

УДК (551.501.724+551.501.74) :525.73

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕТЕОПАРАМЕТРОВ ИЗ КОСМОСА**

ГАЙКОВИЧ К. П., НАУМОВ А. П.

Введение. Одним из новых научных направлений дистанционного зондирования атмосфер, быстро и успешно развивающимся в последнее время, является получение оперативной информации о тонкой структуре метеорологических элементов по рефракционным характеристикам оптического излучения астрономических объектов (Солнца, Луны и звезд). Принципиальные возможности оценки структуры атмосферы по спутниковым данным о рефракции отмечались еще в [1], но особенности детального влияния атмосферной рефракции на изображения Солнца и Луны, приводящие к появлению возмущений — «ступенек» — на краю видимого сплющенного диска светил, а порой — и к разрывам изображений, впервые наблюдались с борта орбитальной станции «Салют-6» Ю. В. Романенко, Г. М. Гречко [2]¹.

Достаточно подробная (качественная и количественная) интерпретация возмущенных рефракцией изображений Солнца, полученных из космоса, которая включает в себя построение моделей соответствующих высотных профилей температуры, оценку вариаций высотного хода рефракции, восстановление возмущения профилей плотности и температуры по фотоснимкам и киносъемкам, изложена в работах [2, 4—11]. В [2, 4—6, 8—10] получено весьма полное решение задачи по восстановлению мелкомасштабных возмущений вертикальных профилей плотности и температуры воздуха из результатов измерений рефракции с ИСЗ. Обращение задачи в указанных работах выполнялось с помощью преобразования, обратного преобразованию Абеля.

Тем не менее, дополнительные исследования ряда аспектов данной задачи могут быть полезными для дальнейшего выяснения физической сути проблемы и для практического использования результатов. К таким аспектам следует отнести прежде всего статистический подход и моделирование решения задачи для оценок реальных ошибок восстановления метеорологических элементов. Так, в работе [9] получено удобное выражение для погрешности определения показателя преломления n рефрактометрическим методом при заданной дискретизации восстановления и известной погрешности измерения рефракции. Однако получение аналогичных выражений для погрешностей восстановления температуры и давления затрудняется интегральным характером связи между метеопараметрами и n (через плотность воздуха). Достоинство численного эксперимента состоит в том, что он позволяет отдельно оценить ошибки восстановления каждого метеозлемента. Подобные исследования могут быть выполнены при моделировании космического рефракционного эксперимента на ансамбле дан-

¹ Характерные цветные фотографии возмущенного изображения Солнца, полученные Г. М. Гречко, воспроизводятся в [3].

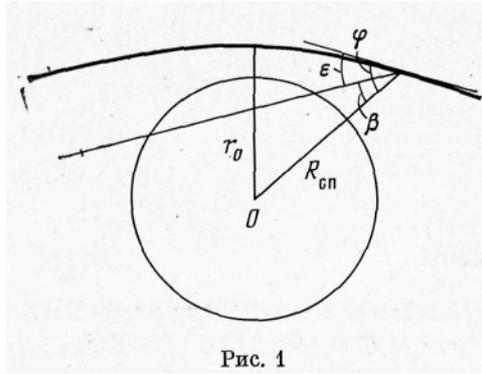


Рис. 1

Рис. 1. Геометрия лучей рефракционного эксперимента с ИСЗ

Рис. 2. Изображение Солнца, видимого через атмосферу Земли. Моделирование космического эксперимента выполнено для высотных профилей температуры T (сплошная линия) и показателя преломления $N=(n-1)\cdot 10^6$ (пунктир), которые представлены в правых частях рисунков (а и б)

