

20
На правах рукописи

Колготин Алексей Викторович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЕЙ
ПО ДАННЫМ МНОГОВОЛНОВОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2003

Работа выполнена в
Федеральном государственном унитарном предприятии
«Научно-производственное объединение машиностроения»,
Московском государственном техническом университете
имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
доцент В.И. Алехнович

Официальные оппоненты:

доктор физико-
математических наук, проф.
Г.К. Васильев

кандидат технических наук,
О.А. Ивлев

Ведущая организация:

Военный Университет
Радиационной, Химической
и Биологической Защиты

Защита диссертации состоится «16» декабря 2003 г. в 11 час. 00
на заседании диссертационного Совета Д 212.141.15 при Московском
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим вы-
слать по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Учёному секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан « » ноября 2003 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета, д. ф.-м. н., профессор



И. К. Волков

Актуальность темы. Аэрозоли являются одной из основных составляющих атмосферы, влияющих на климат и радиационный бюджет Земли. Воздействие атмосферных аэрозолей на указанные факторы обусловлено двумя причинами. Во-первых аэрозоли рассеивают и поглощают падающее излучение (прямое влияние). Во-вторых аэрозоли приводят к модификации свойств облаков и изменению содержания газовых примесей вследствие химических реакций (косвенное влияние).

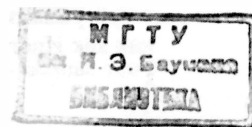
Воздействие аэрозолей на радиационный баланс планеты противоположно воздействию парникового эффекта и может приводить по существующим оценкам к охлаждению на поверхности земли на 1-2 К. Косвенным образом аэрозоли оказывают воздействие на водный цикл планеты путем модификации микрофизических параметров облаков. Последний отчёт Межправительственной Комиссии по Изменению Климата определяет процесс косвенного воздействия аэрозолей на радиационный баланс планеты, как наиболее серьёзный источник погрешностей при моделировании изменений климата. Для уменьшения этой неопределённости необходима достоверная информация о временных и пространственных вариациях параметров аэрозолей.

Наиболее активно развивающимся направлением решения этой проблемы является применение дистанционных методов зондирования. Этот подход, альтернативный локальным измерениям, даёт возможность получать информацию о параметрах аэрозолей и облаков. 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 последнее десятилетие были предприняты многочисленные попытки определения физических параметров аэрозолей, используя данные многоволнового лидарного зондирования. Эта задача разделяется на две независимые: вычисление оптических параметров аэрозолей (коэффициентов ослабления α и обратного рассеяния β) из результатов лидарных измерений, и затем восстановление распределения по размерам f .

Целью настоящего исследования является разработка алгоритма определения параметров атмосферных аэрозолей по данным многоволновых лидарных измерений на нескольких длинах волн, не требующего априорной информации о характере распределения частиц по размерам и их оптических свойствах.

В соответствии с этой целью решаются следующие задачи:

– расчёт коэффициентов обратного рассеяния и ослабления аэрозолей для различных длин волн, показателей преломления и параметров заданного закона распределения частиц по размерам;



- сравнительное исследование точности различных методов восстановления коэффициентов обратного рассеяния и ослабления аэрозолей по данным лидарного зондирования;

- выбор метода решения обратной задачи восстановления параметров аэрозолей по оптическим данным и его обоснование;

- оценка точности восстановления параметров аэрозолей для выбранного алгоритма и реальных погрешностей лидарных измерений.

При проведении научного исследования были реализованы такие методы, как

- математическое моделирование, в результате которого была оценена устойчивость предлагаемого алгоритма к погрешности оптических данных;

- дистанционное измерение оптических коэффициентов атмосферных аэрозолей с помощью многоволнового рамановского лидара;

- локальный забор проб на борту самолёта для контроля точности восстановления параметров аэрозолей дистанционным методом.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в достижении следующих результатов:

- 1) разработан алгоритм восстановления параметров аэрозолей для использования в условиях ограниченного количества оптических данных и значительной погрешности их измерения (до 20 %);

- 2) проведено численное моделирование для определения точности восстановления параметров аэрозолей в диапазоне размеров частиц 0,05 – 5,00 мкм;

- 3) определено оптимальное число длин волн лидара, а также количественное соотношение между коэффициентами обратного рассеяния и ослабления, обеспечивающих максимальную стабильность алгоритма;

- 4) показано, что использование рамановского лидара на основе Nd:YAG лазера с генератором третьей гармоники, измеряющего коэффициенты обратного рассеяния на длинах волн 0,355; 0,532; 1,064 мкм и ослабления на 0,355 и 0,532 мкм, позволяет оценить параметры аэрозолей с точностью, достаточной для климатологических исследований;

