«Оптика атмосферы», **1**, № 1 (1988) УДК 551.501+551.510+535.533.34

И.Э. Наац

К ТЕОРИИ ОПТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ

В работе излагается теория и методы интерпретации данных комплексного оптического эксперимента по дистанционному зондированию атмосферы с целью прогноза моментного состояния ее оптических свойств. В основе подобного мониторинга лежит геометрическая схема зондирования, осуществляющая взаимосогласованные оптические измерения с помощью лидаров и спектральных радиометров бортового базирования. В рамках операторного подхода разрабатывается общая структура алгоритма взаимосогласованной обработки получаемого массива экспериментальной информации.

При решении ряда атмосферно-оптических задач требуется знать моментное состояние поля оптических характеристик атмосферы. Известным примером служит проблема радиационной коррекции изображений земной поверхности, получаемых с помощью систем космического наблюдения. Определение поля характеристик светорассеяния методами дистанционного оптического зондирования составляет главное содержание того, что принято понимать под термином «оптический мониторинг атмосферы». Осуществление подобного мониторинга требует взаимосогласованного применения нескольких методов оптического зондирования, реализуемых технически в единой информационно-измерительной системе.

В пределах настоящей работы дается краткое изложение теоретических основ оптического мониторинга рассеивающей компоненты атмосферы. Выбор окон прозрачности атмосферы в качестве каналов оптического зондирования позволяет при интерпретации измеренных данных пренебречь молекулярным поглощением. Для излагаемой ниже теории это не носит принципиального характера, но позволяет заметно упростить аналитические построения и сделать более понятным их содержательный смысл. К тому же следует заметить, что молекулярное поглощение играет определяющую роль в дистанционном зондировании полей метеопараметров атмосферы, а эти задачи выходят за рамки настоящей работы.

При построении теории оптического мониторинга будем предполагать, что поле оптических характеристик сферически однородно, и, следовательно, его вполне можно описать одномерными распределениями. Последнее обстоятельство заметно упрощает задачи интерпретации оптических данных. Наиболее распространенной оптической характеристикой, как известно, является оптическая толща τ. При сделанном выше допущении поле этой характеристики следует описывать распределением $\tau(\lambda, z, t)$, где z — высота некоторой переменной точки наблюдения; t — момент времени наблюдения и λ — длина волны излучения, используемого при зондировании атмосферы. В силу ограниченных возможностей измерительной аппаратуры область изменения переменных z и λ разумно ограничить конечными интервалами, скажем, $Z = (Z_1, Z_2)$ и $\Lambda = [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$.

Поскольку оптический комплекс позволяет измерить в соответствии с геометрической схемой эксперимента поле интенсивности рассеянного света $I(\lambda, z, t)$ то первой задачей теории оптического мониторинга рассеивающей компоненты атмосферы должно быть построение операторов, осуществляющих преобразование распределения I в распределение τ. В дальнейшем это преобразование и ему подобные будем писать в следующем виде:

$$I \to \tau \qquad (1)$$

К сожалению, формальное построение указанного преобразования в рамках теории переноса излучения в рассеивающей атмосфере невыполнимо в силу неопределенности исходных уравнений. Требуется большая конкретность в постановке задач интерпретации поля интенсивности I. Если, например, полагать, что дисперсная фракция рассеивающей компоненты атмосферы представляет собой полидисперсную систему частиц, морфология которых может быть задана априори с приемлемой точностью, то можно построить (алгоритмически) совокупность операторов, осуществляющих следующие преобразования:

$$\begin{array}{llllll} & \nearrow \tau^{(\mathrm{м})} \to \beta_{\mathrm{sc}}^{(\mathrm{м})} & & & & \\ \tau & & & & & \\ & \searrow \tau^{(\mathrm{a})} \to \beta_{\mathrm{ex}}^{(\mathrm{a})} & \nearrow & \beta_{\mathrm{sc}}^{(\mathrm{a})} \to D_{11}^{(\mathrm{a})} & & \\ & & \searrow & \beta_{\mathrm{ab}}^{(\mathrm{a})} & & \end{array} \qquad (2)$$

В этой схеме верхние индексы «м» и «а» относятся к молекулярной и аэрозольной характеристикам светорассеяния соответственно. Через β_{ex}, β_{sc} и β_{ab} обозначены объемные коэффициенты ослабления, рассеяния и поглощения.

