

Н.А. ВАСИЛЕНКО, К.П. ГАЙКОВИЧ, М.И. СУМИН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ ПО
НАБЛЮДЕНИЯМ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ ЗВЕЗД*(Представлено академиком А.М. Обуховым 5 IX 1985)*

В настоящей работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований возможностей восстановления высотных профилей температуры из измерений рефракции для случая наземных наблюдений светил при положительных углах места. Работа продолжает исследования дистанционных рефрактометрических методов определения параметров атмосферы Земли (см., например, [1]).

Сложность решения обратной задачи рефракции для случая наземных измерений (см. рис. 1) обусловлена качественно иным видом исходного уравнения, связывающего в приближении сферически-симметричной атмосферы рефракцию

$$(1) \quad \epsilon(x) = -x \int_{p_0}^{\infty} \frac{d \ln n}{dp} \cdot \frac{dp}{\sqrt{p^2 - x^2}}, \quad p = nr, \quad x = n_0 r_0 \cos \theta,$$

$n_0 = n(r_0)$ - приземное значение, $P_0 = n_0 z_0$, θ — угол места.

В отличие от случая космических измерений, когда соответствующее уравнение сводится к уравнению Абеля и имеет хорошо обусловленное аналитическое решение [1], в данном случае выражение (1) интегрированием по частям сводится к

$$(2) \quad \int_{p_0}^{p_H} N(p) \frac{px}{(p^2 - x^2)^{3/2}} dp = \tilde{\epsilon}(x),$$

где $N = 10(n - 1)$ — индекс рефракции, $\tilde{\epsilon}$ - модифицированная правая часть, $p_H = n(r_H)R_H$, $R_H = r + H$. Высота H выбирается такой, что вклад интеграла от p_H до ∞ меньше погрешностей измерения рефракции $\delta\epsilon$. Полученное из решения (2) распределение $N(p)$ преобразуется в высотный профиль $N(h)$, а в оптическом диапазоне из $N(h)$ можно восстановить высотные профили давления P и температуры T , используя уравнения статики и газового состояния (см. [1]).

Трудность решения (2) связана в первую очередь с тем, что это уравнение представляет собой классический пример некорректно поставленной задачи [2], для решения которой необходимо привлекать достаточно существенную априорную информацию об искомом профиле $N(p)$. При этом точность восстановления может сильно различаться для разных алгоритмов, и ее представительные оценки для конкретного алгоритма возможны лишь на основе численного эксперимента по замкнутой схеме со статистической обработкой для ансамбля реализаций [3].

Другая трудность решения задачи состоит в правильном выборе информативного диапазона углов измерения рефракции. Известно, что с ростом угла места рефракция со все возрастающей точностью определяется значением приземного индекса рефракции N_0 (так называемая "теория Лапласа").

Вариации рефракции σ_{ϵ} , обусловленные изменениями стратификации атмосферы при фиксированном N_0 , быстро уменьшаются с ростом угла места (см. табл. 1). При заданной точности измерений этот эффект приводит к ограничению сверху информативного диапазона углов. В частности, при реализуемой в настоящее время точности измерений рефракции (1-10") диапазон информативных углов $0 < \theta < 4^\circ$.

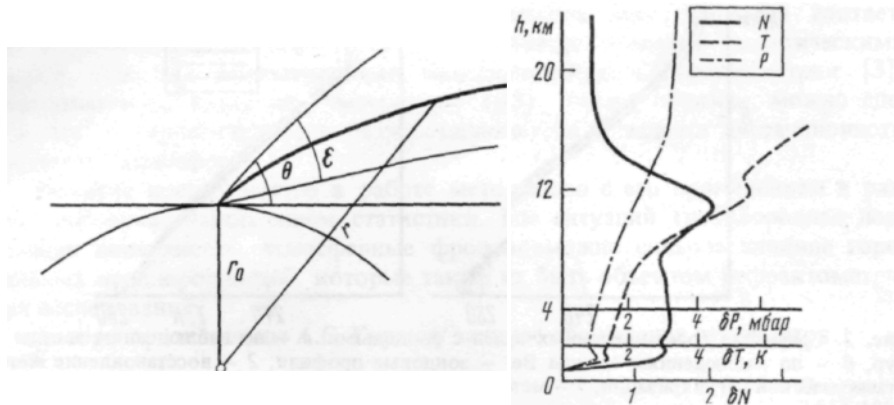


Рис. 1. Геометрия измерений

Рис. 2. Среднеквадратичные погрешности восстановления параметров атмосферы. Летний ансамбль ЕТ СССР, $\delta\epsilon = 5''$

Для решения уравнения (2) были разработаны два алгоритма. Суть первого заключается в использовании априорной информации о принадлежности точного решения к компактному классу невозрастающих функций [2].

Второй алгоритм основан на непосредственном использовании межуровневых ковариационных связей индекса рефракции в методе статистической регуляризации [4].

Численное моделирование эксперимента и статистический анализ на большом ансамбле распределений $N(p)$ показал, что точность восстановления параметров атмосферы при реализуемых точностях измерений несколько выше для метода статистической регуляризации, тогда как метод решения на компактном классе монотонных функций предпочтительнее при более высоких точностях. Представленные на рис. 2 оценки точности восстановления параметров атмосферы для метода статистической регуляризации характеризуют его эффективность и информативность рефрактометрических измерений.