- 5) проведено моделирование использования разработанного алгоритма для восстановления различных типов атмосферных аэрозолей, характеризующихся бимодальным распределением частиц по размерам;

- 6) представлена возможность оценки комплексного показателя преломления аэрозолей по данным лидарного зондирования;

- 7) проведено сравнение результатов обработки лидарных данных, выполненной с помощью разработанного алгоритма, и результатов локального забора проб с борта самолёта; продемонстрировано, что параметры аэрозолей восстанавливаются с точностью, установленной при численном моделировании;

- 8) произведено сравнение разработанного программного комплекса, с программами, используемыми в ряде зарубежных научных центров, таких как Институт Тропосферных Исследований (ИТИ), Лейпциг, и Инсти-

тут Математики (ИМ), Потсдам. Показано, что разработанный алгоритм является более стабильным и обеспечивает более высокую точность.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) использование критерия минимума модифицированной невязки в методе регуляризации Тихонова, позволяющего оценить оптимальное значение параметра регуляризации без априорной информации об ошибке измерения оптических данных;

2) усреднение решений с модифицированной невязкой в окрестности минимального значения;

3) выбор оптимального набора оптических данных для восстановления параметров аэрозолей на основе лидарных измерений, характеризующихся значительными погрешностями, в условиях отсутствия априорной информации о комплексном показателе преломления;

4) определение точности алгоритма восстановления параметров аэрозолей для типичных погрешностей данных лидарного зондирования и при неизвестном показателе преломления;

5) сравнение результатов восстановления параметров аэрозолей лидарным методом с результатами локальных измерений с борта самолёта, а также с результатами, полученными при использовании алгоритмов ИТИ и ИМ.

Практическая значимость исследования состоит в разработке программного комплекса, который позволяет автоматизировано проводить все этапы вычислений, начиная от обработки лидарного сигнала и заканчивая восстановлением физических свойств аэрозолей. Разработанный программный комплекс превосходит существующие зарубежные аналоги, характеризуется высокой скоростью обработки данных и удобством в использовании.

Реализация результатов. Разработанный программный комплекс в настоящее время используется в ряде отечественных и зарубежных научных центрах, таких как ЦФП ИОФАН (Россия), ИТИ (Германия), NASA (США).

Апробация работы. Выносимые на защиту результаты опубликованы в ведущих международных научных журналах и представлены на двух конференциях: 20th и 21st International Laser Radar Conference, в 2000 и 2002 г. Ведущими научными организациями как отечественными, так и зарубежными, представлены положительные отзывы, подтверждающие эффективность предлагаемого алгоритма.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, трёх 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 и задачи исследования.

В первой главе «Построение математической модели на основе тео-

при рассеянии Ми» формализуется связь между оптическими и физическими свойствами ансамбля аэрозолей. Показано, что оптические данные аэрозолей в виде коэффициентов обратного рассеяния β и ослабления α связаны с распределением частиц по размерам f интегральным преобразованием. В рамках используемой математической модели исследуется прямая задача: построение пространства оптических свойств частиц в зависимости от их физических параметров

$$\beta(\lambda, m, r_{mean}, s) = N_t \int_0^{\infty} f(r, r_{mean}, s) K_{\pi}(\lambda, m, r) dr$$

$$\alpha(\lambda, m, r_{mean}, s) = N_t \int_0^{\infty} f(r, r_{mean}, s) K_e(\lambda, m, r) dr,$$

где N_t – общая количественная концентрация частиц; λ – длина волны; m – комплексный показатель преломления; $K_{\pi}(\lambda, m, r)$ и $K_e(\lambda, m, r)$ – ядра преобразования, или сечения дифференциального рассеяния и общего ослабления соответственно, определяемые на основе теории рассеяния Ми; $f(r, r_{mean}, s)$ – закон распределения аэрозолей по размеру с матожиданием r_{mean} и дисперсией s , имеющий вид

$$f(r) = \frac{1}{rs\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_{mean})^2}{2s^2}\right) \quad (1)$$

Решения прямой задачи анализировалось для различных длин волн и показателей преломления.

В результате проведённого анализа было установлено следующее

- коэффициент ослабления α слабо зависит от размеров частиц и параметра m ; неточно заданные оптические данные приводят к нарушению взаимно однозначного соответствия между коэффициентом α и заданным распределением $f(r, r_{mean}, s)$;
- коэффициент обратного рассеяния β существенно зависит от задаваемых параметров распределения по размеру и показателя преломления; неточно заданные оптические данные не приводят к нарушению взаимно однозначного соответствия между коэффициентом β и заданным распределением $f(r, r_{mean}, s)$.

