

Восстановление оптических и микрофизических характеристик поствулканического стратосферного аэрозоля из результатов трехчастотного лидарного зондирования

С.А. Лысенко, М.М. Кугейко*

Белорусский государственный университет
220030, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 4, Беларусь

Поступила в редакцию 2.11.2010 г.

Разработана методика восстановления высотных профилей оптических и микрофизических параметров (МФП) поствулканического стратосферного аэрозоля (СА) из результатов зондирования атмосферы на длинах волн 355, 532 и 1064 нм. Методика использует установленные на основе статистической оптико-микрофизической модели СА устойчивые множественные регрессии между оптическими характеристиками СА для восстановления профилей коэффициента аэрозольного обратного рассеяния (КАОР) на указанных длинах волн. Обратная задача решается с использованием полиномиальных множественных регрессий между интегральными МФП аэрозоля и спектральными значениями КАОР. Достоверность полученных регрессий подтверждена их соответствием независимым экспериментальным данным. Приведены результаты численных экспериментов по восстановлению профилей КАОР и МФП аэрозоля, соответствующих различным состояниям поствулканической стратосферы.

Ключевые слова: стратосферный аэрозоль, оптические и микрофизические характеристики, лидарное зондирование, множественные регрессии; stratospheric aerosol, optical and microphysical characteristics, lidar sounding, multiple regression.

Введение

Стратосферный аэрозоль (СА) оказывает значимое влияние на ряд процессов, определяющих свойства облачности, химический состав и радиационный баланс атмосферы [1–3]. Влияние СА существенно возрастает в период крупных вулканических извержений, обуславливая также условия видимости в атмосфере и ее общую циркуляцию. Количественные характеристики аэрозольного воздействия определяются большим числом микрофизических параметров (МФП) аэрозоля: полная концентрация аэрозоля, функция распределения по размерам (ФРР) частиц аэрозоля, их форма, структура и спектр комплексного показателя преломления (КПП) вещества частиц.

Создание региональных и глобальной лидарных сетей мониторинга оптических и микрофизических свойств атмосферного аэрозоля составляет важную часть международных экологических программ [4–7]. Данные, получаемые в этих сетях, позволяют качественно исследовать динамику поствулканических изменений аэрозольной атмосферы, локальные процессы, протекающие в дисперсной смеси, и глобальный перенос аэрозоля [8, 9].

Количественная интерпретация данных лидарного зондирования ограничена методическими аспектами по восстановлению профилей оптико-локационных характеристик (ОЛХ) аэрозоля (коэффициенты аэрозольного ослабления и обратного рассеяния), а также некорректностью обратной задачи по определению его МФП.

Интерпретация данных лидара основывается на обращении уравнений лазерного зондирования, связывающего мощность принимаемого с расстояния z сигнала обратного рассеяния $P(z, \lambda)$ с параметрами среды [10, 11]:

$$P(z, \lambda) = G(z)A(\lambda)z^{-2}[\beta_a(z, \lambda) + \beta_m(z, \lambda)] \times \exp\left\{-2 \int_0^z [\varepsilon_a(x, \lambda) + \varepsilon_m(x, \lambda)] dx\right\}, \quad (1)$$

где $\beta_a(z, \lambda)$ и $\beta_m(z, \lambda)$ – коэффициенты обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния; $\varepsilon_a(z, \lambda)$ и $\varepsilon_m(z, \lambda)$ – коэффициенты аэрозольного и молекулярного ослабления; $G(z)$ – геометрический фактор лидара; $A(\lambda)$ – приборная константа. Профили $\varepsilon_m(z, \lambda)$ и $\beta_m(z, \lambda)$ могут быть рассчитаны по измеряемому с помощью зондов либо модельным высотным профилям температуры и давления.

Поскольку уравнение (1) содержит два неизвестных параметра – $\beta_a(z, \lambda)$ и $\varepsilon_a(z, \lambda)$, то боль-

* Сергей Александрович Лысенко; Михаил Михайлович Кугейко (Kugeiko@bsu.by).

шинство известных методов его решения [11–13] требуют знания так называемого лидарного отношения $S_a = \varepsilon_a / \beta_a$. Лидарное отношение, как правило, полагается постоянным по высоте и оценивается из дополнительных измерений или модельных расчетов. Очевидно, что для фонового состояния стратосферы аэрозольное ослабление, ввиду его малой величины, слабо проявляет себя в измеряемых сигналах (1). В этом случае ошибки восстановления профиля $\beta_a(z, \lambda)$ определяются лишь точностью задания опорного значения $\beta_a(z_k, \lambda)$ на некотором участке трассы зондирования (как правило, используются участки с чисто молекулярным рассеянием [10]). Значимость априорной оценки S_a существенно возрастает для условий поствулканической стратосферы, концентрация пылевых частиц в которой может достигать приземного уровня.

В работах [14, 15] путем вариаций микрофизических параметров модели аэрозоля установлены статистические связи между ОЛХ аэрозоля на длинах волн 355, 532 и 1064 нм, позволяющие устранить произвол в выборе значений $S_a(\lambda)$. На их основе разработаны алгоритмы оценки высотных вариаций $S_a(\lambda)$, повышающие точность восстановления $\beta_a(z, \lambda)$ на длинах волн 355 и 532 нм по сравнению с известными алгоритмами, использующими предположение о постоянстве $S_a(\lambda)$ на трассе зондирования. Следует отметить, что поскольку статистические закономерности в [14] справедливы лишь в пределах некоторых типов аэрозоля, то для их применения в алгоритме восстановления $\beta_a(z, \lambda)$ требуется выделение аэрозольных слоев с различными рассеивающими свойствами. Полученные же в [15] регрессионные соотношения справедливы для широкого класса аэрозолей, что подтверждено там же их апробацией на массиве расчетно-экспериментальных данных AERONET по различным регионам.

Очевидно, что аналогичные регрессии могут использоваться и для интерпретации данных лидарного зондирования стратосферного аэрозоля. При этом регрессии должны учитывать специфику микроструктуры аэрозоля и ее изменчивость.

Получаемые с помощью лидарной аппаратуры спектрально-высотные профили коэффициента аэрозольного обратного рассеяния (КАОР) $\beta_a(z, \lambda)$ используются для восстановления высотного распределения МФП аэрозоля в стратосфере. Как правило, задача о восстановлении МФП, и в первую очередь ФРП частиц аэрозоля $f(r)$ (r – радиус частицы), сводится к обращению известных интегральных уравнений [16], что является некорректной задачей. Некорректность проявляется в плохой обусловленности системы, т.е. в чрезвычайно сильной зависимости решения от погрешностей оптических измерений. Для устойчивого решения необходимо каким-либо образом доопределить задачу. Это можно сделать на основе априорной информации об аналитическом виде ФРП и КПП частиц аэрозоля [16–18]. Определение искомых параметров ФРП сводится к решению задачи минимизации разницы между измеренными и рассчитанными на основе априорной информации оптическими характери-

ками. Следует отметить, что модельные ФРП, как правило, нелинейно зависят от искомых параметров и вследствие этого минимизируемый функционал может иметь в некоторой ограниченной области решений не один экстремум, что приводит к неоднозначности решения.

Количество требуемой априорной информации существенно уменьшается при использовании регуляризирующих алгоритмов [19, 20]. Однако данные алгоритмы требуют подбора коэффициента регуляризации, от которого существенно зависит точность восстановления искомых МФП. Кроме того, методы регуляризации быстро теряют свою устойчивость с увеличением погрешностей измерения оптических характеристик аэрозоля.

