

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ  
ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 551.521.14

О.Б. Васильев, А.В. Васильев

**ИНФОРМАЦИОННАЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
АТМОСФЕРНЫХ СЛОЕВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ**  
**1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ОТДЕЛЬНОГО СЛОЯ**

Работа посвящена оценке информативности вертикальных профилей спектральных полусферических потоков коротковолнового излучения в атмосфере для восстановления по ним соответствующих вертикальных профилей оптических параметров среды при разбиении неоднородной атмосферы на ряд слоев (оптической плотности, вероятности выживания кванта и вытянутости индикатрисы рассеяния) при одновременном решении задачи для всех параметров и для всех слоев. Рассмотрены матрицы частных производных от указанных потоков по оптическим параметрам атмосферы для случаев прозрачной ( $\tau_0 = 0,09$ ), замутненной ( $\tau_0 = 0,9$ ) и сильно замутненной ( $\tau_0 = 3,5$ ) атмосферы. Приведена количественная оценка информативности измерений и показана достаточная информативная обеспеченность решения обратной задачи (кроме вытянутости индикатрисы рассеяния в случае очень прозрачной атмосферы).

Известны различные способы определения микрофизических и оптических параметров атмосферы по характеристикам ослабленного или рассеянного поля излучения. В большинстве этих методов используются измерения прямого излучения и угловые измерения интенсивности рассеянного излучения (метод Бугера для измерения оптической толщины, определение индикатрисы рассеяния по измеряемой индикатрисе яркости неба в альмукантарате Солнца и др.).

Однако если в наземных условиях выполнить угловые измерения рассеянного излучения не представляет большого труда, то при проведении самолетных измерений возникают значительные технические трудности. Во-первых, конструктивно на самолетах не предусмотрена возможность направлять измерительные приборы в верхнюю полусферу. Во-вторых, неблагоприятные факторы полета — болтанка, «рысканье», вибрация и др. — могут резко ухудшить точность рассматриваемых измерений и даже сделать их вообще неэффективными (например, при измерениях по методу Бугера). Для устранения влияния этих факторов измерительную часть аппаратуры необходимо установить на гиросtabilизированной платформе, а это в свою очередь, приведет к резкому увеличению веса и энергоемкости аппаратуры и т.п. Поэтому при самолетных измерениях проще (хотя тоже не так легко, как на земле) измерять полусферические потоки излучения. Спектральная аппаратура для таких измерений создана в лаборатории коротковолнового излучения НИИФ ЛГУ, ее установка на самолете и условия измерений описаны в работах [1, 2].

В связи с этим встает вопрос об информативности измерений потоков, т.е. о возможности получать информацию об оптических и микрофизических параметрах атмосферы и отдельных слоев атмосферы из измерений интегральных по углам характеристик излучения.

Первая попытка восстановления вертикальных профилей оптической толщины  $\tau_\lambda$  и вероятности выживания кванта  $\Lambda_\lambda$  из спектральных измерений восходящих и нисходящих потоков сделана в работе [1].

В ней для решения обратной задачи используется аналитическое обращение двухпотокowego приближения. Однако в этой работе не оценена ни случайная погрешность результата, вызванная наличием случайных погрешностей экспериментальных измерений, ни систематическая погрешность, вносимая неточностью двухпотокowego приближения. Более точные методики описаны в работах [3, 4], однако эти работы посвящены только определению вертикального профиля коэффициента истинного поглощения света, хотя потоки несут большую информацию. В классической работе [5] на стр. 123 сказано: «Сферическое альbedo зависит от оптической толщины атмосферы  $\tau_0$ , индикатрисы рассеяния  $x(\gamma)$  и параметра  $\Lambda$ ...» и ранее: «...под сферическим альbedo понимается отношение энергии, отраженной всей планетой, к энергии, падающей на нее от Солнца». Очевидно, что это утверждение справедливо не только для альbedo (восходящих потоков, нормированных на падающие), но и для самих потоков, выходящих из рассматриваемого слоя атмосферы.

