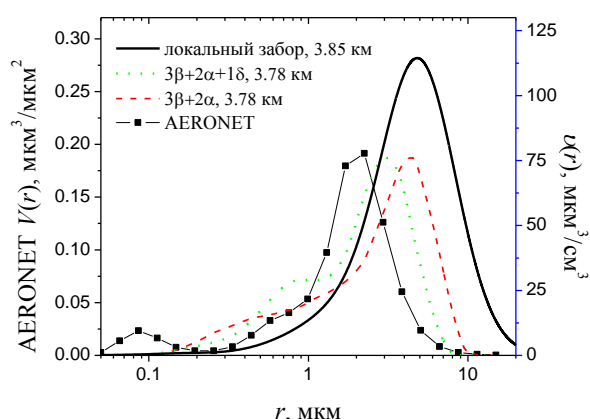


Рис. 18. PAR, полученные путем лидарных измерений по набору оптических данных $3\beta+2\alpha+1\delta$ (точечная кривая) и $3\beta+2\alpha$ (пунктирная кривая), измерений с помощью солнечного радиометра (кривая с маркером) и локального забора проб (сплошная кривая), проводимых 4.06.2006 г.

модальным радиусом около 0.1 мкм. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что солнечный радиометр дает интегральную информацию о профиле зондирования в целом, включая малые высоты $z \approx 0$ км, на которых могут сосредоточиться аэрозоли с интенсивной ярко выраженной модой. К сожалению, качественные лидарные измерения, проводимые 4 июня 2006 г. на малых высотах, отсутствуют.

Наконец, рис. 18 показывает результаты локального забора проб, сделанных на высоте $z=3.85$ км. Как и в случае с результатами, полученными по лидарным данным, здесь PAR также имеет мощную грубую моду с пиком около 4 мкм, при этом общий объем аэрозолей оценивается около $177 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$. Аналогичный параметр, восстановленный по лидарным данным, равен $120 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$.

Сравнение результатов обработки измерений, выполненных различными инструментами 4 июня 2006 г., демонстрирует их разумную сходимость.

Следующий эксперимент был проведен 22 июля 2004 г. В это время над Европой располагался протяженный шлейф продуктов горения биомассы высотой до 8 км, причиной которого стали пожары в Северной Америке несколькими днями ранее. Профили трех коэффициентов обратного рассеяния и двух коэффициентов ослабления (см. рис. 19) были измерены лидарной установкой, расположенной в Лейпциге, а локальный забор проб проводился над западным побережьем Европы.

На рис. 19 показаны результаты применения одномерного и двумерного регуляризирующего алгоритмов: профили эффективного размера, общей концентрации, площади поверхности, объема, КПП, альbedo одно-кратного рассеяния на длине волны 355 нм и PAR на высоте 3.8 км.

На рис. 18 также показано PAR, восстановленное по данным, измеренным солнечным радиометром. Как видно, грубые моды, полученные по лидарным и радиометрическим данным, близки, хотя модальное значение радиуса последней составляет около 2 мкм. КПП по данным солнечного радиометра оценивается около $1.45-i0.003$ на длине волны 675 нм. Результаты обработки данных солнечного радиометра в отличие от лидарных данных указывают на наличие ярко выраженной моды с