В силу сделанного выше предположения, касающегося окон прозрачности, $\beta_{ex}^{(M)} = \beta_{sc}^{(M)}$ для всех длин волн зондирования λ_i ($i = 1,\ldots, n$). Характеристика D_{11} определяет величину коэффициента направленного светорассеяния для любых значений λ и угла рассеяния ϑ. Схема преобразований (2) впервые была введена в теорию многочастотной лазерной локации атмосферы [1] и подробно изучалась в последующих работах автора [2, 3] на примере полидисперсной системы сферических частиц.

Введение в теорию оптического мониторинга указанных выше операторов, которые, следуя работе [1], будем называть оптическими операторами взаимного преобразования семейства характеристик светорассеяния локальными объемами, доопределяет обратную задачу теории переноса излучения в рассеивающей атмосфере и делает вполне определенным преобразование (1). Для большей ясности излагаемой теории обратимся вначале к конкретным методам оптического зондирования.

В теории многочастотной лазерной локации исходное функциональное уравнение (уравнение переноса), связывающее интенсивности оптических сигналов $S(\lambda, z, t)$ с характеристиками светорассеяния локальных объемов атмосферы, имеет следующий вид:

$$\beta_\pi(\lambda, z)\exp\{-2\tau(\lambda, z)\} = S(\lambda, z),\ z \in Z,\ \lambda \in \Lambda. \tag{3}$$

Решить уравнение (3) относительно τ при приближенно заданной правой части S_σ — значит построить преобразование

$$S_\sigma \to \tau \tag{4}$$

которое является примером конкретной реализации преобразования (1). На практике это осуществляется путем численного решения интегрального уравнения второго рода

$$\tau(z) = \tau(Z_1) + \int_{Z_1}^{z} b^{-1}(z')S_\sigma(z')\exp\{-2\tau(z')\}dz'. \tag{5}$$

Для сокращения записи в (5) опущена переменная λ, так же ранее мы опустили переменную t при записи (3). Функция $b(\lambda, z)$, фигурирующая в последнем уравнении, суть отношение β_π/β_{ex}, где β_π — объемный коэффициент обратного рассеяния. При малых τ, т.е. когда $\exp\{-2\tau(z)\} \simeq 1$, $\beta_\pi \approx S_\sigma$. Это означает, что лазерная импульсная локация становится по существу методом прямого измерения локальных характеристик светорассеяния в атмосфере. Поэтому лидары как оптические системы зондирования незаменимы в тех атмосферно-оптических исследованиях, которые связаны прежде всего с дистанционным определением локальных свойств атмосферы.

Уравнение (5) численно решается с помощью следующей итерационной схемы:

$$\tau_{ij}^{(p)} = \tau_{i,j-1} - b_{ij}^{-1}\exp\left\{\tau_{i,j-1} + \tau_{ij}^{(p-1)}\right\} I_{ij}, \tag{6}$$

где $I_{\text{ij}} = \int_{z_j}^{z_{j+1}} S(\lambda_j, z)dz.$

Введение в основное уравнение отношения $b(z)$, естественно, не делает его более определенным, поэтому нам следует обратиться далее к схеме преобразований (2). Для рассматриваемого оптического метода эту схему предпочтительно переписать, вводя в нее непосредственно операторы взаимного преобразования. Имеем

$$\left.\begin{aligned} &W_{ex,\pi}^{(\alpha)}\beta_\pi = \beta_{ex,\alpha};\\ &W_{sc,ex}^{(\alpha)}\beta_{ex} = \beta_{sc,\alpha};\\ &W_{D,sc}^{(\alpha)}\beta_{sc} = D_{11,\alpha} \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

Появление индекса «α» связано с введением в схему интерпретации регуляризирующих операторов [2]. Первый из операторов устанавливает функциональную связь между характеристиками $\beta_\pi(\lambda, z)$ и $\beta_{ex}(\lambda, z)$, делая вполне определенным и их отношение $b(\lambda, z)$. Оператор перехода $W_{D,sc}^{(\alpha)}$ позволяет по данным многочастотного лазерного зондирования восстановить высотные профили индикатрисы рассеяния для всех λ. Численные исследования этого оператора можно найти в работах [4, 5].