Применим к задаче восстановления параметров атмосферы по измерениям потоков известные методы решения обратных задач, описанные, например, в [6, 7]. Измерения производятся на  $n+1$  уровнях в атмосфере, что соответствует разбиению атмосферы на  $n$  слоев (рис. 1). Измеряются спектральные полусферические потоки: падающие  $F_i^{\downarrow}$  ( $i = 2, \dots, n+1$ ) и восходящие  $F_i^{\uparrow}$  ( $i = 2, \dots, n+1$ ) (измерений на

верхней границе атмосферы нет). Зенитный угол Солнца  $\nu$  и солнечная постоянная  $\pi S$  считаются известными, поверхность ортотропной и характеризуется альбедо  $A_0$ , которое определяется как

$$A_0 = \frac{F_{n+1}^\uparrow}{F_{n+1}^\downarrow}, \quad (1)$$

за счет чего из числа информативных (относительно оптических параметров) измерений выпадает  $F_{n+1}^\uparrow$ . Здесь и далее  $\lambda$ , обозначающая измеряемые монохроматические величины, для простоты записи формул опускается.

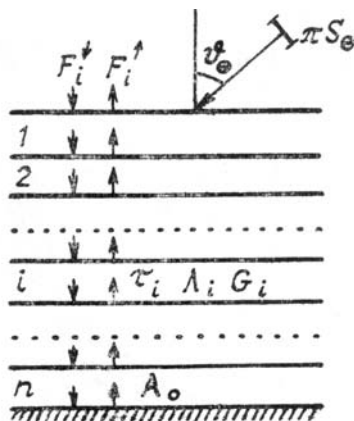


Рис. 1. Модель атмосферы

Атмосфера характеризуется оптическими параметрами: оптической толщиной  $\tau(z)$  (общая оптическая толщина атмосферы  $\tau_0$ ); вероятностью выживания кванта  $\Lambda(z)$  и индикатрисой рассеяния  $x_2(\gamma)$ . Так как  $\tau$  — монотонная функция  $z$ , то за вертикальную координату можно взять и  $\tau$ . Зная  $\nu_\odot$ ,  $\pi S_\odot$ ,  $A_0$ ,  $\tau_0$ ,  $\tau(z)$  (или  $z(\tau)$ ),  $\Lambda(\tau)$ ,  $x_\tau(\gamma)$  можно полностью рассчитать поле излучения в атмосфере и найти значения измеряемых величин, решая уравнения переноса. Для удобства решения этого уравнения, как правило, проводят параметризацию, т. е. аппроксимируют  $\tau$ ,  $\Lambda(\tau)$  и  $x_\tau(\gamma)$  кусочно-постоянными функциями в отдельных атмосферных слоях:  $\tau_i$ ,  $\Lambda_i$ ,  $x_i(\gamma)$ , где  $i = 1, \dots, n$  — номера слоев (здесь  $\tau_i$  — оптическая толщина  $i$ -то слоя). Из измерения потоков нельзя определить угловой ход  $x(\gamma)$ , поэтому можно ставить лишь задачу определения какого-либо одного из основных параметров индикатрисы. В качестве такого параметра естественно выбрать вытянутости индикатрисы

$$G = \frac{\int_0^{\pi/2} x(\gamma) \sin \gamma d\gamma}{\int_{\pi/2}^{\pi} x(\gamma) \sin \gamma d\gamma}. \quad (2)$$

При решении поставленной задачи воспользуемся однопараметрическим семейством индикатрис по классификации О.Д. Бартеневой [8]. Значения  $x(\gamma)$  для произвольного  $G$  (от 1 до 40) получаются интерполяцией по индикатрисам этого семейства.

На рис. 2 приведены результаты вычислений  $G_{\nu_\odot}(n)$ , выполненных для различных зенитных расстояний Солнца  $\nu_\odot$  в зависимости от номера индикатрисы рассеяния  $n$  по классификации О.Д. Бартеневой [8] (на графике  $R$  — рэлеевская индикатриса).