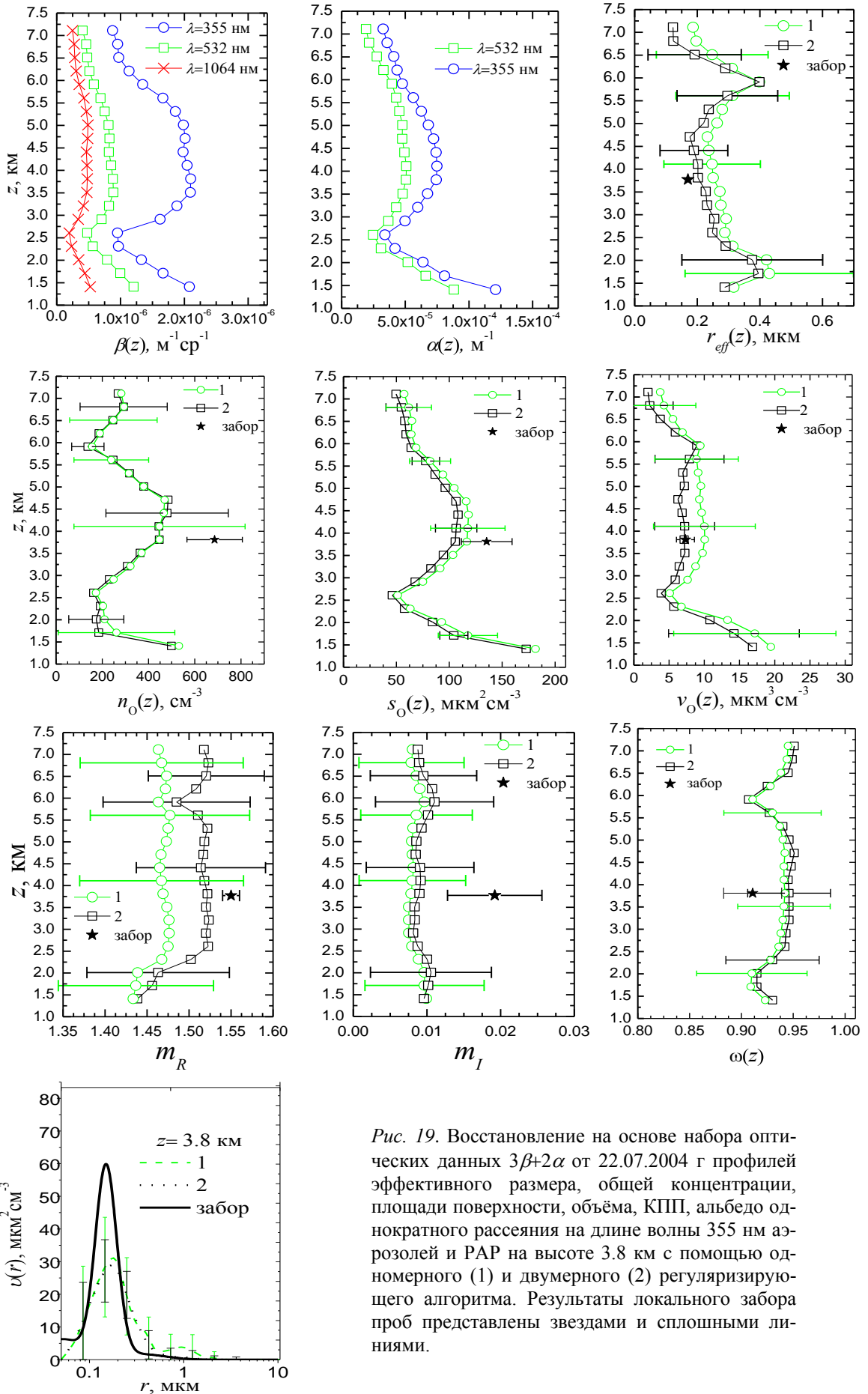


Рис. 19. Восстановление на основе набора оптических данных $3\beta+2\alpha$ от 22.07.2004 г профилей эффективного размера, общей концентрации, площади поверхности, объёма, КПП, альbedo однократного рассеяния на длине волны 355 нм аэрозоль и РАР на высоте 3.8 км с помощью одномерного (1) и двумерного (2) регуляризирующего алгоритма. Результаты локального забора проб представлены звездами и сплошными линиями.

Оба алгоритма демонстрируют близкие оценки для всех параметров аэрозолей, однако ошибки, которые при этом возникают у двумерного алгоритма, имеют меньшую величину, что обуславливается дополнительной стабилизацией решений вследствие применения регуляризации в направлении z .