На основе полученных результатов сделан вывод о том, что процедура оценки параметров аэрозолей, использующая коэффициенты β , более устойчива к погрешности измерений, в то время как использование коэффициентов α ведёт к ухудшению стабильности по отношению к вариациям m . Выдвинуто предположение, что оптимальные результаты будут достигнуты при комбинации коэффициентов α и β .

Во второй главе «Определение оптических данных аэрозолей на основе многоволнового лидарного зондирования» рассматриваются методы решения основного уравнения лазерной локации, позволяющие получить профиль оптических свойств аэрозолей в виде коэффициентов обратного рассеяния $\beta^a(z)$ и ослабления $\alpha^a(z)$ на всех длинах волн при лидарных из-

мерениях. Рамановский лидар позволяет детектировать как упругий $P_\lambda(z)$, так и неупругий $P_{\lambda_R}(z)$ рассеянный сигнал. Каждый из них удовлетворяет основному уравнению лазерной локации

$$P_\lambda(z) = A_\lambda \frac{\beta_\lambda^a(z) + \beta_\lambda^m(z)}{z^2} \exp[-2 \int_0^z (\alpha_\lambda^m(z') + \alpha_\lambda^a(z')) dz'], \quad (2)$$

$$P_{\lambda_R}(z) = A_{\lambda_R} N_R(z) \frac{\sigma_{\kappa, \lambda_R}}{z^2} \exp[-\int_0^z (\alpha_\lambda^m(z') + \alpha_\lambda^a(z') + \alpha_{\lambda_R}^m(z') + \alpha_{\lambda_R}^a(z')) dz'] \quad (3)$$

Здесь $P_\lambda(z)$, $P_{\lambda_R}(z)$ – мощность рассеянного сигнала с дистанции z на длине волны λ и λ_R соответственно; A_λ и A_{λ_R} – аппаратные константы на соответствующих длинах волн; $\beta_\lambda^a(z)$ и $\beta_\lambda^m(z)$ – коэффициенты обратного рассеяния аэрозольных частиц и молекул воздуха соответственно; $\alpha_\lambda^a(z)$, $\alpha_\lambda^m(z)$, $\alpha_{\lambda_R}^a(z)$ и $\alpha_{\lambda_R}^m(z)$ коэффициенты ослабления аэрозолей и молекул на упругой и рамановской длинах волн; $\sigma_{\kappa, \lambda_R}$ – дифференциальное сечение рамановского рассеяния в обратном направлении, не зависящее от дистанции; $N_R(z)$ – количественная концентрация молекул рамановски активного газа.

На начальном этапе развития методов лидарного зондирования атмосферы для определения коэффициентов $\beta^a(z)$ и $\alpha^a(z)$ использовалось только уравнение (2). Поскольку в этом случае уравнение математически не определено, существующие подходы его решения основывались на предположении о известном лидарном отношении $\frac{\beta_\lambda^a(z)}{\alpha_\lambda^a(z)}$, задаваемом в преде-

лах от 0,01 до 0,07 sr^{-1} , что приводило к значительной неопределённости вычисления коэффициентов $\beta^a(z)$ и $\alpha^a(z)$. Данное обстоятельство не позволяло использовать соответствующие оптические данные для восстановления параметров аэрозолей.

Ситуация радикально изменилась с созданием рамановского лидара. Наряду с упругим сигналом $P_\lambda(z)$, рамановский лидар детектирует сигнал $P_{\lambda_R}(z)$ на длине волны λ_R . В этом случае совместное решение уравнений (2) и (3) позволяет независимое определение коэффициентов $\beta^a(z)$ и $\alpha^a(z)$, при этом точность их расчёта достигает 10-15 %. Данная оценка 10-15 % является пессимистичной, когда имеет место совпадение всех неблагоприятных факторов.

В третьей главе «Восстановление параметров аэрозолей по оптическим данным» формулируется постановка задачи, выбирается метод решения и его обоснование. Для определения точности метода проводится математическое моделирование с учётом реальных погрешностей лидарных данных.