Второй пример будет касаться более простого и более распространенного оптического метода, а именно метода спектральной прозрачности. Соответствующее функциональное уравнение имеет вид

$$\tau(\lambda, L) = -\ln[I(\lambda, L) I_0(\lambda)], \lambda \in \Lambda. \tag{8}$$

Поскольку интенсивности справа известны с ошибками, то правую часть (8) обозначим через η_σ, и задачу интерпретации будем рассматривать как задачу выделения из этой функции ее регулярной (сглаженной) компоненты [2, 3]. Иными словами, требуется построить преобразование

$$\eta_\sigma \to \tau_a \tag{9}$$

где α — параметр регуляризации, выбор которого согласован с величиной σ, характеризующей величину измерительных шумов. На примере решения этой достаточно простой задачи уместно пояснить одновременно и суть излагаемого операторного подхода к построению алгоритмов интерпретации оптических данных, и место в них обратных регуляризирующих операторов. Если светорассеяние обусловливается только полидисперсным аэрозолем, то можно записать следующее интегральное представление:

$$\tau(\lambda, L) = L \cdot \int_R K_{ex}(\lambda, r) s(r) dr,$$

где $K_{ex}(\lambda,\ r)$ — фактор эффективности ослабления, а распределение $s(r)$ характеризует спектр размеров частиц в среднем по трассе длиной L. Решая обратную задачу светорассеяния для исходной функции $\eta_\sigma(\lambda,\ L)$ находим в качестве решения функцию

$$Ls_\alpha(r) = (K^{-1}_{ex,\alpha}\eta_\sigma)(r),$$

которая позволяет затем вычислить, как обычно, исходную оптическую характеристику согласно схеме

$$\tau_\alpha(\lambda) = (K_{ex} K^{-1}_{ex,\alpha}\eta_\sigma)(\lambda).$$

Произведение операторов в скобках можно рассматривать как единый оператор, скажем, $V^{(\alpha)}_{ex}$. В схемах интерпретации оптических аэрозольных характеристик он играет роль фильтра, подавляющего высокочастотные «помехи» в измерениях η_σ. Его можно назвать регуляризирующим оператором выделения регулярных компонент из эмпирических характеристик светорассеяния [3]. Применение операторов типа $V^{(\alpha)}$ обязательно в задачах зондирования слабозамутненной атмосферы. Методика их применения и соответствующие примеры подробно изложены в монографии [3]. При необходимости учета молекулярного рассеяния на основе оператора $V^{(\alpha)}$ можно построить оператор разделения $U^{(\alpha)}$ [31, осуществляющий следующее преобразование:

$$\beta^{(a)}_{sc} + \beta^{(м)}_{sc} = \beta_{sc} \begin{matrix} \nearrow \beta^{(a)}_{sc} \\ \searrow \beta^{(м)}_{sc} \end{matrix}.$$

Помимо рассмотренных двух методов для оптического мониторинга атмосферы важное значение имеет метод касательного зондирования. Подробное описание геометрической схемы этого метода и его информационных возможностей в исследовании атмосферы дано в монографии [6]. В связи с этим мы ограничимся лишь общим анализом этого метода применительно к исследованию только рассеивающей компоненты атмосферы. Исходное функциональное уравнение (то же уравнение переноса) может быть записано в следующем виде:

$$\int_h^H J(z) \exp\left\{-\int_z^H \varphi(z',\ h)\, d\tau(z')\right\} \varphi(z,\ h)\, d\tau(z) = I(h)/2, \tag{10}$$

где $\varphi(z,h) = -(r+z)\sqrt{(r+z)^2 - (r+h)^2}$ и r — радиус Земли.