Поскольку на практике зондирование атмосферы осуществляется на 2–3 длинах волн из видимой и ближней ИК-областей спектра, то объема информации об оптических характеристиках поствулканического СА (с полимодальной ФРП и различающимися КПП вещества частиц сернокислотной и пылевой фракций) явно не достаточно для использования строгих математических методов решения некорректных обратных задач. В связи с этим часто используются статистические методы [21–24], основанные на предположении, что искомые МФП могут быть найдены с помощью некоторого простого аналитического преобразования (линейного, логарифмического, полиномиального и т.д.) измеряемых ОЛХ. Как правило, переход от измеряемого КАОР к какому-либо МФП осуществляется на основе известного значения коэффициента связи, установленного на основе многочисленных микрофизических измерений [21, 22] или модельных представлений об исследуемой среде [23]. Очевидно, что так же, как и лидарное отношение, коэффициенты связи могут испытывать значительную пространственно-временную изменчивость для условий поствулканической стратосферы [21]. Кроме того, полученные в [21–24] результаты относятся к сернокислотному аэрозолю и не учитывают различие КПП частиц сернокислотной и пылевой фракций СА.

В работе [25] представлено описание программного пакета, предназначенного для решения задач планирования различных аэрозольных оптических измерений и оценки потенциальной точности восстановления микрофизических параметров аэрозолей с учетом особенностей аппаратуры и влияния на точность интерпретации оптических измерений имеющейся априорной информации. В основу программного пакета положен регрессионный подход к решению обратных задач. Задавая конкретные измерения, включая их точность, пользователь получает коэффициенты регрессий между оптическими и микрофизическими характеристиками аэрозоля и оценки точности восстановления микрофизических параметров из оптических измерений. Программный пакет использует базы данных по оптическим и микрофизическим характеристикам различных типов аэрозолей, полученных расчетным путем на основе экспериментальных сведений о возможных вариациях их микрофизических параметров. Ниже рассматривается статистическая оптико-микрофизическая

модель СА, используемая для получения соответствующей базы данных. Рассматривается методика восстановления оптических и микрофизических характеристик поствулканического СА, основанная на установленных полиномиальных множественных регрессиях между оптическими и микрофизическими характеристиками аэрозоля.

Статистическая оптико-микрофизическая модель СА

Теоретический расчет ОЛХ аэрозоля предполагает знание концентрации частиц, их формы, ФРП и спектральных значений КПП вещества, образующего частицы. Большинство исследователей, проводивших измерения ФРП СА в период после извержений вулканов, представляют ее в формате двухмодального логнормального распределения

$$f(r) = \sum_{i=1}^2 \frac{N_i}{r \ln \sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\ln^2(r/r_{gi})}{2 \ln \sigma_i}\right), \quad (2)$$

где N_i , r_{gi} , σ_i – полная концентрация частиц i -й фракции, мкм^3 , их среднегеометрический радиус, мкм , и его среднеквадратическое отклонение. Первая фракция – сернокислотный жидкий аэрозоль, образующийся в результате химических и фотохимических реакций с участием H_2SO_4 , H_2O и O_2 , вторая – вулканическая пыль. Выбранные на основе анализа многочисленных экспериментальных данных из [2, 3, 26, 27] параметры распределения (2) поствулканического аэрозоля стратосферного слоя ($z = 15\text{--}30$ км) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Диапазоны вариаций параметров двухмодального логнормального распределения частиц СА по размерам (2)

r_{g1} , мкм	σ_1	r_{g2} , мкм	σ_2	N_1/N_2
0,05–0,2	1,3–2,0	0,25–1,0	1,1–2,0	2,0–50,0

При моделировании КПП сернокислотного аэрозоля использовались данные [28] о его зависимости от концентрации раствора H_2SO_4 , которая определяется величиной относительной влажности воздуха и может изменяться в пределах 55–85% [3]. Статистическое моделирование КПП вулканической пыли, с учетом его корреляций на разных длинах волн, осуществлялось на основе методики синтеза КПП сложных веществ из простых составляющих [3]:

$$m(\lambda) = \sum_{i=1}^N p_i m_i(\lambda) / \sum_{i=1}^N p_i, \quad (3)$$

где $m(\lambda)$ – синтезированный КПП; $m_i(\lambda)$ – КПП отдельных компонентов; p_i – их вес; N – число компонентов. Компоненты имеют смысл «готовых» данных по КПП пыли из разных источников [3, 29–31]. Вариации $m(\lambda)$ осуществлялись путем выбора случайных значений $0 \leq p_i \leq 1$.

Наиболее сильно меняется полная концентрация аэрозольных частиц N_t , соответствующие вариации которой могут достигать несколько поряд-

ков. Исходя из этого, будем варьировать не саму концентрацию, а ее десятичный логарифм в диапазоне $\log(0,1) - \log(50,0)$.

Расчеты ОЛХ сернокислотной фракции аэрозоля осуществляются по известным формулам теории Ми [32]. Пылевые частицы состоят в значительной степени из несферических частиц, поэтому для расчета их ОЛХ необходимо использовать расчетные методы, приближенно учитывающие форму частиц. Нами для пылевых частиц выбрана модель хаотически ориентированных сфероидов, достаточно хорошо аппроксимирующих частицы различных форм.

Наиболее эффективным методом расчета рассеивающих свойств ансамблей хаотически ориентированных аксиально-симметричных частиц (сфероиды, цилиндры и т.д.) является метод Т-матриц [33]. Однако несмотря на его быстрдействие по сравнению с другими методами, основанными на строгом решении уравнений Максвелла, его непосредственное использование для расчета большой выборки ОЛХ пылевых частиц является весьма трудоемким с точки зрения затрат машинного времени даже для современных ЭВМ. Поэтому нами использовался упрощенный подход к расчету ОЛХ сфероидов, представленный в работе [34]. Суть его заключается во введении в обычные интегральные уравнения [16] для расчета ОЛХ полидисперсных сферических частиц поправочных функций, полученных путем аппроксимации рассчитанных в [33] по методу Т-матриц зависимостей ОЛХ от параметра Ми для полидисперсных распределений с разными параметрами полуширины. Исходные данные [33] соответствуют смеси сплюснутых и вытянутых частиц с параметром формы от 1,2 до 2,2. Среднеквадратическая относительная погрешность аппроксимации составляет 1,1 и 1,4% для ϵ_a и β_a соответственно [34].

Выборка оптико-микрофизических характеристик СА получена путем независимых вариаций в широких пределах концентрации раствора H_2SO_4 , веса p_i в (3) и параметров ФРП (2) (N_1/N_2 , N_t , r_{g1} , r_{g2} , σ_1 , σ_2). По известным правилам моделирования равномерно распределенных случайных величин выбирался набор параметров, для которого рассчитывались ОЛХ аэрозоля на длинах волн $\lambda_1 = 355$, $\lambda_2 = 532$ и $\lambda_3 = 1064$ нм, соответствующих гармоникам Nd:YAG-лазера. Объем выборки МФП аэрозоля – 10^3 реализаций.