Задача восстановления распределения аэрозолей по размерам формулируется в виде интегрального уравнения Фредгольма 1 рода с неточно заданным ядром

$$\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} K_i(m, \lambda_j, r) f(r) dr = u_i(\lambda_j), \quad i = \overline{\alpha, \beta}; \quad j = \overline{1, N}; \quad (4)$$

где $u_i(\lambda_j)$ – оптические данные. Значение индекса $i = \alpha$ соответствует коэффициентам ослабления, а $i = \beta$ – коэффициентам обратного рассеяния, полученным на длине волны λ_j . $K_i(m, \lambda_j, r)$ – соответствующие ядра интегрального уравнения, рассчитываемые на основе теории рассеяния Ми при некотором показателе преломления m ; $f(r)$ – распределение аэрозолей по размерам r .

Используемые функции удовлетворяют условиям

$$f \in F \subseteq C[R_{\min}, R_{\max}], \quad u \in U \subseteq \ell_2, \quad \int_{\lambda_1}^{\lambda_N} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} [K_i(m, \lambda, r)]^2 dr d\lambda < +\infty,$$

где

$$\begin{aligned} 1,25 \leq \operatorname{Re}(m) \leq 1,80; & \quad 0,00 \leq \operatorname{Im}(m) \leq 0,07; \\ 0,01 \leq R_{\min} \leq 0,30; & \quad 0,05 \leq R_{\max} \leq 5,00; \quad [\text{мкм}] \\ \lambda_1 = 0,355 & \quad \lambda_N = 1,064 \quad [\text{мкм}] \end{aligned} \quad (5)$$

При анализе принимались обозначения наборов оптических данных, представленных в табл. 1. Выбор соответствующих длин волн обусловлен характеристиками лидарных систем, с помощью которых были получены экспериментальные данные.

Таблица 1.

Обозначения наборов оптических данных

Обозначение	Длины волн, мкм	Коэффициент
2α	0,355; 0,532	общее ослабление
3β	0,355; 0,532; 1,064	обратное рассеяние
6β	0,355; 0,400; 0,532; 0,710; 0,800; 1,064	обратное рассеяние

Решение уравнения (4) является обратной задачей, которая относится к классу некорректных. В операторном виде имеет место представление

$$Af = u, \quad (6)$$

где оператор A вполне непрерывен. Для поиска решения привлекаются регуляризирующие принципы. Принцип регуляризации основан на построении одноимённого функционала

$$M[f, u^\delta] = \|u^\delta - Af\|_U^2 + \gamma \Gamma(f), \quad (7)$$

где $\Gamma(f)$ – непрерывный, не отрицательный и ограниченный функционал; γ – неотрицательный параметр регуляризации; символ δ означает, что правая часть u уравнения (6) задана приближённо. Величина δ в общем случае неизвестна.

В соответствии с подходом, предложенным А.Н. Тихоновым, решением задачи (6) является экстремаль функционала (7) при некотором зна-

чении параметра γ . Экстремаль функционала (7) может быть найдена из уравнения Эйлера

$$A^T A f - A^T u^\delta + \gamma H(f) = 0, \quad (8)$$

где $H(f)$ – производная по Фреше функционала $\Gamma(f)$. Следуя Туоми, в качестве преобразования $H(f)$ выступает квадратическая форма суммы квадратов вторых конечно-разностных производных для функции f . Тогда

$$f = (A^T A + \gamma H)^{-1} A^T u^\delta \quad (9)$$

Сходимость и устойчивость решения, определяемого правилом (9), установлены в результате рассмотрения уравнения (8). Уравнение (8) представляет собой неоднородное интегральное уравнение Фредгольма 2 рода, свойства которого хорошо изучены. В частности, равномерная сходимость и устойчивость его решения достигается при условии, что

$$|\gamma| > M (R_{\max} - R_{\min}),$$

где

$$M = \max_{\substack{R_{\min} < r < R_{\max} \\ R_{\min} < \tau < R_{\max}}} |K_i(m, r, \tau)|$$

Здесь $K_i(m, r, \tau)$ – ядро интегрального уравнения (8) вида

$$K_i(m, r, \tau) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_N} K_i(m, r, \lambda) K_i(m, \lambda, \tau) d\lambda$$

Используя приближение Хюльста для ядра $K_i(m, \lambda, r)$ уравнения (4) и систему ограничений (5), получена оценка для параметра регуляризации

$$\gamma > 10^{-20} / 3 \quad (10)$$

Оценка (10) не является конструктивной, поскольку ограничивает параметр регуляризации только снизу и определяет лишь область сходимости решения задачи (6). Правило (9) предполагает знание оптимального значения γ . Обычный подход, разработанный Тихоновым, позволяет оценить это значение методом невязки, при этом должна быть известна ошибка приближения δ для правой части уравнения (6). Однако в рассматриваемой задаче величина δ не может быть определена. В связи с этим, предлагается новый критерий оценки параметра регуляризации на основе минимума модифицированной невязки

$$\mathcal{P}(\gamma) = \|A|f^\gamma| - u^\delta\|_U \rightarrow \min_{0 \leq \gamma \leq \gamma_{\max}}, \quad (11)$$