Уравнение (10) справедливо в приближении однократного рассеяния и когда вкладом излучения, отраженного от подстилающей поверхности, можно пренебречь. Функция источника $J(z)$ представляется выражением $\omega(z) D_{11}(z,\vartheta)/\beta_{sc}(z)$, в котором $\omega = \beta_{sc}/\beta_{ex}$ для всех z и λ. Построение дискретного аналога для интеграла в (10) приводит к следующей нелинейной системе уравнений:

$$\left.\begin{array}{l}\sum\limits_{l=j}^{n} \xi_{ijl} \Psi_{jl} J_{il} \Delta_{il}(\tau) = I_{ij}/2 \\ i = 1,\ldots,\ n,\ j = 1,\ldots\end{array}\right\} . \tag{11}$$

Матрица $\{\xi_{ije}\}$ определяется значениями экспоненциальной функции в подынтегральном выражении, соответствующими дискретному набору узлов $\{\lambda_i, h_j, z_e\}$. Матрица $\{\Psi_{ji}\}$ аналогичным образом связана с функцией $\varphi(z,\ h)$. Подробный анализ и методы численного решения систем подобного вида, а также нелинейных интегральных уравнений типа (10) применительно к задачам зондирования стратосферы изложены в работе [5].

Доопределение системы (11) осуществляется совокупностью операторов типа W, реализующих в схеме интерпретации экспериментальных данных следующие преобразования:

$$\left.\begin{array}{l} W^{(\alpha)}_{\mathrm{sc,ex}}\, \beta_{\mathrm{ex}} = \beta_{\mathrm{sc},\alpha}\,; \\ W^{(\alpha)}_{D,\mathrm{sc}}\, \beta_{\mathrm{sc}} = \sigma_{11,\alpha}\,. \end{array}\right\} \tag{12}$$

Следует особо отметить, что операторы перехода в (12) удовлетворяют очень важному дополнительному условию, а именно

$$\|W\| < 1,$$

которое означает, что они являются, помимо всего прочего, операторами сжатия. Для построения устойчивых вычислительных процессов обращения эмпирических данных это свойство операторов имеет важное значение.

Операторный подход в изложенной теории оптического зондирования естественно приводит к идее объединения рассмотренных методов и геометрических схем зондирования в единый комплексный метод и создания на его основе единой информационно-измерительной системы дистанционного контроля оптического состояния атмосферы. Теоретической основой для построения единой геометрической схемы зондирования должно являться объединение отдельных функциональных уравнений, о которых речь шла ранее, в единую систему взаимосвязанных уравнений. Обратимся к неформальным истокам подобного объ единения. Нетрудно заметить, что все операторы взаимного преобразования спектральных оптических характеристик требуют знания вещественной $\overline{m}'$ и мнимой $\overline{m}''$ частей комплексного показателя преломления рассеивающих частиц. Следовательно, все операторы W являются по существу операторозначными функциями комплексного параметра $\overline{m}$.

В каждом из рассмотренных методов зондирования интерпретации оптических данных требует априорного задания профилей $\overline{m}'(\lambda, z)$ и $\overline{m}''(\lambda, z)$. В силу этого обстоятельства определяемая характеристика τ является функцией параметров $\overline{m}'$ и $\overline{m}''$. Для того, чтобы выделить это обстоятельство, перепишем уравнение (5) в неявной форме

$$F_{\sigma}(\lambda,\ z,\ \tau,\ \overline{m}',\ \overline{m}'',\ S_{\sigma}) = 0,\ \lambda \in \Lambda,\ z \in Z. \tag{13}$$