Результаты локального забора проб изображены звездами на рис. 19 и сравниваются с результатами применения двумерного регуляризирующего алгоритма в таблице 4. Как следует из таблицы 4, общая концентрация, оцениваемая по лидарным данным, примерно на 35 % меньше, чем аналогичный показатель, полученный при заборе с борта самолета. Разница в оценке общей площади поверхности составляет менее 35 %, общего объёма – менее 5 %, эффективного размера – 25 %, реальной части КПП – 0.03, мнимой части КПП – менее 50 % и альбедо однократного рассеяния – менее 5 %.

Таблица 4.

Результаты обработки лидарных данных (I) и локального забора проб (II) при измерениях на высоте 3.8 км от 22.07.2004 г.

	$n_O, \text{см}^{-3}$	$s_O, \text{мкм}^3 \text{см}^{-3}$	$v_O, \text{мкм}^3 \text{см}^{-3}$	$r_{eff}, \text{мкм}$	m_R	m_I	$\omega(355)$
I	447	106	7.15	0.20	1.52	0.009	0.95
II	686	135	7.32	0.16	1.55	0.019	0.91

Эксперимент, проведенный 22 июля 2004 г., также демонстрирует сходимость результатов локального забора проб и обработки данных лидарного зондирования двумерным регуляризирующим алгоритмом.

Чтобы проверить достоверность результатов, получаемых быстрым алгоритмом по линейной оценке микрофизических параметров аэрозолей, он применяется для обработки лидарных данных, измеренных в Вашингтоне 15 августа 2006 г. Для сравнения используются результаты «классического» регуляризирующего алгоритма обработки тех же лидарных данных. Рис. 20 показывает вертикальные профили коэффициентов обратного рассеяния и ослабления на длинах волн 355, 532 и 1064 нм ($3\beta+2\alpha$), по которым восстанавливаются профили общего объёма, эффективного размера и реальной части КПП с помощью указанных алгоритмов. Полученные результаты хорошо согласуются друг с другом, однако обращает внимание тот факт, что профили, восстановленные быстрым алгоритмом, меньше осциллируют, что может означать его большую стабильность по сравнению с «классической» регуляризацией.

В рамках этого эксперимента осуществляется проверка работы быстрого алгоритма при условии, что задан уменьшенный набор оптических данных. На рис. 20 также показано решение, найденное на основе набора $3\beta+1\alpha$, в котором не используется коэффициент ослабления на длине волны 532 нм. Как видно из рис. 20, результаты обработки быстрым алгоритмом набора оптических данных $3\beta+2\alpha$ и $3\beta+1\alpha$ близки, что подтверждает

возможность оценки интегральных параметров аэрозолей с помощью упрощенной лидарной системы, измеряющей три коэффициента обратного рассеяния и 1 коэффициент ослабления.