где знак $|\cdot|$ означает, что в каждой точке функции f^γ берётся в расчёт только абсолютное значение, при этом символ в обозначении функции f подразумевает, что она найдена по правилу (9) при некоторой величине $\gamma \in [0, \gamma_{\max}]$, где $\gamma_{\max}$ – заведомо большое число. Такая модификация обычной невязки стала возможна вследствие специальной структуры пространства решений F , а именно, всякое распределение аэрозоль по размеру является неотрицательной функцией. Типичное поведение невязки $\mathcal{P}(\gamma)$ приведено на рис. 1.

Следует подчеркнуть, что оптимальное значение параметра γ , полученное по новому критерию (11), удовлетворяет условию устойчивости и

сходимости (10). Данное обстоятельство позволяет утверждать, что критерий минимума модифицированной невязки (11) оценки оптимального значения γ является теоретически обоснованным.

Проведённое моделирование показало, что решения, соответствующие критерию минимума модифицированной невязки, не всегда обеспечивали достаточную точность восстановления и в ряде случаев содержали осцилляции. Для дополнительной стабилизации алгоритма предлагается новый принцип отбора решений.

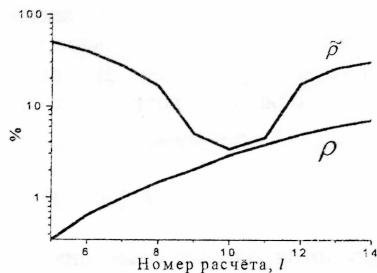


Рис. 1. Модифицированная невязка $\tilde{\rho}$ в зависимости от параметра регуляризации γ . Номер расчёта l связан с параметром регуляризации как $\gamma_l = 2^l 10^{-23}$; ρ — обычная невязка

В соответствии с правилом (9), задача (6) решается столько раз, сколько пар (R_{min}, R_{max}) и $(\text{Re}(m), \text{Im}(m))$ удовлетворяют ограничениям (5). Согласно критерию (11) только одна экстремаль, полученная для какой-либо комбинации (R_{min}, R_{max}) и $(\text{Re}(m), \text{Im}(m))$ и образующая минимальное значение $\tilde{\rho}_{min}$, является решением задачи (6). Такой подход основан на определении решения некорректной задачи — квазирешения, по которому любая из функций, удовлетворяющая построенному регуляризирующему правилу может рассматриваться как решение. Однако в результате исследования установлено, что экстремали функционала Тихонова (7), полученные для всех пар (R_{min}, R_{max}) и $(\text{Re}(m), \text{Im}(m))$, с модифицированной невязкой из окрестности минимального значения $\tilde{\rho} \in [\tilde{\rho}_{min}, \tilde{\rho}_{aver}]$ являются хорошим приближением точного решения. Усреднение этих экстремалей позволило существенно улучшить окончательное решение в норме пространства F

$$f^{mean}(r_n) = \frac{1}{l_{aver}} \sum_{l=1}^{l_{aver}} f^{(l)}(r_n), \quad r_n = R_{min} + n \frac{R_{max} - R_{min}}{n_{max}}, \quad n = 0, 1, \dots, n_{max}$$

Здесь $f^{(l)}(r)$ — экстремаль, для которой невязка $\tilde{\rho}^{(l)} \in [\tilde{\rho}_{min}, \tilde{\rho}_{aver}]$, $l = 1, 2, \dots, l_{aver}$, где l_{aver} — количество усредняемых экстремалей. Аналогичная процедура принята для оценки среднего показателя преломления

$$\text{Re}(m_{mean}) = \frac{1}{l_{aver}} \sum_{l=1}^{l_{aver}} \text{Re}(m^{(l)}), \quad \text{Im}(m_{mean}) = \frac{1}{l_{aver}} \sum_{l=1}^{l_{aver}} \text{Im}(m^{(l)})$$

Из восстановленного распределения аэрозолей по размеру могут быть получены концентрация $N_t = \int_0^{\infty} f(r) dr$, общий объём $V_t = \frac{4}{3} \pi \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^3 f(r) dr$ и общая площадь поверхности $S_t = 4\pi \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^2 f(r) dr$ частиц, а также эффективный $r_{\text{eff}} = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^3 f(r) dr / \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^2 f(r) dr$ и средний $r_{\text{mean}} = \frac{1}{N_t} \int_0^{\infty} r f(r) dr$ размеры.