Выражение (13) явно указывает на неопределенность этого функционального уравнения, если неизвестны значения $\overline{m}'$ и $\overline{m}''$. Аналогично можно переписать и два остальных уравнения (8) и (10). Имеем соответственно

$$F_{\mathrm{ex}}(\lambda,\ L,\ \tau,\ \overline{m}',\ \overline{m}'',\ \eta_{\sigma}) = 0. \tag{14}$$

$$F_h(\lambda,\ h,\ \tau,\ \overline{m}',\ \overline{m}'',\ I_{\sigma}) = 0. \tag{15}$$

Ни одно из выписанных функциональных уравнений не определено само по себе, поскольку содержит три неизвестные функции τ, $\overline{m}'$ и $\overline{m}''$. Но если их объединить в систему функциональных уравнений и потребовать синхронного измерения исходного массива оптических данных $\{S_\sigma, \eta_\sigma, I_\sigma\}$, то можно полагать, что решение этой системы относительно функций τ, $\overline{m}'$ и $\overline{m}''$ дает адекватное представление о свойствах рассеивающей среды. Разумеется, что подобные утверждения требуют доказательства и должны основываться на соответствующих расчетно-теоретических исследованиях, которые не могут быть затронуты в пределах настоящей работы. Укажем лишь на то, что совместная система первых двух уравнений, а именно (13) и (14), исследовалась в работах по теории оптической локации [2, 7]. На ее основе были разработаны методики практической коррекции результатов обращения данных лазерного зондирования по показателю преломления. Коррекция осуществлялась по опорным измерениям средних значений коэффициента ослабления β_{ex} по трассе зондирования.

Ведущиеся в настоящее время работы по созданию оптических измерительных комплексов, включающих в себя лидары и спектральные радиометры и устанавливаемых на внеатмосферных платформах, требуют проведения расчетно-теоретических исследований всей системы уравнений с целью выработки рекомендаций по оптимальному использованию аппаратуры и созданию программного обеспечения для оперативной обработки оптической информации. Общий анализ системы (13—15) и структура вычислительной схемы ее численного решения рассмотрены в монографии [5]. Исследование в этом направлении, помимо всего прочего, открывает возможность оценки аэрозольного поглощения в атмосфере дистанционными методами и, следовательно, позволяет в какой-то мере прояснить вопрос о влиянии аэрозолей на радиационный баланс атмосферы. Изложенная здесь теория касалась мониторинга рассеивающей компоненты атмосферы, однако операторный подход, лежащий в ее основе, позволяет дать соответствующие обобщения и на случай оптического мониторинга системы атмосфера— подстилающая поверхность. Соответствующие исследования выходят за рамки настоящей работы.

1. Н а а ц И . Э . — В кн.: Лазерное зондирование атмосферы. — М.: Наука, 1976,. с. 3—10.
2. Н а а ц И . Э . Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы. — Новосибирск: Наука, 1980, 157 с.
3. Н а а ц И . Э . Метод обратной задачи в атмосферной оптике. — Новосибирск: Наука, 1986.— 198 с.
4. Б у ш у е в В . Д . , Н а а ц И . Э . Программный комплекс «Спектр» для решения аппроксимашюнных задач теории светорассеяния аэрозольными системами. — Томск, ТФ СО АН СССР, 1987, препринт № 15, 50 с.
5. З у е в В . Е . , Н а а ц И . Э . Обратные задачи оптики атмосферы.— Л.: Гидрометеоиздат (в печати).
6. К о н д р а т ь е в К . Я . , Г р и г о р ь е в А . А . , П о к р о в с к и й О . Н . , Ш а л и н а Е . В . Космическое дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983.— 216 с.
7. З у е в В . Е . , Н а а ц И . Э . Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. — Новосибирск: Наука, 1982.— 242 с.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, г. Томск

Поступила в редакцию
28 сентября 1987 г.

I . E . N a a t s . **On the theory of atmospheric optical monitoring**.

The paper considers the theory and methods of interpreting complex optical experiment data on atmospheric remote sensing to forecast the moment state of its optical properties. This monitoring is based on the geometrical sensing scheme for the self-consistent optical measurements using airborne lidars and spectral radiometers. The general algorithm structure of self-consistent interpretation of the experimental data file based on operator approach is developed.