Для решения уравнения переноса использовался метод Монте-Карло. Он удобен для такого рода задач тем, что кроме самой вычисляемой величины дает и ее дисперсию. Мы применяли стандартный метод весового моделирования «без поглощения» и «без вылета из среды» [9, 10] с обрывом траектории, когда вес фотона становился менее 0,1 требуемой точности вычислений.

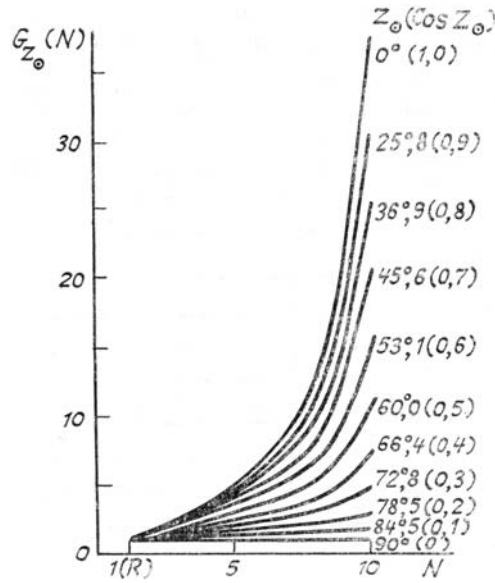


Рис. 2. Зависимость вытянутости индикатрис разных типов от зенитного угла Солнца

Таким образом, совокупность оптических параметров  $\nu_0, \pi S_0, A_0, \tau_i, \Lambda_i, G_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) позволяет полностью определить измеряемые величины  $F_i^\downarrow$  и  $F_i^\uparrow$  ( $i = 2, \dots, n+1$ ). Для формальной записи обозначим  $f_i$  ( $i = 1, \dots, 2n-1$ ) — измеряемые потоки:  $f_i$  при  $i = 1, \dots, n$  есть  $F_{i+1}^\downarrow$ , а  $f_i$  при  $i = n+1, \dots, 2n-1$  есть  $F_{i-n+1}^\uparrow$ ;  $x_i$  ( $i = 1, \dots, 3n$ ) — оптические параметры атмосферы:  $x_i$  при  $i = 1, \dots, n$  есть  $\tau_i$ ,  $x_i$  при  $i = n+1, \dots, 2n$  есть  $\Lambda_{i-n}$ ,  $x_i$  при  $i = 2n+1, \dots, 3n$  есть  $G_{i-2n}$ . Тогда набор чисел  $x_i$  можно интерпретировать как координаты точки  $x$  в  $3n$ -мерном пространстве, а набор чисел  $f_i$  как координаты точки  $F$  в  $2n-1$ -мерном пространстве. Решение уравнения переноса (прямая) задача есть операция, которая каждой точке  $X$  ставит в соответствие точку  $F$ , что можно записать как

$$F = KX, \quad (3)$$

где  $K$  — оператор решения прямой задачи. Отметим некоторые свойства оператора  $K$ : а) для  $K$  не существует точного аналитического выражения; б)  $K$  — нелинеен по всем координатам  $x_i$ . Разложим оператор  $K$  в окрестности точки  $F^0 = KX^0$  в ряд Тейлора

$$F = F^0 + \frac{dK(X^0)}{dX} (X - X^0) + \dots,$$

где символом  $\frac{dK(X^0)}{dX}$  обозначен оператор производной от  $K$ , вычисленной в точке  $X^0$ . Обозначим  $F - F^0 = \Delta F$ ;  $X - X^0 = \Delta X$  и ограничимся членом с первой производной, тогда

$$\Delta F = \frac{dK(X^0)}{dX} \Delta X. \quad (4)$$

Уравнение (4) — линейное относительно неизвестных  $\Delta X$ . Через координаты оно выражается матрицей частных производных  $\left( \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right)_{\substack{i=1, \dots, 2n-1; \\ j=1, \dots, 3n}}$ . Тогда уравнение (4) в координатной форме есть

$$\Delta f_i = \sum_{j=1}^{3n} \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \Delta x_j \quad (5)$$

Вышеизложенное показывает, что возможно нахождение оптических параметров атмосферы по измерениям потоков итерационным методом, а именно: выбирается некоторое нулевое приближение  $X^0$  (например, просто средняя модель безоблачной атмосферы) и для него решается прямая задача — получаются потоки  $F^0$ . Вычислив разности  $\Delta F$  между наблюдаемыми и вычисленными потоками и

матрицу частных производных  $\frac{dK(X^0)}{dX}$  (см. ниже), можно, решая уравнение (4), найти поправки  $\Delta X$  к нулевому приближению и получить следующее приближение:  $X^1 = X^0 + \Delta X$  и т.д.