Восстановление профилей коэффициентов обратного рассеяния

Как было отмечено выше, для решения системы уравнений (1), соответствующих длинам волн лазерного зондирования λ_i ($i = 1, 2, 3$), необходимо задать функциональную связь

$$\epsilon_a(\lambda_i) = F_i[\beta_a(\lambda_1), \beta_a(\lambda_2), \beta_a(\lambda_3)].$$

Вид функции F , из-за ее сложной зависимости от микроструктуры и дисперсного состава рассеивающих частиц, неоднозначен. Однако ввиду линейной зависимости $\epsilon_a(\lambda_i)$ и $\beta_a(\lambda_i)$ от полной концентрации частиц аэрозоля увеличение концентрации в k раз

должно приводить к такому же увеличению одновременно $\varepsilon_a(\lambda_i)$ и $\beta_a(\lambda_i)$. Отсюда следует, что сумма степеней $\beta_a(\lambda_1)$, $\beta_a(\lambda_2)$ и $\beta_a(\lambda_3)$ в разложении F_i в ряд должна быть равна 1. Иными словами, функции F_i должны иметь вид суммы членов $\beta_a(\lambda_j) \times [\beta_a(\lambda_k)/\beta_a(\lambda_p)]^n$ с некоторыми коэффициентами, где $j \neq k \neq p$. Таким образом, аппроксимацию статистической связи между ОЛХ СА на длинах волн лазерного зондирования можно представить в виде суммы трех однородных полиномов степени 1:

$$\begin{aligned} \varepsilon_a(\lambda_i) = & \beta_a(\lambda_1) \sum_{n=-N}^N c_{i,N+n+1} \left(\frac{\beta_a(\lambda_2)}{\beta_a(\lambda_3)} \right)^n + \\ & + \beta_a(\lambda_2) \sum_{n=-N}^N c_{i,3N+n+2} \left(\frac{\beta_a(\lambda_1)}{\beta_a(\lambda_3)} \right)^n + \\ & + \beta_a(\lambda_3) \sum_{n=-N}^N c_{i,5N+n+3} \left(\frac{\beta_a(\lambda_1)}{\beta_a(\lambda_2)} \right)^n. \end{aligned} \quad (4)$$

В соответствии с теорией метода наименьших квадратов вектор коэффициентов $\mathbf{c}_i = (c_{i,m})$ ($m = 1, \dots, 6N + 3$) получается из решения системы линейных уравнений

$$\mathbf{c} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (5)$$

где \mathbf{A} – матрица размером $S \times (6N + 3)$ с элементами

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= (a_{sm}), \\ a_{sm} &= \\ &= \begin{cases} \beta_a^{(s)}(\lambda_1) [\beta_a^{(s)}(\lambda_2) / \beta_a^{(s)}(\lambda_3)]^{m-N-1}, & 1 \leq m \leq 2N+1, \\ \beta_a^{(s)}(\lambda_2) [\beta_a^{(s)}(\lambda_1) / \beta_a^{(s)}(\lambda_3)]^{m-3N-2}, & 2N+2 \leq m \leq 4N+2, \\ \beta_a^{(s)}(\lambda_3) [\beta_a^{(s)}(\lambda_1) / \beta_a^{(s)}(\lambda_2)]^{m-5N-3}, & 4N+3 \leq m \leq 6N+3; \end{cases} \end{aligned}$$

$S = 10^3$ – размер выборки ОЛХ аэрозоля, полученной на основе приведенной выше статистической модели; $s = 1, \dots, S$; \mathbf{W} – диагональная матрица весов размером $(6N + 3) \times (6N + 3)$, которая, ввиду однородности данных, принята равной единичной матрице; $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_a^{(s)}(\lambda_i))$, $i = 1, 2, 3$.

Степень полиномов N в (4) подбиралась путем расчета среднеквадратической погрешности аппроксимации модельной выборки ОЛХ аэрозоля. В результате получено, что при $N \geq 3$ погрешность аппроксимации практически не изменяется. Значения коэффициентов $c_{i,m}$, соответствующие $N = 3$, приведены в табл. 2.

Полиномиальные регрессии (4) использовались в численных экспериментах для восстановления $\varepsilon_a(\lambda_i)$ из значений $\beta_a(\lambda_i)$ ($i = 1, 2, 3$), соответствующих модельной выборке ОЛХ аэрозоля. Для каждой реализации $\beta_a^{(s)}(\lambda_i)$ по формуле (4) (с наложением на значения $\beta_a^{(s)}(\lambda_i)$ случайных погрешностей в пределах 15%) рассчитывались $\varepsilon_a(\lambda_i)$, которые сравнивались с их «точными» (модельными) значениями $\varepsilon_a^{(s)}(\lambda_i)$. Результаты восстановления $\varepsilon_a(\lambda_i)$ (рис. 1) позволяют говорить о наличии устойчивой статистической связи между ОЛХ.

Таблица 2

Коэффициенты $c_{i,m}$ полиномиальных регрессий (4)

$i \backslash m$	1	2	3
1	15,4070	10,4550	-4,3348
2	-2,4849	-7,2351	1,0563
3	-3,2664	-2,5477	2,6402
4	-0,6474	1,0563	1,8428
5	0,9695	1,0442	0,8290
6	1,0672	0,1580	0,1925
7	-0,5328	-0,2267	-0,0615
8	2,2640	1,7767	0,6250
9	-19,5200	-13,8410	-2,8669
10	8,2820	6,9346	2,8360
11	7,7588	7,3411	3,5154
12	0,9695	1,0442	0,8290
13	1,4804	0,7032	-0,0746
14	-0,1285	-0,0728	-0,0078
15	1,6615	-0,4378	-0,2282
16	5,8467	7,4479	0,7572
17	8,2820	6,9346	2,8360
18	1,9572	-0,5745	3,5022
19	-3,2664	-2,5477	2,6402
20	-0,6683	2,4471	1,5263
21	8,6475	9,8459	0,6960

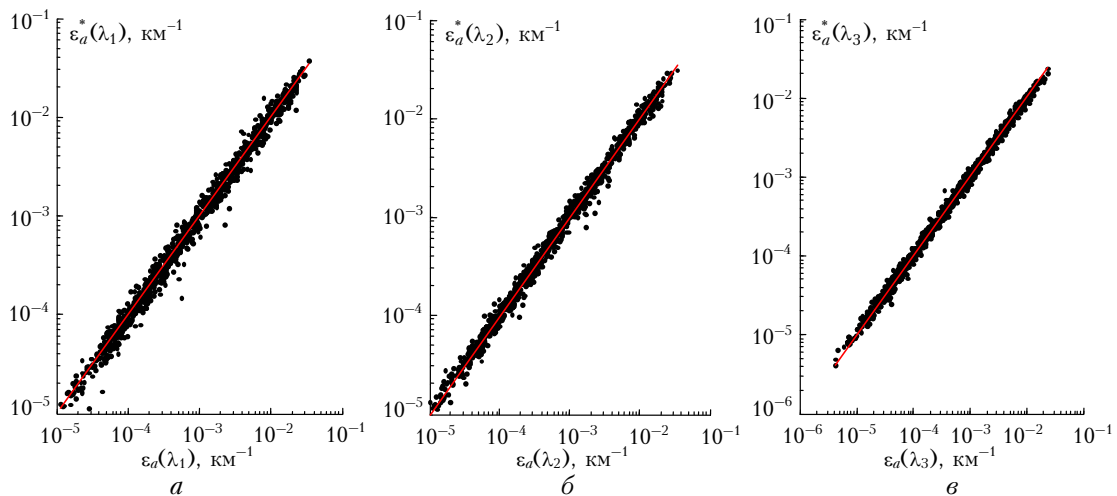


Рис. 1. Результаты восстановления $\varepsilon_a(\lambda_i)$ на длинах волн 355 (а), 532 (б) и 1064 нм (в) для модельной выборки характеристик СА с использованием регрессий (4); $\varepsilon_a^*(\lambda_i)$ и $\varepsilon_a(\lambda_i)$ – соответственно точные и восстановленные значения $\varepsilon_a(\lambda_i)$

Среднеквадратические погрешности восстановления $\varepsilon_a(\lambda_i)$ составляют 15,6; 12,4 и 10,7% для $i = 1, 2$ и 3 соответственно.