Эффективность предлагаемой процедуры усреднения иллюстрирует рис. 2а. Решение, соответствующее минимальной невязке $\bar{\rho}_{\min}$, характеризуется значительным выбросом, приводящим, в частности, к существенной ошибке определения концентрации N_t . Однако усреднённое решение $f^{\text{mean}}(r)$ хорошо согласуется с точным $\bar{f}(r)$ в норме пространства F . Рис. 2б демонстрирует критерий выбора величины отрезка усреднения $[\bar{\rho}_{\min}, \bar{\rho}_{\text{aver}}]$. Количество экстремалей l на этом рисунке представлено как функция невязки $\bar{\rho}$. Интервал [4 %, 10 %] характеризуется наибольшей плотностью экстремалей и содержит примерно 10 % от общего количества $l_{\max}$. Выбор интервала усреднения не требует априорной информации, поскольку эта процедура стабильна, и полученные результаты слабо зависят от интервала усреднения. Усреднение на интервале [4 %, 20 %] ведёт практически к такому же распределению по размеру и, как следствие, к аналогичным оценкам физических параметров. На основе обобщения результатов моделирования установлено, что, как правило, наилучшим является такое значение $\bar{\rho}_{\text{aver}}$, при котором $l_{\text{aver}} \approx 0,1 l_{\max}$.

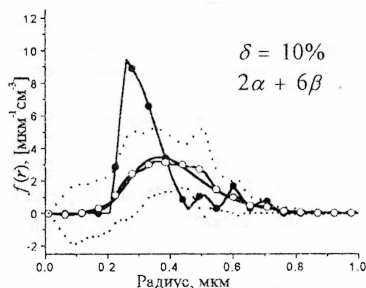


Рис. 2а. Решение, соответствующие минимальной невязке (кружки) и усреднённое (окружности) в интервале $2\% < \bar{\rho}_{\text{aver}} < 10\%$. Сплошная кривая является точным решением $\bar{f}(r)$.

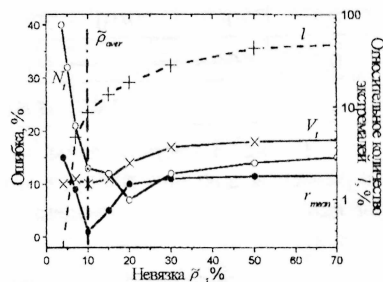


Рис. 2б. Ошибки концентрации N_t , объёма V_t и среднего радиуса r_{mean} в зависимости от невязки $\bar{\rho}$. Пунктирная линия показывает относительное количество экстремалей на интервале усреднения.

Устойчивость разработанного алгоритма тестировалась для различных комбинаций оптических данных и распределений аэрозолей по размерам в диапазоне 0,05–5,00 мкм. Погрешность вводилась в оптические данные случайным образом по равномерному закону в интервале 0–10 %, что

соответствует точности, достигнутой при использовании рамановского лидара. Для определения реальной точности восстановления параметров аэрозолей моделирование повторялось многократно, принимая во внимание статистический характер распределения погрешности между входными оптическими данными. Результаты моделирования показали, что максимальная точность восстановления обеспечивается при комбинировании коэффициентов α и β , что согласуется с выводами гл. 1, полученными при анализе решения прямой задачи. При этом оптимальной является комбинация, когда количество коэффициентов обратного рассеяния в 2-3 раза превосходит количество коэффициентов ослабления. Проведённый анализ позволил оценить точность восстановления параметров аэрозолей для различных распределений частиц по размерам. Соответствующие результаты представлены в табл. 2.

Типичной ситуацией для атмосферного аэрозоля является бимодальное распределение частиц по размерам. Для проверки алгоритма в этом случае в качестве исходного распределения $\bar{f}(r)$ была задана сумма двух функций $\bar{f}^{(1)}(r)$ и $\bar{f}^{(2)}(r)$, описываемых формулой (1), с параметрами $r_{mean}^{(1)} = 0,2$ мкм, $s^{(1)} = 0,5$; $N_t^{(1)} = 1 \text{ см}^{-3}$ и $r_{mean}^{(2)} = 0,7$ мкм, $s^{(2)} = 0,3$; $N_t^{(2)} = 0,2 \text{ см}^{-3}$ соответственно. Восстановление проводилось по двум наборам оптических данных $2\alpha + 3\beta$ и $2\alpha + 6\beta$ с ошибкой $\delta = 10$ %. Показатель преломления предполагался неизвестным, при этом точное значение $m = 1,35 - i0,005$.

Таблица 2.

