

О.Б. Васильев, А.В. Васильев

ИНФОРМАЦИОННАЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНЫХ СЛОЕВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ II. ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В МНОГОСЛОЙНОЙ АТМОСФЕРЕ

Описана методика линеаризации решения обратной задачи при обработке экспериментальных измерений спектральных потоков коротковолнового излучения в атмосфере с целью получения вертикальных профилей оптических параметров атмосферы: оптической толщины, вероятности выживания кванта и индикатрисы рассеяния. В качестве примера рассматривается определение методом последовательных приближений оптических параметров отдельного слоя неоднородной многослойной атмосферы. Показана быстрая сходимость решения и возможность достижения необходимой точности.

В первой части данной статьи сформулирована постановка задачи о восстановлении оптических параметров атмосферных слоев по измерениям вертикальных профилей потоков излучения, а также дан пример сходимости итерационного процесса при определении оптических параметров одного слоя в четырехслойной атмосфере.

Рассмотрим теперь возможность одновременного определения оптических параметров всех слоев атмосферы. Основным этапом при решении обратной задачи является вычисление матрицы частных производных от потоков по оптическим параметрам атмосферы. Однако прежде чем решать обратную задачу для конкретных экспериментальных данных, имеет смысл оценить информативность решения по полученной матрице частных производных. Это позволит указать, какие параметры атмосферы можно определить из результатов измерений (с дисперсией меньшей, чем априорная).

Для получения оценки информативности в случае одновременного рассмотрения нескольких слоев нами были вычислены производные для трехслойной атмосферы в трех случаях: «тонкая» $\tau_0 = 0,09$; «средняя» $\tau_0 = 0,9$ и «толстая» $\tau_0 = 3,5$. Слои были равной толщины, значения остальных параметров: $\Lambda_i = 0,9$; $G_i = 15$; $\pi S_\odot = 100$ (условные единицы); $A_0 = 30\%$; $\nu_0 = 45^\circ$. Прежде чем анализировать полученные результаты, заметим, что характерные значения изменений $\Delta\tau$ порядка 0,1; $\Delta\Lambda$ — тоже порядка 0,1; а ΔG_i — порядка 10. Поэтому если частная производная по G_i на два порядка меньше производной по τ_i или Λ_i , то по информативности их вклад одинаков. В значениях логарифмических производных (табл. 1, без указания дисперсий) это различие, очевидно, проявляется в меньшей степени. Рассмотрим подробнее все три случая.

1) «Тонкая» атмосфера, $\tau_0 = 0,09$. Наибольшие величины имеют производные падающего и восходящего потока по τ . Этого и следовало ожидать, так как от Λ и G зависит только рассеянное излучение, а его доля на границах слоев соответственно 4,8 и 12%. Что касается производных по Λ_i и G_i , то, вероятно, восстановить по ним можно только Λ_i , так как производные по G_i меньше погрешности измерений. Интересно, что восходящий поток в данном случае почти не зависит от индикатрисы, так как эта зависимость связана с рассеянием назад падающего потока, а эта доля в данном случае очень мала. Можно ожидать, что при таких малых τ_0 информативность производных по Λ и G будет возрастать с увеличением рассеяния, т.е. с увеличением ν_0 и A_0 .

2) «Средняя» атмосфера, $\tau_0 = 0,9$. Производные по τ , Λ и G от падающего потока примерно одинаково информативны (несколько больше по τ), т.е. выходящий вниз из слоя поток примерно одинаково зависит от каждой из оптических характеристик. Отметим, что во всех трех случаях матрицы производных падающего потока являются (с точностью до порядка величины) треугольными, что естественно, так как информация в падающем потоке о тех слоях, которые он еще не прошел, очень мала (она формируется за счет рассеяния назад восходящего потока, т.е. рассеяния второго и более высоких порядков малости). Что касается восходящего потока, то здесь наиболее сильная зависимость от Λ . Что касается слабой (по сравнению с Λ) зависимости восходящего потока от τ и G , то это можно объяснить наличием противоположных тенденций: с ростом τ убывание его потока уменьшает и восходящий поток на поверхности, но зато с возрастанием рассеяния назад падающего потока увеличивается восходящий поток; аналогично и с ростом G падающий поток увеличивается, а рассеяние назад уменьшается.

3) «Толстая» атмосфера, $\tau_0 = 3,5$. Информативность производных от падающего потока по τ , Λ и G также примерно одинакова, для восходящего же потока по сравнению с предыдущим случаем информативность производных по τ уменьшилась, а информативность производных по Λ и G увеличилась (особенно резко по Λ). Все матрицы производных как падающего, так и восходящего потока приобрели вид, близкий к треугольному, т.е. при таких больших τ_0 потоки в основном несут информацию об оптических характеристиках пройденных слоев. Неожиданно большими оказываются в данном случае производные по параметру G_i индикатрисы рассеяния, хотя теоретически с ростом опти-

ческой толщины зависимость от индикатрисы должна постепенно исчезать. Вероятно, отсутствие этого эффекта объясняется тем, что для сильно вытянутой индикатрисы ($G_i = 15$) $\tau_0 = 3,5$ еще достаточно малая оптическая толщина.