Установленные выше регрессии между $\varepsilon_a(\lambda_i)$ и $\beta_a(\lambda_i)$ позволяют решать задачу интерпретации данных трехчастотного лидарного зондирования относительно профилей $\beta_a(z, \lambda_i)$. При задании опорных значений $\beta_a(z_{ref}, \lambda_i)$ на некотором участке трассы зондирования z_{ref} восстановление профилей $\beta_a(z, \lambda_i)$ из сигналов (1), соответствующих длинам волн $\lambda_1 = 355$; $\lambda_2 = 532$ и $\lambda_3 = 1064$ нм, можно осуществлять с использованием следующей итерационной процедуры:

$$\begin{aligned} \beta_a^{(n)}(z, \lambda_i) = & -\beta_m(z, \lambda_i) + \\ & + P(z, \lambda_i) Y^{(n)}(z, \lambda_i) \left/ \left\{ \frac{P(z_{ref}, \lambda_i) Y^{(n)}(z_{ref}, \lambda_i)}{\left[\beta_a^{(n)}(z_{ref}, \lambda_i) + \beta_m(z_{ref}, \lambda_i) \right]} \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \frac{S_a^{(n)}(z, \lambda_i)}{S_a^{(n)}(z_{ref}, \lambda_i)} - 2S_a^{(n)}(z, \lambda_i) \int_{z_{ref}}^z P(x, \lambda_i) Y^{(n)}(x, \lambda_i) dx \right\}; \right. \\ & Y^{(n)}(z, \lambda_i) = S_a^{(n)}(z, \lambda_i) r^2 \times \\ & \times \exp \left\{ -2 \int_{z_0}^z \left(S_a^{(n)}(x, \lambda_i) - 8\pi / 3 \right) \beta_m(x, \lambda_i) dx \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где n – номер итерации. Профили $\beta_a^{(1)}(z, \lambda_i)$, полученные при первоначальном допущении $S_a^{(1)}(z, \lambda_i) = \text{const}$, рассматриваются как первое приближение. Далее в соответствии с уравнениями (4) вычисляются профили лидарных отношений $S_a^{(n)}(z, \lambda_i) = \varepsilon_a^{(n-1)}(z, \lambda_i) / \beta_a^{(n-1)}(z, \lambda_i)$ для следующей итерации, и на основе (6) проводится уточнение профилей $\beta_a^{(n)}(z, \lambda_i)$. Критерием завершения итерационной процедуры является выполнение условия

$$\int_{z_0}^{z_{\max}} \left| \beta_a^{(n)}(x, \lambda_i) - \beta_a^{(n-1)}(x, \lambda_i) \right| dx \left/ \int_{z_0}^{z_{\max}} \beta_a^{(n)}(x, \lambda_i) dx \leq \delta,$$

где δ – заданная малая величина; $i = 1, 2, 3$.

Следует отметить, что данный алгоритм требует задания начальных значений $S_a^{(1)}(\lambda_i)$. Кроме того, при больших погрешностях калибровки и регистрации сигналов получаемые на основе регрессий (4) значения $S_a(z, \lambda_i)$ в конечных участках трассы зондирования могут выходить из их возможных диапазонов (как правило, $20 \leq S_a \leq 100$ ср [21]). Очевидно, что в качестве начальных значений $S_a^{(1)}(z, \lambda_i)$, а также вместо не встречающихся в реальности значений $S_a(z, \lambda_i)$ необходимо использовать физически обоснованные величины, например средние по трассе значения S_a . Для получения последних можно использовать регрессионную связь между значениями $\beta_a(\lambda_i)$ на длинах волн лазерного зондирования, которая, исходя из линейной зависи-

мости КАОР от полной концентрации аэрозольных частиц, нами получена в следующем виде:

$$\beta_a(\lambda_2) = \beta_a(\lambda_1) \sum_{n=3}^3 c_{n+4} \left(\frac{\beta_a(\lambda_1)}{\beta_a(\lambda_3)} \right)^n. \quad (7)$$

Значения коэффициентов c_n в (7), приведенные в табл. 3, получены из решения системы линейных уравнений вида (5), в которой \mathbf{A} – матрица размером $S \times 7$ с элементами $a_{sm} = [\beta_a^{(s)}(\lambda_1)]^{m-3} [\beta_a^{(s)}(\lambda_3)]^{4-m}$, $m = 1, \dots, 7$; $s = 1, \dots, S$. Среднеквадратическая погрешность аппроксимации полиномом (7) модельной выборки $\beta_a(\lambda_i)$, соответствующей достаточно разнообразным условиям в стратосфере, составляет 8,5%.

Таблица 3

Коэффициенты c_i регрессионного уравнения (7)

i	1	2	3	4	5	6	7
c_i	-0,08739	0,36381	0,57564	0,34194	0,090077	0,003859	-0,00406

Учитывая достаточно тесную регрессионную связь между значениями КАОР на длинах волн лидарного зондирования, нахождение средних по трассе зондирования значений $S_i = S_a(\lambda_i)$ может быть основано на минимизации отклонения восстановленных профилей $\beta_a(z, \lambda_i)$ от зависимости (7):

$$F(S_1, S_2, S_3) =$$

$$= \sum_{i=1}^{N_{\max}} \left[\beta_a(z_i, S_2) - \beta_a(z_i, S_1) \sum_{n=3}^3 c_n \left(\frac{\beta_a(z_i, S_1)}{\beta_a(z_i, S_3)} \right)^n \right]^2, \quad (8)$$

с ограничениями $20 \leq S_i \leq 100$ ср ($i = 1, 2, 3$); N_{\max} – число каналов (стробов) на трассе зондирования; $\beta_a(z, S_i)$ – профиль КАОР на длине волны λ_i , восстановленный в соответствии с (6) при $S_a(z, \lambda_i) = S_i$.

Валидация предложенного алгоритма восстановления профиля КАОР выполнена для трех моделей поствулканического СА из [3]. Модели в [3] основаны на эмпирических данных о пространственно-временном тренде интегральных параметров спектра размеров частиц и описывают динамику изменения ОЛХ СА на этапе поствулканической релаксации слоя из возмущенного состояния к равновесному.

Лидарный сигнал для заданных профилей $\beta_a(z, \lambda)$ и $\varepsilon_a(z, \lambda)$ рассчитывался по формуле (1). Ошибки измерения учитывались путем наложения на сигнал случайных флуктуаций в пределах 1% от его уровня, соответствующего максимальной дальности зондирования ($z_{\max} = 29$ км). Затем проводилось восстановление профилей $\beta_a(z, \lambda_i)$ ($i = 1, 2, 3$) в соответствии с описанным выше алгоритмом. Опорное значение $\beta_a(z_{ref}, \lambda_i)$ задавалось в конце трассы ($z_{ref} = z_{\max}$) с погрешностью 50%. Профили молекулярного рассеяния предполагались известными. Минимизация функционала (8) осуществлялась методом Левенберга–Марквардта [35].

Результаты восстановления профилей $\beta_a(z, \lambda_i)$ согласно вышеописанному алгоритму приведены на рис. 2.