Ошибка ϵ восстановления параметров аэрозолей для наборов $3\beta + 2\alpha$ / $6\beta + 2\alpha$							
r_{mean} , мкм	$\epsilon_{r_{mean}}$, %	$\epsilon_{r_{eff}}$, %	ϵ_{N_t} , %	ϵ_{S_t} , %	ϵ_{V_t} , %	$\epsilon_{Re(m)}$	$\epsilon_{Im(m)}$, %
0,1	20/20	20/10	70/50	55/40	50/35	$\pm 0,08/\pm 0,07$	50/50
0,5	20/15	15/15	45/30	10/10	20/20	$\pm 0,07/\pm 0,05$	50/50
1,0	40/30	60/55	60/50	10/10	80/60	$\pm 0,05/\pm 0,05$	50/50

На рис. 3 представлены восстановленные распределения аэрозолей по размерам для двух наборов оптических данных. Все искомые параметры r_{mean} , N_t , V_t и т. д. найдены с погрешностью, которая согласуется с табл. 2.

Полученные результаты показывают, что предлагаемый метод может быть использован для восстановления микрофизических параметров аэрозолей и их распределения по размерам. Данные оценки производятся также на основе ограниченного количества оптических данных (набор $2\alpha + 3\beta$), что позволяет существенно упростить конструкцию лидара.

Разработанный алгоритм использовался для обработки лидарных данных, полученных в ИТИ в рамках Экспедиции по Характеристике Аэрозолей в Линденберге 1998 года. Одновременно с лидарными измерениями параметры аэрозолей определялись путём забора локальных проб с

борта самолёта. Измерения проводились в Метеорологической Обсерватории в Линденберге (52,2°с.ш., 14,1° в.д.) в июле и августе 1998 года. Всесторонняя проверка возможностей алгоритма обеспечивалась рассмотрением данных, соответствующих атмосферным слоям, содержащим как аэрозоли естественного происхождения, так и антропогенного загрязнения.

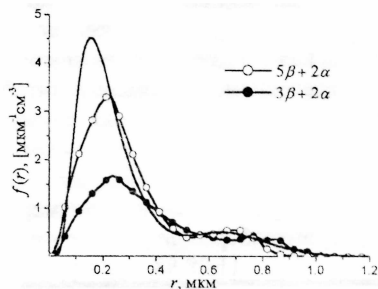


Рис. 3. Результаты восстановления бимодального распределения

Сравнительный анализ результатов обработки измерений, выполненной различными методами, представлен в табл. 3. В этом случае результаты, полученные с использованием предлагаемого алгоритма, хорошо согласуются с алгоритмами ИТИ и ИМ, а также с локальными самолётными измерениями.

Таблица 3.

Результаты обработки лидарных данных при измерениях на высоте от 3 500 до 4 000 м и локального забора проб на высоте от 3 400 до 3 900 м от 9.08.98

Параметр	Алгоритм ИТИ	Алгоритм ИМ	Новый алгоритм		Локальные измерения
	$6\beta + 2\alpha$	$6\beta + 2\alpha$	$3\beta + 2\alpha$	$6\beta + 2\alpha$	
$r_{eff} \times 10^{-6},$ м	0,27±0,04	0,24±0,01	0,31±0,04	0,31±0,04	0,25±0,07
$N_r \times 10^6,$ м ⁻³	291±70	506±131	160±80	160±80	271±74
$V_r \times 10^{-12},$ м ³ ·м ⁻³	13±2	11±1	12,5±3	13,5±4	8±5
$S_r \times 10^{-6},$ м ² ·м ⁻³	139±7	136±5	125±20	125±20	95±55
Re(m)	1,64±0,09	1,66±0,02	1,54±0,07	1,53±0,07	1,56
Im(m)	0,05±0,02	0,053±0,04	0,03±0,015	0,035±0,015	0,07

На основании анализа многочисленных лидарных данных было показано, что предлагаемый алгоритм более устойчив в работе, чем алгоритмы ИТИ и ИМ. Результаты, представленные в табл. 4, демонстрируют, что

этот алгоритм позволяет оценивать числовую концентрацию N_i в тех случаях, когда из алгоритмов ИТИ и ИМ соответствующую информацию получить не удавалось.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Построена модификация математической модели на основе теории рассеяния Ми. В соответствии с математической моделью оптические данные аэрозолей, такие как коэффициенты обратного рассеяния и ослабления, связаны с их распределением по размерам интегральным преобразованием. Ядром интегрального преобразования служат сечения обратного рассеяния и ослабления.

Таблица 4.