Таблица 1

Матрица логарифмических производных потоков по оптическим параметрам слоев

	$\partial \ln F_2^\downarrow$	$\partial \ln F_3^\downarrow$	$\partial \ln F_4^\downarrow$	$\partial \ln F_1^\uparrow$	$\partial \ln F_2^\uparrow$	$\partial \ln F_3^\uparrow$
$\tau_0 = 0,09$						
$\partial \tau_1$	-0,042	-0,039	-0,042	-0,018	-0,040	-0,044
$\partial \tau_2$	-0,002	-0,039	-0,042	-0,018	-0,006	-0,044
$\partial \tau_3$	-0,002	-0,006	-0,042	-0,018	-0,006	-0,025
$\partial \Lambda_1$	0,046	0,046	0,046	0,099	0,044	0,042
$\partial \Lambda_2$	0,001	0,049	0,050	0,103	0,097	0,042
$\partial \Lambda_3$	0,001	0,001	0,056	0,121	0,114	0,106
∂G_1	0,004	0,006	0,006	0,007	-0,002	0,003
∂G_2	0,001	0,004	0,004	0,004	-0,002	-0,003
∂G_3	0,001	0,002	0,004	0,000	-0,007	-0,002
$\tau_0 = 0,9$						
$\partial \tau_1$	-0,331	-0,511	-0,444	-0,062	-0,125	-0,111
$\partial \tau_2$	0,012	-0,511	-0,444	-0,062	-0,103	-0,111
$\partial \tau_3$	0,012	0,020	-0,444	-0,062	-0,103	0,000
$\partial \Lambda_1$	0,308	0,323	0,273	1,125	0,206	0,128
$\partial \Lambda_2$	0,040	0,485	0,433	1,076	0,563	0,174
$\partial \Lambda_3$	0,015	0,044	0,353	0,832	0,469	0,317
∂G_1	0,089	0,147	0,107	-0,114	-0,055	0,009
∂G_2	0,045	0,073	0,107	-0,016	-0,102	-0,009
∂G_3	0,000	0,034	0,134	-0,122	-0,117	-0,085
$\tau_0 = 3,5$						
$\partial \tau_1$	-2,334	-1,776	-0,708	-0,108	-0,231	-0,045
$\partial \tau_2$	-0,093	-1,776	-0,708	-0,108	-0,038	-0,045
$\partial \tau_3$	-0,093	0,148	-0,708	-0,108	-0,038	-0,029
$\partial \Lambda_1$	2,271	2,043	1,486	4,941	0,192	0,034
$\partial \Lambda_2$	0,149	2,102	1,163	1,765	0,323	0,037
$\partial \Lambda_3$	0,049	0,207	1,571	0,706	0,162	0,062
∂G_1	0,311	0,148	0,283	-0,490	-0,256	-0,021
∂G_2	0,000	0,345	0,354	-0,127	-0,385	-0,062
∂G_3	0,016	-0,205	0,283	0,000	-0,077	-0,492

Оценим теперь информативность каждого оптического параметра слоев атмосферы относительно всего комплекса измерений. Для количественной оценки информативности используем матрицу апостериорной дисперсии — матрицу Фишера (см., например, [1]).

По определению, количество информации есть логарифм отношения апостериорной и априорной дисперсий:

$$J = -\frac{1}{2} \log_2 \frac{\sigma_{i, \text{apost}}^2}{\sigma_{i, \text{apr}}^2}.$$

Апостериорная дисперсия — диагональные элементы матрицы Фишера:

$$F = (A^T \Sigma^{-1} A + D^{-1})^{-1},$$

где A — матрица частных производных; Σ — диагональная матрица априорных дисперсий. Тогда информативность i -й компоненты вектора относительно всего комплекса измерений есть

$$J_i = -\frac{1}{2} \log_2 \frac{f_{ii}}{d_{ii}},$$

где d_{ii} — диагональные элементы матрицы D , а f_{ii} — диагональные элементы матрицы F . Количество информации измеряется в битах.

Таблица 2

Количество информации (в битах) о параметрах атмосферных слоев, содержащееся во всем комплексе измерений потоков

	«Тонкая» атмосфера	«Средняя» атмосфера	«Толстая» атмосфера
τ_1	4,05	3,88	3,96
τ_2	3,02	4,32	3,91
τ_3	3,51	4,32	4,49
Λ_1	0,51	1,12	0,70
Λ_2	0,53	1,01	0,82
Λ_3	0,74	1,11	1,14
G_1	0,42	0,15	0,34
G_2	0,02	0,19	0,33
G_3	0,18	0,21	0,13

Оценим теперь количество информации в случаях пп. 1, 2, 3. Примем точность измерения потоков равной 1,5%, а в качестве априорных дисперсий выберем τ_0 для τ ; 0,25 для Λ и 15 для G , что перекрывает диапазон возможных изменений этих величин в безоблачной атмосфере.

Результаты расчетов приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что полученные оценки количества информации подтверждают изложенные выше выводы, основанные на «визуальном» анализе матриц частных производных.

Таким образом, анализ частных производных от потоков по оптическим параметрам слоев атмосферы позволяет сделать вывод о возможности определения оптических параметров атмосферы по измерениям потоков. В 3-й части работы будет рассмотрен вопрос о нахождении параметров атмосферы на основе конкретных экспериментальных данных.

Авторы выражают искреннюю благодарность н.с. Г.А. Рыжикову за весьма полезные обсуждения настоящей работы.

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.

Ленинградский госуниверситет

Поступила в редакцию
29 ноября 1988 г.

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

Part II: Estimation of the Information Content of Measurements in Multilayer Atmosphere when Optical Parameters of all the Layers are Determined Simultaneously.

A technique for linearization of the inverse problem solution is described, in application to reduction of data on short-wavelength spectral measurements in the atmosphere, aimed at obtaining vertical profiles of the atmospheric optical parameters (optical depth, photon survival probability, scattering phase function). The technique capabilities are illustrated by the data on determination of the optical parameters of a single layer of a multilayer inhomogeneous atmosphere using an iteration method. Rapid solution convergency and possibility of obtaining required accuracy are shown in the paper.