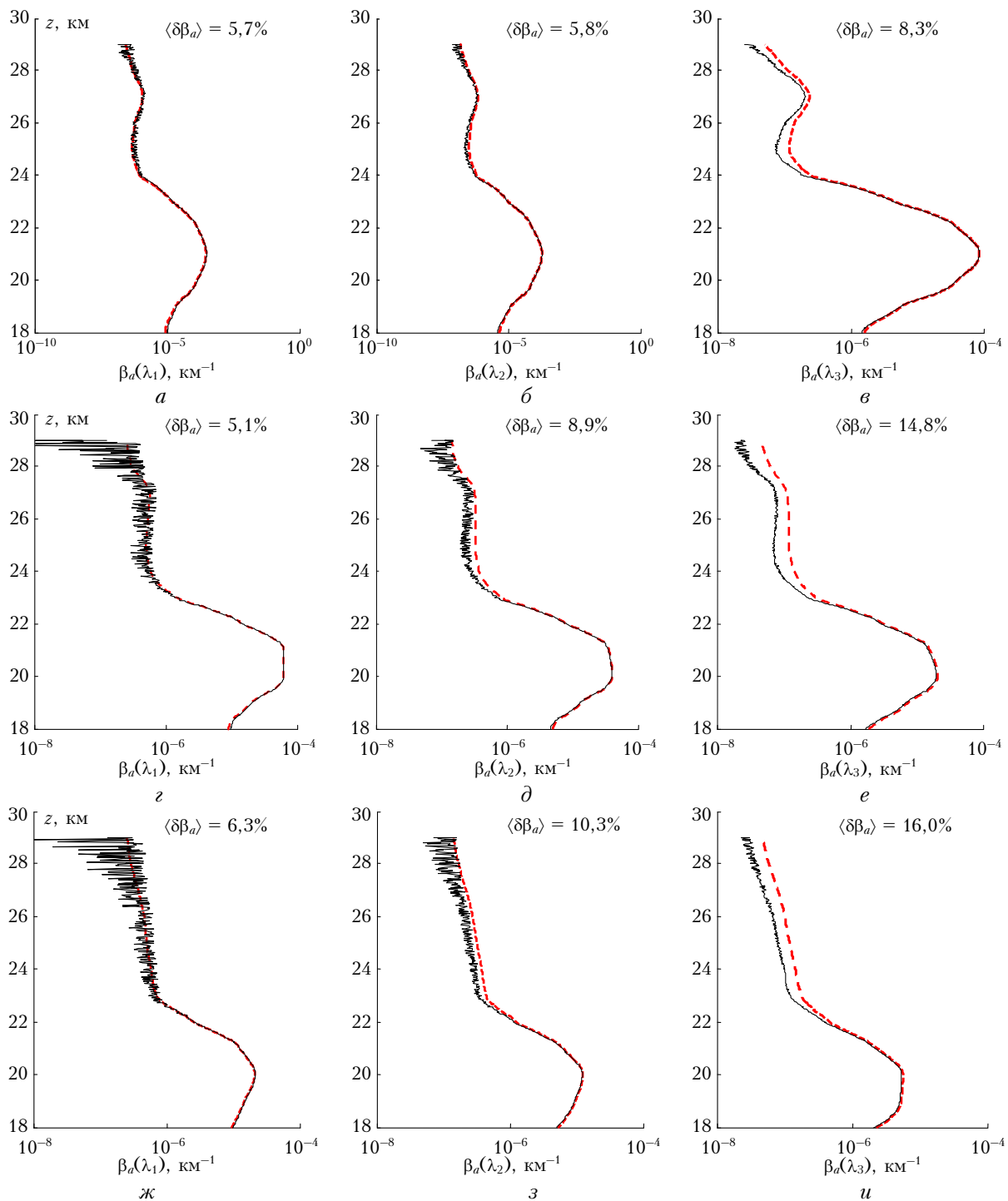


Рис. 2. Результаты восстановления профилей КАОР для трех моделей СА, соответствующих времени релаксации стратосферы $t = 0$ мес (а–в), 3 мес (з–е), 6 мес (ж–и)

Указаны среднеквадратические погрешности восстановления $\beta_a(z, \lambda_i)$ на участке трассы $z = 18 \div 25$ км, соответствующем наибольшему содержанию аэрозольных частиц в стратосфере. Следует отметить, что данные погрешности обусловлены в большей степени ошибками задания опорных значений $\beta_a(z_{zef}, \lambda_i)$ и помехами в сигналах обратного рассеяния. При этом предложенный алгоритм позволяет практически полностью устранить влияние на точ-

ность восстановления $\beta_a(z, \lambda_i)$ непостоянства лидарного отношения по трассе зондирования без использования для него каких-либо априорных оценок. Результаты восстановления профилей $\beta_a(z, \lambda_i)$ для моделей СА, соответствующих различным стадиям развития стратосферного слоя, позволяют утверждать о применимости полученных регрессий (4) и (7) для широкого класса ситуаций в поствулканической стратосфере.

Регрессионные уравнения между оптическими и микрофизическими характеристиками СА

Как было отмечено выше, для решения обратной задачи по интерпретации ОЛХ аэрозоля, получаемых на основе лидарных измерений, большой интерес представляют устойчивые статистические связи между измеряемыми ОЛХ и искомыми МФП аэрозоля. На основе статистической модели СА нами получены также полиномиальные регрессии между МФП СА и КАОР на длинах волн $\lambda_1 = 355$; $\lambda_2 = 532$ и $\lambda_3 = 1064$ нм, позволяющие определять МФПА по результатам лидарного зондирования без привлечения строгих методов решения некорректных обратных задач. Были рассмотрены следующие МФП: интегральные концентрации N_t , N_1 , N_2 , площади поверхности S_t , S_1 , S_2 , объемы V_t , V_1 , V_2 и эффективные размеры $r_t = V_t/S_t$, $r_1 = V_1/S_1$, $r_2 = V_2/S_2$ всех частиц СА, а также частиц его мелко- и крупнодисперсной фракций (индексы t , 1 и 2 соответственно). Значение каждого параметра определяется на основе регрессии следующего вида:

$$\ln x = \sum_{p+t+k \leq 3} c_{ptk} [\ln \beta_a(\lambda_1)]^p [\ln \beta_a(\lambda_2)]^t [\ln \beta_a(\lambda_3)]^k, \quad (9)$$

где x – искомый МФП аэрозоля. Коэффициенты регрессий (9) получены с использованием метода наименьших квадратов применительно к модельной выборке МФП и ОЛХ СА. Значения коэффициентов c_{ptk} , соответствующие рассматриваемым МФП, приведены в табл. 4–7.

Таблица 4

Коэффициенты полиномиальных регрессий (9) для параметров N_1 , N_2 , N_t

c_{ptk}	N_1	N_2	N_t
c_{000}	-14,2790	-1,6862	-13,7020
c_{100}	-7,2168	-3,3836	-7,5680
c_{200}	-0,4143	-0,2965	-0,4401
c_{300}	0,0255	0,0273	0,0315
c_{010}	-0,4537	0,1711	-0,0758
c_{020}	0,1143	-0,2362	0,1340
c_{030}	0,1372	0,1269	0,1398
c_{001}	1,4958	1,3704	1,6023
c_{002}	-0,1164	0,0649	-0,1576
c_{003}	0,0227	-0,0241	0,0102
c_{110}	-0,7775	-0,1678	-0,8302
c_{210}	-0,0400	-0,0579	-0,0386
c_{120}	-0,0614	-0,1442	-0,0752
c_{101}	-0,0544	0,2193	0,0065
c_{201}	-0,0774	0,0460	-0,0902
c_{102}	0,1376	0,0590	0,1543
c_{011}	0,5936	0,1440	0,6435
c_{021}	-0,0645	-0,0165	-0,0581
c_{012}	-0,0992	-0,0252	-0,0929

В (9) используются логарифмы величин x и $\beta_a(\lambda_i)$, так как в этом случае мы имеем дело с числами одного порядка, а получаемые на основе (9) значения x всегда положительны. Кубические полиномы ($i + j + k \leq 3$) позволяют производить более точное по сравнению с методом линейных регрессий [15, 34] восстановление МФП.