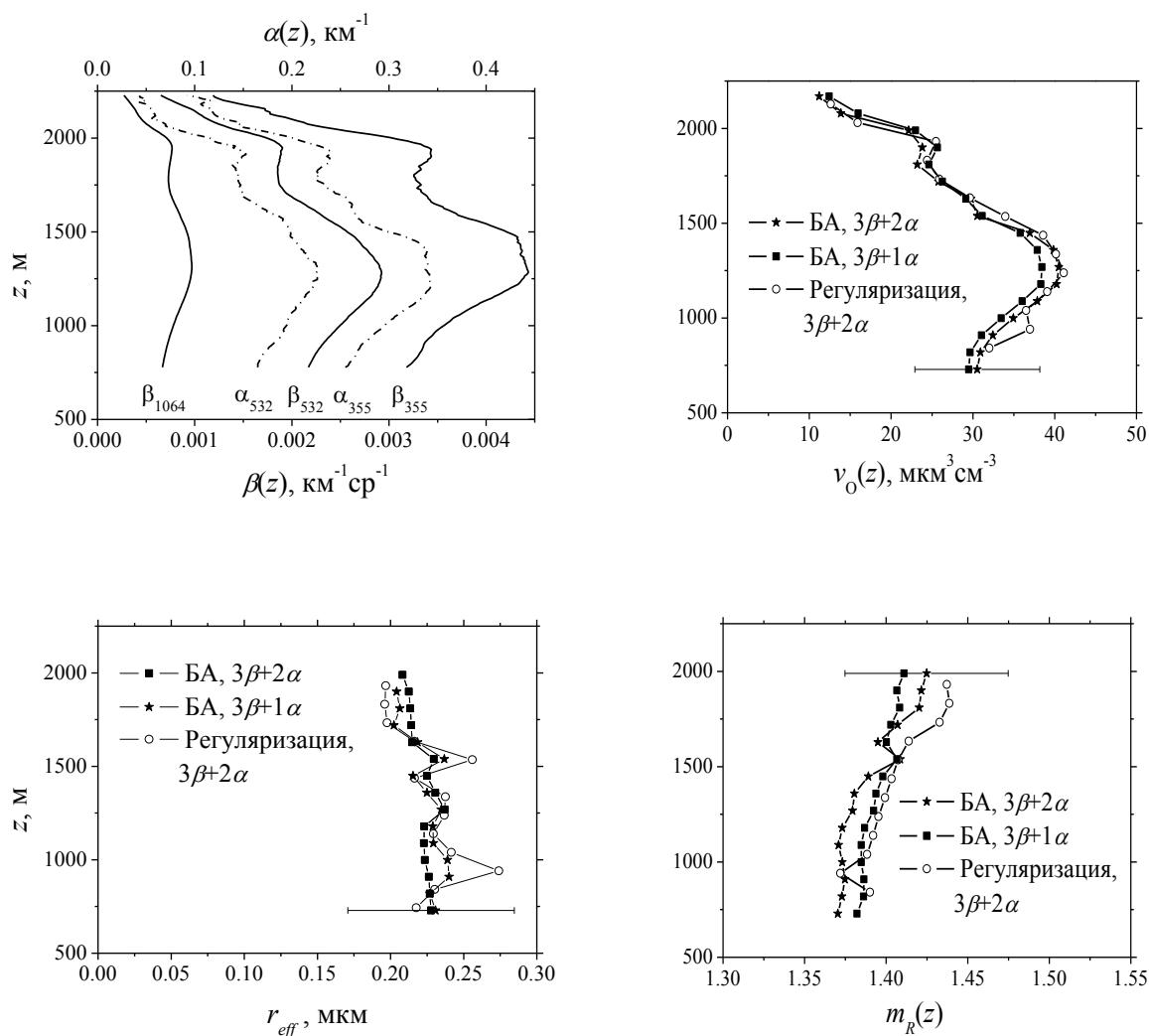


Рис. 20. Восстановление на основе набора оптических данных $3\beta+2\alpha$ и $3\beta+1\alpha$ от 15.08.2006 г. профилей общего объёма, эффективного размера, реальной части КПП аэрозолей с помощью быстрого (БА, заштрихованный маркер) и регуляризующего (незаштрихованный маркер) алгоритмов.

Проведенный сравнительный анализ иллюстрирует надежность быстрого алгоритма оценки интегральных параметров аэрозолей по данным многоволнового лидарного зондирования. Это дает основание для его апробации при обработке большого количества данных и нахождении поля параметров аэрозолей.

20 мая 2010 г. в окрестности Стамбула проводились лидарные измерения, в которых были получены надежные данные только для трех коэффициентов обратного рассеяния и одного коэффициента ослабления на длине волны 355 нм. На рис. 21 демонстрируются результаты применения быстрого алгоритма линейной оценки поля интегральных параметров аэрозолей. Высотно-временное распределение общего объёма аэрозолей повторяет соответствующее распределение коэффициента ослабления. Для наглядности их наиболее интенсивные области ограничены одинаковым

контуром. Такое совпадение двух распределений свидетельствует о том, что в соответствующей области эффективный размер и КПП существенно не меняются. Действительно, на высотах от 0.8 до 2 км эффективный размер оценивается около 0.22 мкм и остается неизменным в течение ночи, оценка реальной части КПП колеблется около 1.4.