Результаты обработки лидарных данных при измерениях на высоте от 1 420 до 1 700 м и локального забора проб на высоте от 2 000 до 2 400 м от 11.08.98

Параметр	Алгоритм ИТИ	Алгоритм ИМ	Новый алгоритм		Локальные измерения
	$6\beta + 2\alpha$	$6\beta + 2\alpha$	$3\beta + 2\alpha$	$6\beta + 2\alpha$	
$r_{eff} \times 10^{-6},$ м	$0,12 \pm 0,02$	$0,11 \pm 0,002$	$0,20 \pm 0,02$	$0,19 \pm 0,02$	$0,24 \pm 0,05$
$N_i \times 10^6,$ м ⁻³	—	—	1430 ± 700	1860 ± 900	858 ± 56
$V_i \times 10^{-12},$ м ³ м ⁻³	35 ± 7	23 ± 1	34 ± 8	34 ± 8	32 ± 8
$S_i \times 10^{-6},$ м ² м ⁻³	921 ± 221	624 ± 30	515 ± 200	535 ± 200	400 ± 130
$Re(m)$	$1,58 \pm 0,1$	$1,74 \pm 0,02$	$1,52 \pm 0,05$	$1,51 \pm 0,05$	$1,53$
$Im(m)$	$0,01 \pm 0,02$	$0,031 \pm 0,0001$	$0,01 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$	$0,02$

2. На основе метода регуляризации Тихонова разработан алгоритм восстановления распределения аэрозолей по размерам из данных многоволнового лидарного зондирования. Использование критерия минимума модифицированной невязки позволяет оценивать стабилизирующий член без априорного знания погрешности измерений.

3. Предложена процедура усреднения решений в окрестности минимума модифицированной невязки и определён критерий выбора интервала усреднения. Указанная процедура стабилизирует решение обратной задачи и позволяет определить параметры аэрозолей из оптических данных, характеризующихся высокой погрешностью измерения.

4. Показано, что комбинация коэффициентов ослабления и обратного рассеяния стабилизирует решение обратной задачи для различных типов распределений аэрозолей по размерам. Для достижения оптимального результата количество коэффициентов обратного рассеяния должно в 2-3 раза превосходить количество коэффициентов ослабления.

5. Продемонстрировано, что использование оптических данных в спектральном диапазоне 0,355-1,064 мкм позволяет восстанавливать моно- и бимодальные распределения аэрозолей по размеру в диапазоне радиусов частиц 0,05-5,00 мкм.

6. Проведено моделирование погрешностей восстановления параметров аэрозолей, таких как эффективный радиус, концентрация, общая площадь поверхности и объём аэрозолей. Показано, наиболее стабильным параметром является общая площадь поверхности, которая восстанавливается с точностью 10 % во всём диапазоне размеров при погрешности оптических данных 10 %.

7. Исследована возможность определения комплексного показателя преломления по данным многоволновых лидарных измерений. Установлено, что при 10 % погрешности оптических данных реальная часть показателя преломления восстанавливается с точностью $\pm 0,05$, погрешность определения мнимой части ± 50 %.

8. Показано, что рамановский лидар на основе Nd:YAG лазера с генератором третьей гармоники, измеряющий коэффициенты обратного рассеяния на длинах волн 0,355; 0,532; 1,064 мкм и ослабления на 0,355 и 0,532 мкм может быть использован для восстановления бимодального распределения аэрозолей по размерам.

9. Проведено сравнение параметров аэрозолей, восстановленных из лидарных измерений с использованием предлагаемого алгоритма, с результатами существующих зарубежных алгоритмов, а также с результатами локального забора проб на борту самолёта. Показано, что разработанный алгоритм более устойчив, а полученные данные хорошо согласуются с локальными измерениями на самолёте.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Колготин А. Математическое моделирование рассеяния лазерного излучения шероховатой поверхностью// Тез. докладов студенческой научно-технической конференции. – Реутов, 1999. – С.72

2. Veselovskii I., Griaznov V., Kolgotin A. Multiwavelength lidar for the retrieval of aerosol size distribution in troposphere// 20th International Laser Radar Conference. – Vichy (France), 2000. – P. 132

3. 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

4. Retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding/ I.A. Veselovskii, A.V. Kolgotin, V.I. Griaznov et al. –21st International Laser Radar Conference. – Quebec (Canada), 2002. – P.573-575

5. 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

Подписано к печати 4.11.2003 Заказ 989500/1184

Объем 1,0 в. л. Тираж 110 экз.

Типография ФГУП «НПО машиностроения». 143966, г. Реутов, ул. Гагарина, 33