Таблица 5

Коэффициенты полиномиальных регрессий (9) для параметров S_1 , S_2 , S_t

c_{ptk}	S_1	S_2	S_t
c_{000}	4,6116	6,4309	6,4309
c_{100}	-0,0871	-1,2108	-1,2108
c_{200}	-0,2119	-0,1008	-0,1008
c_{300}	-0,0171	0,0312	0,0312
c_{010}	-0,2118	0,2430	0,2430
c_{020}	0,2397	-0,0564	-0,0564
c_{030}	0,0884	-0,0204	-0,0204
c_{001}	-0,3707	0,8063	0,8063
c_{002}	-0,2714	-0,0100	-0,0100
c_{003}	0,0860	-0,0743	-0,0743
c_{110}	-0,3235	$2,96 \cdot 10^{-3}$	$2,96 \cdot 10^{-3}$
c_{210}	0,0368	-0,0247	-0,0247
c_{120}	0,0587	-0,0814	-0,0814
c_{101}	0,0238	0,1107	0,1107
c_{201}	-0,1121	0,0218	0,0218
c_{102}	0,1077	-0,0119	-0,0119
c_{011}	0,3956	-0,0554	-0,0554
c_{021}	-0,1238	0,0806	0,0806
c_{012}	-0,1288	0,0756	0,0756

Таблица 6

Коэффициенты полиномиальных регрессий (9) для параметров V_1 , V_2 , V_t

c_{ptk}	V_1	V_2	V_t
c_{000}	11,1260	4,2218	8,8384
c_{100}	1,7464	-2,1391	0,1837
c_{200}	-0,0977	-0,2971	0,1989
c_{300}	-0,2125	0,2478	-0,1134
c_{010}	0,4756	0,6850	-0,1099
c_{020}	0,2576	-0,1268	0,0684
c_{030}	-0,2407	0,1311	-0,0721
c_{001}	-0,3246	1,1858	0,8414
c_{002}	-0,0963	-0,1028	0,1972
c_{003}	0,0728	-0,2150	0,0886
c_{110}	-0,0258	0,1105	-0,1151
c_{210}	0,1992	-0,0770	0,0493
c_{120}	0,1489	-0,0795	0,0395
c_{101}	0,1060	0,3024	-0,3593
c_{201}	0,2043	-0,5544	0,2240
c_{102}	-0,3192	0,5911	-0,2485
c_{011}	-0,0557	-0,0080	-0,0006
c_{021}	0,0901	-0,1176	0,0554
c_{012}	0,0599	0,0697	-0,0232

Следует отметить, что в каждой группе рассматриваемых параметров только два являются независимыми, поэтому в принципе уравнения регрессий для одного из параметров (например, V_1) можно и не приводить, а определять его через два других (V_2 и V_t). Однако поскольку каждый «независимый» параметр определяется с погрешностями, то погрешность пересчета через них «зависимого» параметра может быть больше погрешности его определения напрямую из измеряемых оптических характеристик. Поэтому ниже все рассматриваемые параметры определяются с использованием метода регрессий, что позволяет оценить потенциальную точность их восстановления в условиях информационной неопределенности.

На рис. 3 приведены результаты восстановления МФП СА для 10^3 модельных реализаций его характеристик.

Коэффициенты полиномиальных регрессий (9) для параметров r_1 , r_2 , r_t

C_{ptk}	r_1	r_2	r_t	C_{ptk}	r_1	r_2	r_t
C_{000}	7,9041	1,3731	2,8182	C_{110}	0,2672	0,0202	0,2543
C_{100}	4,1594	0,1768	0,8615	C_{210}	0,0130	0,0574	0,0046
C_{200}	0,0956	-0,0165	-0,0359	C_{120}	0,0621	0,0074	0,0208
C_{300}	$-6,04 \cdot 10^{-3}$	-0,0268	-0,0053	C_{101}	0,1530	0,0082	0,1043
C_{010}	-0,3140	0,0352	-0,1423	C_{201}	-0,0339	0,0186	0,0207
C_{020}	$-4,48 \cdot 10^{-3}$	0,1171	-0,0378	C_{102}	0,0276	-0,0776	-0,0407
C_{030}	$-6,33 \cdot 10^{-4}$	-0,0629	-0,0588	C_{011}	-0,1269	-0,0092	-0,1994
C_{001}	-1,2592	0,1526	0,1932	C_{021}	-0,0409	0,0344	0,0373
C_{002}	-0,1435	-0,0826	$-1,23 \cdot 10^{-4}$	C_{012}	-0,0470	0,0564	0,0486
C_{003}	0,0332	-0,0057	-0,0246				

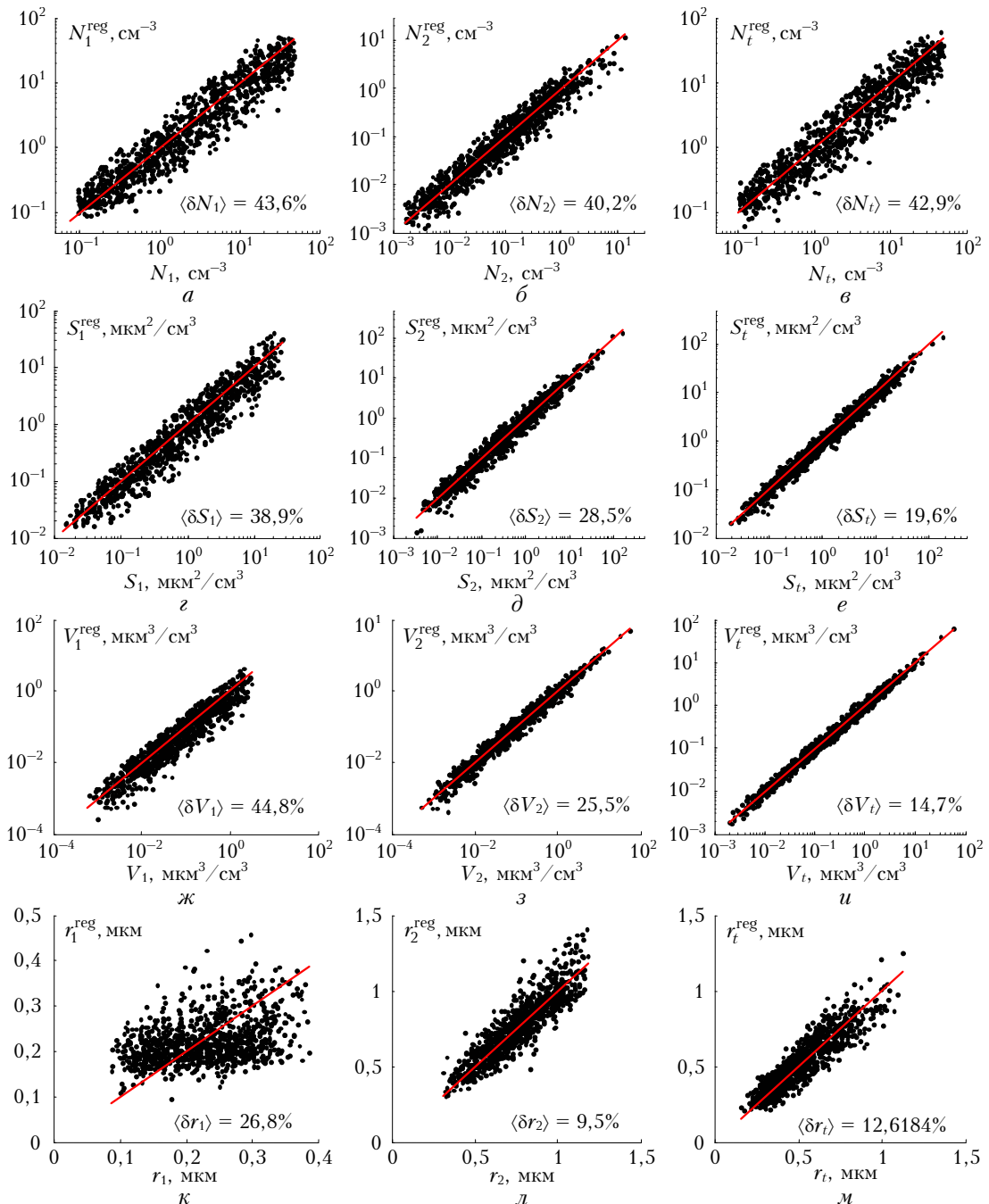


Рис. 3. Сравнение заданных и восстановленных значений МФП для модельной выборки характеристик СА

Восстановление параметров осуществлялось с учетом добавления в расчетные (модельные) значения ОЛХ случайных погрешностей в пределах 15%. На рисунках также указаны среднеквадратические относительные погрешности определения параметров с использованием регрессий (9). Так, помимо высокой информативности данных измерений относительно параметров S_t и V_t видны достаточно тесные корреляции между заданными и восстановленными значениями аналогичных параметров грубодисперсной фракции СА. Большие погрешности восстановления параметров мелкодисперсной фракции СА объясняются слабым влиянием мелких частиц на ОЛХ аэрозоля для видимой и ближней ИК-областей спектра.