Вместе с тем выполненное рассмотрение оставляет нерешенными ряд важных вопросов, связанных с практическим применением метода. В первую очередь это вопрос о роли горизонтальных неоднородностей показателя преломления в реальной атмосфере, поскольку теория строится в приближении сферически-симметричной атмосферы, а информативные измерения возможны лишь на малых углах места. Без эксперимента трудно определить роль погрешностей, вносимых турбулентными флуктуациями показателя преломления, а также некоторой его дисперсией в оптическом диапазоне.

Обычным методом экспериментальной проверки эффективности дистанционных методов определения параметров атмосферы является сопоставление восстановленных профилей с данными аэрологического зондирования. В работе использо-

Таблица 1

Средние по ансамблю значения рефракции ϵ и ее среднеквадратичные вариации при фиксированном N_0 (ансамбль - зима, ЕТ СССР)

θ	1''	1'	10'	30'	1°	2°	3°	4°	5°
ϵ	41'	41'	38'	33'	27'	20'	15'	12'	10'
σ_ϵ	43''	43''	37''	23''	12''	3,6''	1,6''	0,9''	0,5''

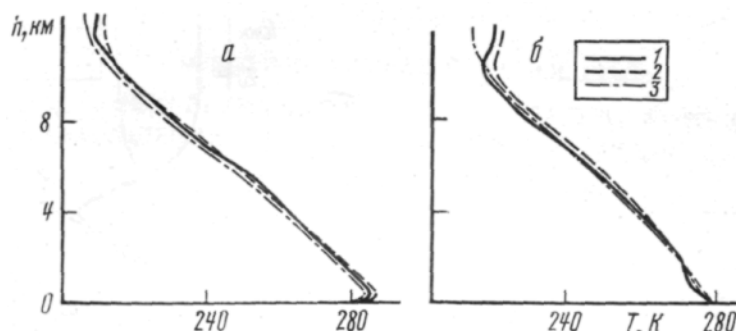


Рис. 3. Сравнение восстановленных профилей с зондовыми. *a* - по наблюдениям звезды Арктур, *b* - по наблюдениям звезды Вега. 1 - зондовые профили, 2 - восстановление методом статистической регуляризации, 3 - методом решения на множестве монотонных функций

вались результаты комплексных астрономических и аэрологических наблюдений в районе полупустыни со слегка всхолмленной глинисто-каменистой подстилающей поверхностью. Высота пункта наблюдения над уровнем моря составляла 360 м.

Рефракция с точностью 3-6" определялась из астрономических наблюдений восходящих и заходящих ярких звезд, планет и Солнца, выполненных с помощью универсального инструмента УВ 2"/2". Система аэрологического зондирования "Метеорит"-РКЗ-2 обеспечивала измерение профилей параметров атмосферы в пункте наблюдений в моменты измерения рефракции с высокой дискретизацией по высоте (через 100 м до высоты 2 км, 101 точка до 25 км). Расчеты показали, что дискретизация по высоте вполне достаточна для точного интегрирования. При восстановлении вместо реального профиля влажности в выражение для показателя преломления и в барометрическую формулу подставлялся модельный профиль влажности, экспоненциально убывающий от приземного значения с характерным масштабом 3 км.

В табл. 2 представлены два примера сравнения измеренных значений рефракции с вычисленными по данным одновременного аэрологического зондирования для наблюдений звезд Арктур и Вега.

На рис. 3 представлены восстановленные по значениям $\epsilon_{изм}$ из табл. 2 профили температуры вместе с соответствующими зондовыми профилями.

Результаты обработки экспериментальных данных показывают, что точность измерений рефракции, точность расчета ядра интегрального уравнения и степень соответствия реальной атмосферы сферически-симметричному приближению удов-

Таблица 2

Сравнение измеренных ($\epsilon_{изм}$) и рассчитанных по аэрологическим данным ($\epsilon_{расч}$) значений рефракции

Наблюдения звезды Арктур			Наблюдения звезды Вега		
θ	$\epsilon_{изм}$	$\epsilon_{расч}$	θ	$\epsilon_{изм}$	$\epsilon_{расч}$
1°30'26"	1238"	1241"	59'57"	1444"	1443"
2°00'44"	1077"	1078"	1°29'59"	1242"	1241"
2°30'23"	944"	949"	2°29'50"	952"	954"
3°00'29"	849"	846"	2°59'53"	852"	851"
3°30'23"	760"	761"	3°29'57"	762"	765"

летворяют сформулированным требованиям. Точность восстановления соответствует теоретическим оценкам (рис. 2) и сравнима с лучшими теоретическими оценками точностей восстановления методами наземной СВЧ-радиометрии [3]. Восстанавливаются инверсии температуры (рис. 3). Таким образом, можно сделать вывод о перспективности разработанного метода в задачах дистанционного зондирования атмосферы.

Развитие предлагаемого в работе метода связано с его применением в различных условиях, накоплением статистики. В ряде ситуаций (неоднородная подстилающая поверхность, атмосферные фронты) возможно сильное влияние горизонтальных неоднородностей, которые также могут быть объектом рефрактометрических исследований.

Авторы признательны А.С. Гурвичу за полезное обсуждение результатов.

Главная астрономическая обсерватория
Академии наук УССР
Киев
Горьковский научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступило
24 IX 1985

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурвич А.С., Кан В., Попов Л.И. и др. - Изв. АН СССР. ФАО, 1982, т. 18, № 1, с. 3.
2. Тихонов А.Н., Гончаровский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983.
3. Gaikovich K.P., Markina N.N., Naumov A.P. et al. - Intern. J. Remote Sensing, 1983, vol. 4, № 2, p. 419.
4. Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М.С. - УФН, 1970, т. 102, вып. 3, с. 345.