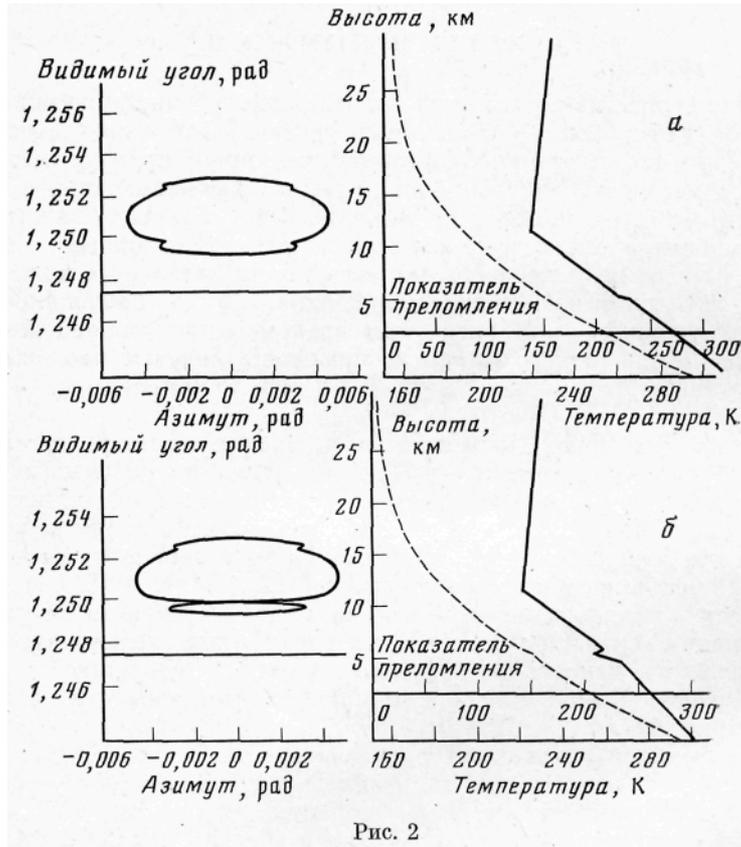


Рис. 2

ных метеорологического зондирования атмосферы за несколько лет наблюдений. Решение упомянутой задачи приведено в данной статье.

Моделирование космического рефракционного эксперимента. Моделирование космического рефракционного эксперимента осуществлялось нами для параметров орбиты станции, приведенных в [2]. Ход лучей для этого случая приведен на рис. 1, на котором φ и β обозначают соответственно видимый и истинный угол источника, угол рефракции $\varepsilon = \varphi - \beta$, $R_{\text{сп}}$ и r_0 — радиус-вектор станции и перигей луча. При моделировании эксперимента использовался статистический ансамбль метеорологических данных, описанный в [12, 13]. Этот ансамбль включает в себя ~ 100 результатов аэрологического зондирования атмосферы в течение 4 лет для среднесезонного летнего месяца — июля на территории центральной части Европейской территории СССР.

В целях проверки эффективности моделирования различные распределения температуры атмосферы сопоставлялись вначале с искажениями видимого диска Солнца при заходе, которые воспроизводились на графопостроителе ЭЦВМ (БЭСМ-6). Формулы, связывающие изображения лимба Солнца с профилем показателя преломления атмосферы, приведены, например, в [2]: каждая точка на изображении имеет ординату φ и абсциссу, определяемую β и угловым диаметром Солнца.

Проведенный статистический численный эксперимент позволил выявить следующие физические стороны явления: 1) любые сколько-нибудь заметные изменения градиента температуры dT/dh (не обязательно связанные с температурными инверсиями) приводят к заметным искажениям диска (рис.2, а); 2) положительные изменения dT/dh могут приводить к разрывам в изображениях (рис.2, б), тогда как отрицательные изменения делают изображения более выпуклыми; 3) условия для образования разрывов более благоприятны, когда в области высот с изменениями градиента формируется изображение части диска, близкой к верхнему или нижнему его краю.

Динамику явления наглядно можно представить при рассмотрении, например, восхода звезды (точечного источника излучения) в то время, когда в атмосфере существуют изменения температурного градиента. На рис. 3 представлен путь поднимающейся звезды для одного из сложных температурных профилей (из числа данных, входящих в используемый статистический массив). При входе звезды и область с инверсией температуры вспыхивает ее второе изображение, которое в свою очередь разделяется на два изображения — верхнее из них продолжает подниматься, а нижнее опускается. В этот момент видны три изображения одной звезды. Затем два нижних изображения сливаются в одно и исчезают, а верхнее продолжает свое движение.

Подобная ситуация имеет место при наличии разрывов и на солнечном изображении. Поскольку поперечный масштаб Солнца не искажается рефракционными эффектами в земной атмосфере, то любой точке нижнего (если разрыв снизу) края Солнца, отстоящей на определенное расстояние по азимуту от центра диска, соответствуют три точки на том же расстоянии на разорванном изображении. Динамика разрыва в этом случае аналогична динамике изображения восходящей звезды.

Мы сравнительно подробно остановились на некоторых аспектах интерпретации влияния атмосферной рефракции на оптические изображения астрономических объектов потому, что изложенные обстоятельства дополняют общую физическую картину явления, основные черты которого описаны в [2, 4-6, 8-10].

В плане постановки обратной задачи определения метеорологических элементов атмосферы по рефракционным характеристикам заметим, что наблюдаемую для звезды или Солнца зависимость $\varphi(\beta)$ можно в принципе обратить как $\beta(\varphi)$, и, что особенно важно (рис.2, б, это, в частности, иллюстрирует), указанная зависимость оказывается однозначной и непрерывной, несмотря на неоднозначность и разрывность наблюдаемого процесса. Отмеченное обстоятельство является существенной предпосылкой для постановки соответствующей обратной задачи.