Для оценки достоверности получаемых на основе используемой модели СА регрессионных уравнений проведено их сравнение с независимыми данными по статистическим связям между оптическими и микрофизическими характеристиками аэрозоля. Использовалось полученное в [26] на основе статистического анализа данных спутникового зондирования атмосферы уравнение регрессии между интегральной площадью поверхности частиц S аэрозоля и его коэффициентом ослабления на длинах волн $\lambda_1 = 520$ нм и $\lambda_2 = 1020$ нм:

$$S_t = \varepsilon_a(\lambda_2) \left(\frac{1854,97 + 90,137K + 66,97K^2}{1,0 - 0,1745K + 0,00858K^2} \right), \quad (10)$$

где $K = \varepsilon_a(\lambda_1)/\varepsilon_a(\lambda_2)$. На рис. 4 представлены результаты сравнения значений параметра S_t , восстановленных для модельной выборки МФП и ОЛХ СА

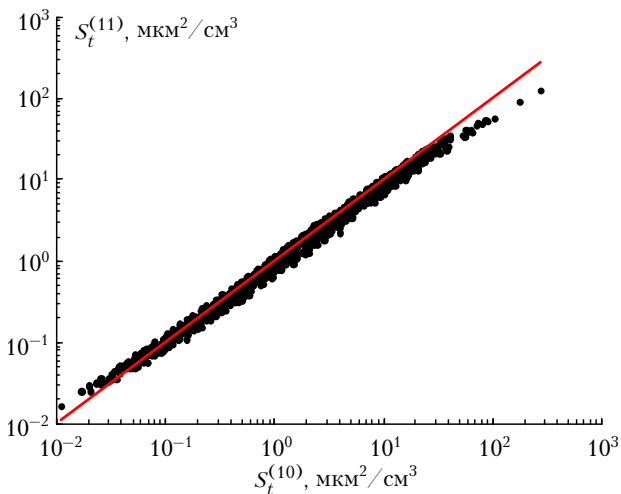


Рис. 4. Сравнение восстановленных значений параметра S_t для модельной выборки характеристик СА с использованием соотношений (10) — ось абсцисс и (11) — ось ординат

с использованием соотношения (10) и полученной нами на основе этой же выборки полиномиальной регрессии:

$$\begin{aligned} \ln S_t = & 6,447 + 1,6632 \cdot 10^{-2} E_{\lambda_1} - 0,1084 E_{\lambda_1}^2 - \\ & - 1,0877 \cdot 10^{-2} E_{\lambda_1}^3 + 0,3763 \cdot 10^{-2} E_{\lambda_2} + 5,6193 \cdot 10^{-2} E_{\lambda_2}^2 - \\ & - 9,6936 \cdot 10^{-3} E_{\lambda_2}^3 - 3,6120 \cdot 10^{-2} E_{\lambda_1} E_{\lambda_2} - \\ & - 1,6285 \cdot 10^{-3} E_{\lambda_1}^2 E_{\lambda_2} + 1,7965 \cdot 10^{-2} E_{\lambda_1} E_{\lambda_2}^2, \quad (11) \end{aligned}$$

где $E_{\lambda_1} = \ln[\varepsilon_a(\lambda_1)]$, $E_{\lambda_2} = \ln[\varepsilon_a(\lambda_2)]$. Видно, что результаты восстановления S_t с использованием данных уравнений хорошо коррелируют (коэффициент корреляции между логарифмами восстановленных значений S_t составляет 0,997).

Приведенный пример показывает, что используемая нами выборка оптических и микрофизических характеристик СА и методы статистического моделирования позволяют получать статистические связи между характеристиками аэрозоля, близкие к полученным по независимым расчетно-экспериментальным данным.

Заключение

На основе модельной выборки МФП СА, учитывающей полимодальную структуру спектра размеров частиц СА и различие показателей преломления сернокислотных и пылевых частиц, рассчитаны $\varepsilon_a(\lambda_i)$ и КАОР на длинах волн 355, 532 и 1064 нм и получены уравнения полиномиальной множественной регрессии между ними. Предложен алгоритм интерпретации данных трехчастотного лидарного зондирования, учитывающий, с использованием полученных регрессий, высотный и спектральный ход лидарного отношения. Проведенные численные эксперименты по восстановлению профилей КАОР, соответствующих различным моделям поствулканического СА, показывают эффективность разработанного алгоритма для широкого класса ситуаций в стратосфере.

Обратная задача по восстановлению МФП аэрозоля решается с использованием установленных полиномиальных множественных регрессий между МФП и КАОР на длинах волн лидарного зондирования. Проведено восстановление МФП, соответствующих модельной выборке характеристик аэрозоля, с использованием полученных регрессий при 15%-й относительной погрешности измерений КАОР. Показано, что КАОР наиболее информативны относительно параметров S_2 , S_t , V_2 , V_t . Как и следует ожидать с точки зрения физики, наименее информативны КАОР относительно концентрации и размера мелких частиц.

Для подтверждения адекватности полученных регрессионных уравнений свойствам реального СА произведено восстановление интегральной площади поверхности аэрозольных частиц S_t с использованием полученной нами на основе модельной выборки ОЛХ и МФП СА полиномиальной регрессии

и установленной на основе экспериментальных данных статистической связи между S_t и коэффициентом аэрозольного ослабления на длинах волн 520 и 1020 нм. Коэффициент корреляции результатов восстановления S_t составил 0,997, что подтверждает достоверность получаемых на основе статистической микрофизической модели СА результатов.

Таким образом, полученные полиномиальные регрессии между ОЛХ и МФП СА справедливы для широкого класса ситуаций в поствулканической стратосфере и позволяют успешно решать задачу интерпретации данных зондирования стратосферы системами на основе Nd:YAG-лазера и определять высотные профили как ОЛХ аэрозоля, так и его МФП с погрешностями, приемлемыми для решения ряда задач экологии, климатологии, химии и физики атмосферы.