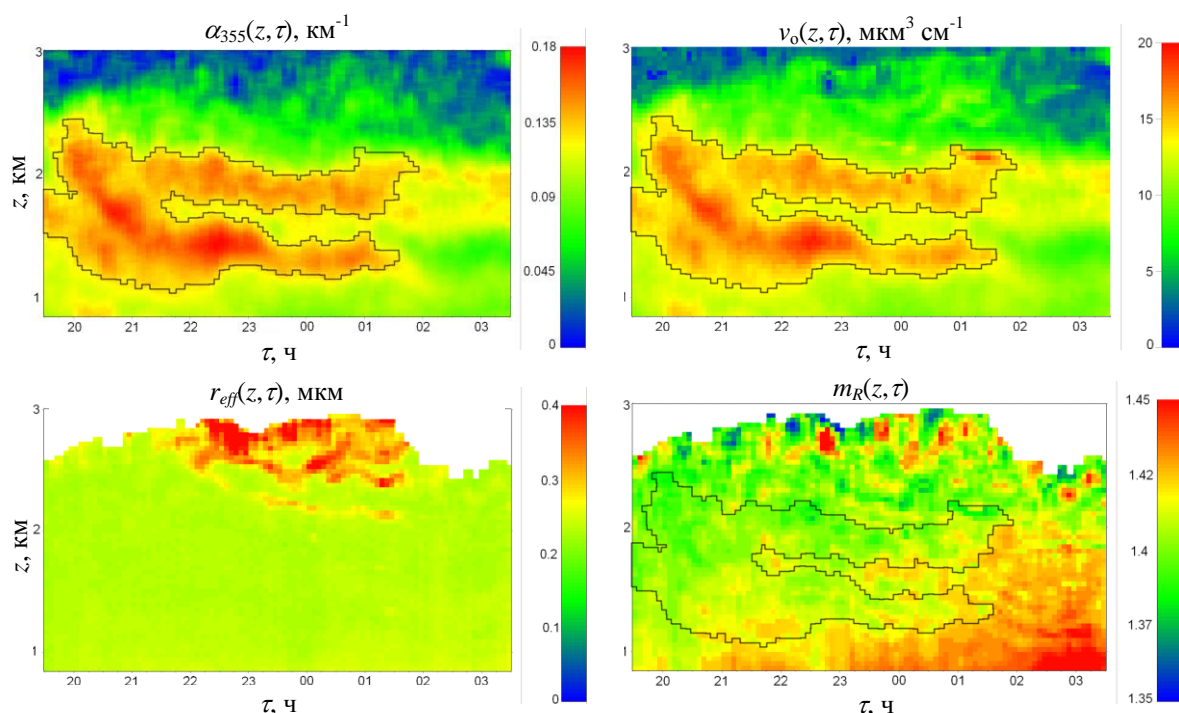


Рис. 21. Восстановление на основе набора оптических данных $3\beta+1\alpha$ от 20.05.2010 г. поля общего объема, эффективного размера, реальной части КПП аэрозолей с помощью быстрого алгоритма.

Успешное применение быстрого алгоритма линейной оценки поля параметров аэрозолей по данным многоволнового лидарного зондирования, полученным в эксперименте, демонстрирует его мощный потенциал и позволяет реализовать требование глобальности мониторинга аэрозолей.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты.
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Построена математическая модель для задач многоволнового лидарного зондирования аэрозолей, состоящих из сфер и случайно ориентированных сфероидов. Она связывает оптические свойства частиц, такие как коэффициент ослабления и обратного рассеяния, поляризованного параллельно и перпендикулярно падающему излучению, с их распределением по размеру интегральным преобразованием, ядром которого служат соответствующие сечения ослабления и обратного рассеяния.

2. В рамках построенной математической модели исследованы прямая и обратная задачи. Адекватность используемой математической модели подтверждена сходимостью результатов решения прямой задачи и лидарных измерений оптических свойств аэрозолей нерегулярной формы. Одномерная математическая модель обобщена на двумерный случай, в котором учитывается распределение аэрозолей как по размеру, так и по дистанции зондирования.