Наблюдения на границах каждого слоя (верхней и нижней) дают две величины, зависящие от оптических параметров данного слоя, а именно, выходящие из него потоки. Кроме того, отличная от нуля дивергенция полного потока (приток лучистой энергии в слое) позволяет непосредственно по ее величине найти вероятность выживания кванта  $\Lambda_i$ .

Уравнение (4) можно решать методом регуляризации по Тихонову [5]. Этот метод предпочтительнее потому, что регуляризация корректно учитывает погрешности измерений, и потому, что формально число неизвестных в уравнении (4) больше числа уравнений. Последнее обстоятельство не должно пугать, поскольку метод регуляризации как раз и создан для того, чтобы из бесконечного множества возможных решений (а обратные задачи всегда имеют бесконечное число решений из-за наличия погрешностей измерений) выбрать решение, обладающее необходимым физическим смыслом, и указать его погрешность.

Рассмотрим вычисление матрицы частных производных  $\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right)$ . Для ее нахождения мы применили схему зависимых испытаний метода Монте-Карло [9], которая состоит в моделировании переноса фотонов с одинаковыми последовательностями случайных чисел, но в разных моделях атмосферы, отличающихся на вариацию одного из параметров  $\Delta x_i$ , причем  $\Delta x_i$  достаточно мала. Вычислительная схема алгоритма аналогична решению прямой задачи, но для вычисления потоков применены локальные оценки.

Рассмотрение конкретного вида матриц частных производных для заданных моделей атмосферы может дать предварительный ответ на вопрос об информативности измерений. Для этого удобно использовать логарифмические производные (см. [7]), которые показывают относительное изменение потока при изменении оптических параметров. Очевидно, что можно определить только те параметры, для которых логарифмические производные больше погрешности измерений (точнее надо говорить, что их можно определить с дисперсией, меньшей чем априорная).

Вначале рассмотрим в качестве примера расчеты, выполненные для четырехслойной модели атмосферы, но с определением параметров только одного слоя. Параметры исходной оптической модели атмосферы взяты по наблюдениям 25.X 1970 г. на  $\lambda = 500$  им [1] (табл. 1).

Таблица 1

Исходная оптическая модель атмосферы

№ слоя	Верхний и нижний уровни (мб)	$\tau^0$	$Q^0$	$\Lambda^0$
1	0—400	0,26	10	0,84
2	400—700	0,23	10	0,85
3	700—900	0,18	10	0,87
4	900—1000	0,10	10	0,89

Для указанного слоя между уровнями 700 и 900 мб матрица значений логарифмических производных имеет вид

$$\left\| \frac{\partial (\lg F^\downarrow, \lg F^\uparrow, \lg \beta)}{\partial (\lg \tau, \lg G, \lg (1 - \Lambda))} \right\| \approx (0,3)^3 \left\| \begin{array}{ccc} -1 & 0,816 & -0,558 \\ 0,301 & -1 & -0,598 \\ 0,965 & -0,096 & 1 \end{array} \right\|$$

Рассмотрение этой матрицы показывает, что выходящий из слоя поток вниз оказывается наиболее информативным для определения  $\tau$ , выходящий вверх — для определения  $G$  и относительный лучистый приток — для определения  $\Lambda$ .

Данные табл. 1 были вычислены на основе результатов расчетов указанных величин в двухпоточном приближении [1] (кроме значений  $G^0$ ). Экспериментальные данные и результаты расчетов (в единицах  $F_\lambda^\uparrow(H_1)$ ) методом Монте-Карло представлены в табл. 2.