1. *McCormick M.P., Thomason L.W., Trepte C.R.* Atmospheric effects of the Mount Pinatubo eruption // *Nature* (Gr. Brit.). 1995. V. 373, N 6513. P. 399–404.
2. *Russell P.B., Livingston J.M., Pueschel R.F., Bauman J.J., Pollack J.B., Brooks S.L., Hamill P., Thomason L.W., Stowe L.L., Deshler T., Dutton E.G., Bergstrom R.W.* Global to Microscale Evolution of the Pinatubo Volcanic Aerosol, Derived from Diverse Measurements and Analyses // *J. Geophys. Res. D*. 1996. V. 101, N 13. P. 18745–18763.
3. *Креков Г.М., Звенигородский С.Г.* Оптическая модель средней атмосферы. Новосибирск: Наука, 1990. 278 с.
4. *Balis D.S., Amiridis V., Zerefos C., Kazantzidis A., Kazadzis S., Bais A.F., Meleti C., Gerasopoulos E., Papayannis A., Matthias V., Dier H., Andreae M.O.* Study of the effect of different type of aerosols on UV-B radiation from measurements during EARLINET // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4, N 2. P. 307–321.
5. *Murayama T., Sugimoto N., Uno I., Kinoshita K., Kazuma A., Hagiwara N., Liu Z., Matsui I., Sakai T., Shibata T., Arai K., Sohn B.J., Won J.G., Yoon S.C., Li T., Zhou J., Hu H., Abo M., Iokibe K., Koga R., Iwasaka Y.* Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in East Asia // *J. Geophys. Res. D*. 2001. V. 106, N 16. P. 18,346–18,359.
6. *Чайковский А.П., Иванов А.П., Балин Ю.С., Ельников А.В., Тулинов Г.Ф., Плюснин И.И., Букин О.А., Чен Б.Б.* Лидарная сеть CIS-LiNet для мониторинга аэрозоля и озона: методология и аппаратура // *Оптика атмосфер. и океана*. 2005. Т. 18, № 12. С. 1066–1072.
7. *Müller G., Artz R., Baltensperger U., Carmichael G., Dlugokencky E., Penkett S., Stahelin J., Webb A., Hon O., Klausen J., Sturgers B., Barrie L., Braathen G., Jalkanen L., Nickovic S.* WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Strategic Plan: 2008 – 2015. GAW Report 172. WMO TD N. 1384. Geneva, Switzerland.
8. *Assessment of Stratospheric Aerosol Properties (ASAP), WCRP-124, WMO/TD-N. 1295, SPARC Report No. 4, 2006.*
9. *Thomason L.W., Pitts M.C., Winker D.M.* CALIPSO observations of stratospheric aerosols: A preliminary assessment // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7, N 20. P. 5283–5290.
10. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
11. *Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М.* Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 184 с.
12. *Fernald F.G.* Analysis of atmospheric lidar observation: some comments // *Appl. Opt.* 1984. V. 23, N 5. P. 652–653.
13. *Klett J.D.* Stable analytic inversion solution for processing lidar returns // *Appl. Opt.* 1981. V. 20, N 2. P. 211–220.
14. *Самойлова С.В., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э.* Исследование вертикального распределения тропосферных аэрозольных слоев по данным многочастотного лидарного зондирования. Часть 1. Методы восстановления оптических параметров // *Оптика атмосфер. и океана*. 2009. Т. 22, № 4. С. 344–357.
15. *Лысенко С.А., Кугейко М.М.* Методика определения концентрации респираторной фракции атмосферного аэрозоля по данным трехчастотного лидарного зондирования // *Оптика атмосфер. и океана*. 2010. Т. 23, № 2. С. 149–155.
16. *Зуев В.Е., Наац И.Э.* Обратные задачи оптики атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 286 с.
17. *Wang P.-H., McCormick M.P., Swissler T.J., Osborn M.T., Fuller W.Y., Yue G.K.* Inference of stratospheric aerosol composition and size distribution from SAGE II satellite measurements // *J. Geophys. Res. D*. 1989. V. 94, N 6. P. 8435–8446.
18. *Jumelet J., Bekki S., David C., Keckhut P.* Statistical estimation of stratospheric particle size distribution by combining optical modeling and lidar scattering measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. N 8, N 17. P. 5435–5448.
19. *Белан Б.Д., Ельников В.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Правдин В.Л.* Результаты исследования оптических и микроструктурных характеристик стратосферного аэрозоля методом обращения лидарных измерений в г. Томске летом 1991 года // *Оптика атмосфер. и океана*. 1992. Т. 5, № 6. С. 593–601.
20. *Bockmann C., Mironova I., Muller D.* Microphysical aerosol parameters from multiwavelength lidar // *J. Opt. Soc. Amer.* 2005. V. 22, N 3. P. 518–528.
21. *Brock C.A., Jonsson H.H., Wilson J.C., Dye J.E., Baumgardner D., Pitts M.C., Osborn M.N., DeCourcier R.J., Woods D.C.* Relationships between optical extinction, backscatter and aerosol surface and volume in the stratosphere following the eruption of Mt. Pinatubo // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20, N 22. P. 2555–2558.
22. *Jager H., Deshler T.* Lidar backscatter to extinction, mass and area conversions for stratospheric aerosols based on midlatitude balloonborne size distribution measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29, N 19, 1929, doi:10.1029/2002GL015609.
23. *Gobbi G.P.* Parametrization of stratospheric aerosol physical properties on the basis of Nd:YAG lidar observations // *Appl. Opt.* 1998. V. 37, N 21. P. 4712–4720.
24. *Wandinger U., Ansmann A., Reichardt J., Deshler T.* Determination of stratospheric aerosol microphysical properties from independent extinction and backscattering measurements with a Raman lidar // *Appl. Opt.* 1995. V. 34, N 36. P. 8315–8329.
25. *Лысенко С.А., Кугейко М.М.* Регрессионный подход к анализу информативности и интерпретации данных аэрозольных оптических измерений // *Ж. прикл. спектроскопии*. 2009. Т. 76, № 6. С. 876–883.

26. Thomason L.W., Poole L.R., Deshler T.R. A global climatology of stratospheric aerosol surface area density as deduced from SAGE II: 1984–1994 // *J. Geophys. Res. D*. 1997. V. 102, N 7. P. 8967–8976.
27. Thomason L.W., Peter T. Assessment of Stratospheric Aerosol Properties (ASAP), SPARC Report N 4, WCRP-124, WMO/TD-N. 1295, URL: <http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/SPARC/index.html>, February, 2006.
28. Palmer K.F., Williams D. Optical constants of sulfuric acid: Application to the clouds of Venus // *Appl. Opt.* 1975. V. 14, N 1. P. 208–219.
29. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.
30. d'Almeida G.A., Koepke P., Shettle E. Atmospheric aerosols: global climatology and radiative characteristics / Ed. A. Deepak Publication, Hampton, USA. 1991. 549 p.
31. Rothman L.S., Rinsland C.P., Goldman A., Massie S.T., Edwards D.P., Flaud J.-M., Perrin A., Camy-Peyret C., Dana V., Mandin J.-Y., Schroeder J., Mccann A., Gamache R.R., Watson R.B., Yoshino K., Chance K.V., Jucks K.W., Brown L.R., Nemtchinov V., Varanasi P. The HITRAN molecular spectroscopic database and hawks (Hitran Atmospheric Workstation): 1996 EDITION // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*. 1998. V. 60, N 5. P. 665–710.
32. Борен К., Хаффман Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 660 с.
33. Mishchenko M.I., Travis L.D., Lacis A.A. Scattering, absorption, and emission of light by small particles. New York: NASA Goddard Institute for space studies, 2004. 445 p.
34. Коршунов В.А. О восстановлении интегральных параметров тропосферного аэрозоля по данным двухволнового лидарного зондирования // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2007. Т. 43, № 5. С. 671–687.
35. Philip E.G., Walter M. Algorithms for the solution of the nonlinear least-squares problem // *SIAM J. Numer. Anal.* 1978. V. 15, N 5. P. 977–992.

S.A. Lysenko, M.M. Kugeiko. The retrieval of post-volcanic stratospheric aerosol optical and microphysical parameters from data of three-wavelength lidar sounding.

A technique for retrieval of altitude distribution of post-volcanic stratospheric aerosol optical and microphysical parameters from data of atmospheric remote sensing at the wavelengths 355, 532 and 1064 nm is developed. The retrieval of aerosol backscattering coefficients is performed using robust multiple regressions between aerosol optical characteristics at the wavelengths mentioned above, established on basis of statistical optical-microphysical model of stratospheric aerosol. The solution of inverse problem is based on polynomial multiple regressions between aerosol integral microphysical parameters and spectral values of aerosol backscattering coefficient. The reliability of the established regressions is confirmed by their conformity with the data of independent experimental data. The results of numerical experiments for determining aerosol backscattering coefficient profiles and microphysical parameters are shown for variety conditions in post volcanic stratosphere.