3. Разработан одномерный регуляризирующий алгоритм решения обратной задачи по восстановлению распределения по размерам аэрозолей, представляющих собой смесь частиц сферической и нерегулярной формы, из данных многоволнового лидарного зондирования, включающих, наряду с коэффициентами обратного рассеяния и ослабления, деполяризацию излучения. Одномерная регуляризация обобщена на двумерный случай, при этом двумерный регуляризирующий алгоритм восстановления профиля параметров аэрозолей позволяет дополнительно повысить устойчивость и точность решения в результате его стабилизации в двух направлениях одновременно: по размеру частиц r и дистанции зондирования z .

4. Достигнуто существенное повышение скорости обработки данных лидарного зондирования в результате разработки алгоритма, альтернативного регуляризации, в котором осуществляется линейная оценка непосредственно интегральных параметров аэрозолей путем представления неизвестного распределения аэрозолей по размерам в ряд по ядрам интегрального уравнения. Разработанный быстрый алгоритм обеспечивает нахождение поля микрофизических параметров аэрозолей, описывающего пространственно-временное поведение частиц и их динамику.

5. Исследовано влияние показателя преломления, зависящего от длины волны падающего излучения, на результаты решения задачи многоволнового лидарного зондирования. Разработан подход с учетом соответствующей коррекции решения рассматриваемых задач, основанный на использовании априорной информации о спектральном поведении показателя преломления исследуемых аэрозолей.

6. Исследована возможность упрощения лидарной системы за счет сокращения используемых каналов. Показано, что быстрый алгоритм линейной оценки интегральных параметров аэрозолей может быть применен, если обычный набор измеряемых оптических данных уменьшить до трех коэффициентов обратного рассеяния и одного коэффициента ослабления.

7. С помощью разработанных алгоритмов получены результаты обработки данных лидарного зондирования различных типов аэрозолей, измеренных в ходе экспедиций в Северной Африке, З. Европе, С. Америке. Проведенные эксперименты были связаны с измерениями минеральной пыли, характеризуемыми высокой деполяризацией излучения вследствие нерегулярной формы частиц, продуктов горения биомассы, состоящих из поглощающих аэрозолей, и аэрозолей антропогенного происхождения с преобладающим содержанием малых частиц. Достоверность полученных результатов подтверждается их сходимостью с результатами локального забора проб и результатами, полученными при измерениях солнечным радиометром.

8. На основе разработанных алгоритмов создан программный комплекс по мониторингу параметров аэрозолей в результате обработки данных многоволнового лидарного зондирования. Комплекс находится на вооружении в крупнейших специализированных научно-

исследовательских организациях, таких как ЦФП ИОФАН, ИТИ, НАСА и др.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding/ I.A. Veselovskii, A.V. Kolgotin, V.I. Griaznov et al.// *Appl. Opt.* – 2002. – №41. – P.3685-3699.

2. Angle- and size-dependent characteristics of incoherent Raman and fluorescent scattering by microspheres. 1. General expressions./ V.I. Griaznov, I.A. Veselovskii, A.V. Kolgotin et al.// *Appl. Opt.* – 2002. – №41. – P. 5773-5782.

3. Angle- and size-dependent characteristics of incoherent Raman and fluorescent scattering by microspheres 2.: Numerical simulation./ I. Veselovskii, V. Griaznov, A. Kolgotin et al.// *Appl. Opt.* – 2002. – №41. – P. 5783-5791

4. Inversion of Multiwavelength Raman Lidar Data for Retrieval of Bimodal Aerosol Size Distribution./ I. Veselovskii, A. Kolgotin et al.// *Appl. Opt.* – 2004. – №43. – P. 1180-1195.

5. Information Content of Multiwavelength Lidar Data With Respect to Microphysical Particle Properties Derived From Eigenvalue Analysis/ I. Veselovskii, A. Kolgotin et al.// *Appl. Opt.* – 2005. – №44. – P. 5292-5303.

6. Применение регуляризирующего алгоритма Тихонова для обработки многоволновых лидарных данных в условиях отсутствия информации об ошибке измерения. / В.И. Алехнович, М.Ю. Коренский, С.Ю. Тюменцев, А.В. Колготин. // *Измерительная техника.* – 2005. – № 10. – С. 8–14.