Из табл. 2 следует что, во-первых, процесс итераций сходится и, во-вторых, что даже «первое» приближение в нашем примере дает такие значения  $\{\tau_\lambda, \Lambda_\lambda, G_\lambda\}$ , с помощью которых  $\{F_\lambda^\downarrow, F_\lambda^\uparrow, \beta\}$  вычисляются с погрешностью меньшей, чем погрешность их измерений. Для упрощения анализа был

рассмотрен пример, в котором уточнялись оптические параметры одного слоя. Однако даже в этом примере при вариациях  $\{\tau_\lambda^{(0)}, G_\lambda^{(0)}, A_\lambda^{(0)}\}$  в пределах  $\pm 50\%$  падающей на верхнюю границу слоя поток  $F_\lambda^\downarrow(H_1)$  менялся в пределах  $\pm 2\%$ . Это свидетельствует о том, что поправки к исходным параметрам атмосферной модели следует находить одновременно для всех слоев, на которые разбивается атмосфера. Информативность измерений потоков для этого случая будет рассмотрена во второй части статьи.

Таблица 2

Результаты итерационного процесса для одного слоя

Величина	Эксперимент	Расчёт «нулевого» приближения	Разности «нулевого» приближения		Расчёт «первого» приближения	Разности «первого» приближения	
			абсолютные	относительные (%)		абсолютные	относительные (%)
$F_\lambda^\downarrow$	0,9042	0,9123	-0,0081	- 0,9	0,9048	-0,0006	-0,1
$F_\lambda^\uparrow$	0,1926	0,1785	+0,0141	+ 7,3	0,1900	+0,0026	+1,3
$g_\lambda$	0,0546	0,0614	-0,0068	-12,4	0,0507	+0,0039	+7,1

1. Бинейко В.И., Васильев О.Б., Виноградова И.П. и др. Полный радиационный эксперимент. Л.: Гидрометеоздат. 1976. 240 с.
2. Васильев О.Б., Гришечкин В.С., Коваленко А.П. и др. //Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука. 1987. С. 225–238.
3. Гаврилова Л.А. //Изв. АН СССР. ФАО. 1984. Т. 20. № 4. С. 269–273.
4. Мельникова И.Н., Минин И.Н. //Изв. АН СССР. ФАО. 1977. Т. 13. № 3. С. 254–262.
5. Соболев В.В. Рассеяние света в атмосферах планет. М.: Наука, 1972. 336 с.
6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М., 1979. 285 с.
7. Яновская Т.Б., Порохова Л.Н. Обратные задачи геофизики. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. 210 с.
8. Бартенева О.Д., Лактионов А.Г., Аднашкин В.К., Веселова Л.К. //Проблемы физики атмосферы. 1978. Вып. 15. С. 27–43.
9. Каргин Б.А. Статистическое моделирование поля солнечной радиации в атмосфере. Новосибирск: Наука, 1984. 206 с.
10. Михайлов Г.А. Оптимизация весовых методов Монте-Карло. М.: Наука, 1987. 239 с.

Ленинградский госуниверситет

Поступила в редакцию  
29 ноября 1988 г.

O.B. Vasiliev, A.V. Vasiliev. **Information Sufficiency in the Problems on Determining the Atmospheric Layers Optical Parameters, from Spectral Measurements of Radiation Fluxes at Different Levels in the Atmosphere.**

**Part I: Formulation of the Problem, and Results of Calculations for a Single Layer of the Multilayer Atmosphere.**

The paper deals with the estimation of information content of short-wavelengths hemispherical fluxes for restoring the corresponding vertical profiles of optical parameters of inhomogeneous atmosphere divided into several layers. Matrices of partial derivatives of these fluxes with respect to the optical parameters of the atmosphere are analyzed in the paper for the case of clear ( $\tau_0 = 0,09$ ), turbid ( $\tau_0 = 0,9$ ) and strongly turbid ( $\tau_0 = 3,5$ ) atmosphere. A quantitative criterion for assessing the information content of measurements is presented and the information base adequacy for the inverse problem solution is shown (except for the scattering phase function elongation under very clear conditions).