7. Специальный принцип отбора решений при использовании регуляризирующего алгоритма Тихонова для обработки многоволновых лидарных данных. / А.В. Колготин, В.И. Алехнович, М.Ю. Коренский, К.Н. Камша, // *Измерительная техника.* – 2005. – №10. – С. 14–19.

8. A. Kolgotin, D. Müller. Theory of inversion with two-dimensional regularization: profiles of microphysical particle properties derived from multiwavelength lidar measurements.// *Appl. Opt.* – 2008. – №47. – P. 4472-4490.

9. Demonstration of Aerosol Property Profiling by Multiwavelength Lidar under Varying Relative Humidity Conditions./ I. Veselovskii, A. Kolgotin et al.// *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* – 2009. – №26. – P. 1543-1557.

10. Application of randomly oriented spheroids for retrieval of dust particle parameters from multiwavelength lidar measurements./ I. Veselovskii, O. Dubovik, A. Kolgotin et al.// *Journal of Geophysical Research.* – 2010. – №115. – D21203. – doi:10.1029/2010JD014139. – P. 1-16.

11. Vertical profiles of microphysical particle properties derived from inversion with two-dimensional regularization of multiwavelength Raman lidar data: experiment./ D. Müller, A. Kolgotin et al.// *Appl. Opt.* – 2011. – №50. – P. 2069-2079.

12. Optical-microphysical properties of Saharan dust aerosols and composition relationship using a multi-wavelength Raman lidar, in situ sensors and

modelling: a case study analysis./ A. Papayannis, R. E. Mamouri, V. Amiridis, E. Remoundaki, G. Tsaknakis, P. Kokkalis, I. Veselovskii, A. Kolgotin et al.// *Atmos. Chem. Phys.* – 2012. – №11. – P. 25473–25516.

13. Raman lidar observations of a Saharan dust outbreak event: Characterization of the dust optical properties and determination of particle size and microphysical parameters./ Paolo Di Girolamo, Donato Summa, Rohini Bhawar, Tatiana Di Iorio, Marco Cacciani, Igor Veselovskii, Oleg Dubovik, Alexey Kolgotin.// *Atmospheric Environment.* – 2012. – №50. – P. 66-78.

14. Linear estimation of particle bulk parameters from multi-wavelength lidar measurements./ I. Veselovskii, O. Dubovik, A. Kolgotin et al.// *Atmospheric Measurement Techniques.* – 2012. – №5. – P. 1–30.

15. Vertical Profiles of Pure Dust (SAMUM 2006) and Mixed-Smoke-Dust Plumes (SAMUM 2008) Inferred From Inversion of Multiwavelength Raman Lidar Data and Comparison to AERONET Retrievals. / D. Müller, I. Veselovskii, A. Kolgotin et al.// *Appl. Opt.* – 2013....

16. D. Nicolae, A. Nemuc, C. Talianu, J. Vasilescu, L. Belegante, D. Müller, A. Kolgotin “Characterization of fresh and aged biomass burning events using Multi-wavelength Raman Lidar and mass spectrometry”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 118, 1–10, doi:10.1002/jgrd.50324, 2013.

17. P. Kokkalis, A. Papayannis, V. Amiridis, R. E. Mamouri, I. Veselovskii, A. Kolgotin, G. Tsaknakis, N. I. Kristiansen, A. Stohl, and L. Mona “Optical, microphysical, mass and geometrical properties of aged volcanic particles observed over Athens, Greece, during the Eyjafjallajökull eruption in 21-24 April 2010 through synergy of Raman lidar and sunphotometer measurements”, *Atmos. Chem. Phys.*, accepted Jul 2013.

18. I. Veselovskii, D.N. Whiteman, M. Korenskiy, A. Kolgotin, O. Dubovik, and D. Perez-Ramirez “Retrieval of height-temporal distributions of particle parameters from multiwavelength lidar measurements using linear estimation technique and comparison results with AERONET”, accepted Sep 2013.