Численное решение обратной задачи. На практике при решении обратной задачи обычно рассматривается зависимость $\varepsilon(\varphi)$. Углы ε и φ являются функциями прицельного параметра луча r_0 (см. рис. 1) и для сфе-

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{n_0 r_0}{nr} \right),$$

$$\varepsilon = -2n_0 r_0 \int_{r_0}^{\infty} \frac{dn}{dr} \cdot \frac{dr}{n \sqrt{(nr)^2 - (n_0 r_0)^2}}.$$

(4)

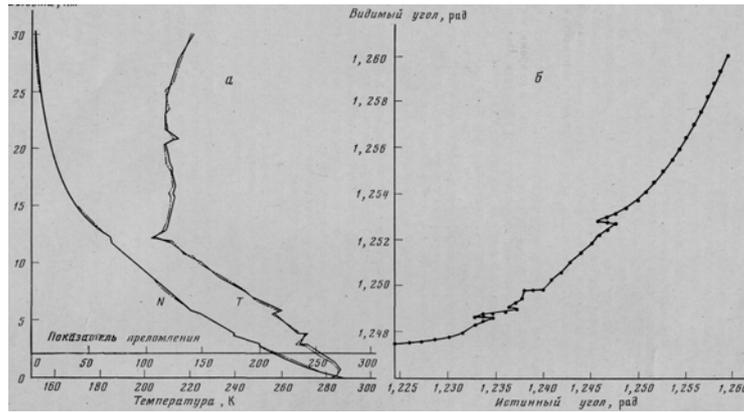


Рис.3. Пример динамики изображения поднимающейся звезды (*б*) для сложного температурного профиля *T* и соответствующего ему профиля показателя преломления $N=(n-1)10^{-6}$ (сплошные кривые), представленных на рис. *а*. Пунктирные кривые *T* и *N* дают результаты восстановления указанных величин в модельном эксперименте при относительной ошибке измерений угла рефракции $\delta\varepsilon=2\%$.

Здесь n — показатель преломления атмосферы, $n_0 = n(r=r_0)$. Известно, что в оптическом диапазоне

$$n = 1 + K(\lambda) \frac{P}{T}, \quad (2)$$

до зависимость коэффициента K от длины волны λ выражена слабо и на фиксированных волнах соотношение (2) имеет вид

$$n = 1 + \text{const} \cdot \frac{P}{T}. \quad (3)$$

В (2), (3) P — атмосферное давление.

Во введении уже упоминалось, что в работах [5, 8, 9] уравнения (1) сводились к интегральному уравнению типа Абеля, которое разрешимо по отношению к $n(r_0)$. Поскольку, однако, целью данного раздела статьи является получение статистических оценок точности решения задачи в зависимости от точности измерений рефракции ε на ансамбле метеорологической статистики $n(r)$, а последняя задается результатами расчетов n по данным аэрологического зондирования атмосферы в численной форме, то мы использовали в настоящей работе численные методы и для решения обратной задачи (1).

Система (1) решалась методом последовательных приближений. В качестве начального приближения использовался средний профиль $\langle n(r) \rangle$

и при подстановке его в выражение для φ и ε (dN/dr) считалось искомым ве-

$$\int_{r_0}^{\infty} \frac{dn}{dr} F_0(r_0, r) dr = \varepsilon_0(r_0), \quad (4)$$

где $F_0 = -2n_0 r_0 \langle n \rangle^{-1} [(\langle n \rangle r)^2 - (n_0 r_0)^2]^{-1/2}$ — ядро интегрального уравнения Вольтерра 1-го рода. Заметим, что $F_0(r_0, r_0) = \infty$, т. е. основной вклад в интеграл вносит производная dn/dr вблизи $r = r_0$, что поясняет разрешимость уравнения (4).

Схема решения обратной задачи включала в себя: 1) численное решение уравнения (4) относительно dn/dr ; 2) определение $n(r_0)$ по известным

значениям dn/dr и $n(\infty)$; 3) уточнение численных значений φ и ε (формулы (1)) по полученному значению $n(r_0)$; 4) повторение процедур 1—3 для получения последующих приближений $n(r_0)$; 5) определение профиля атмосферного давления $P(r_0)$ с помощью высотного градиента dP/dr_0 , который находился из барометрической формулы

$$\frac{dP}{dr_0} = - \frac{g}{R_B} \cdot \frac{P}{T}, \quad (5)$$

имеющей с учетом (3) вид:

$$\frac{dP}{dr_0} = \text{const} \cdot (n - 1) \quad (6)$$

и условия $P(\infty)=0$; 6) определение высотного профиля температуры $T(r_0)$ из соотношения (3) по известным значениям $n(r_0)$ и $P(r_0)$.

Численный эксперимент включал в себя решение прямой (вычисление ε и φ по известным метеоданным) и обратной (восстановление профилей

га, P , T по зависимости ε (φ) задач. На вычисляемое при решении прямой задачи для каждого использованного метеорологического зонда «истинное» значение рефракции ε набрасывалась некоррелированная по высоте случайная ошибка с помощью датчика случайных чисел в ЭЦВМ с нормальным распределением, дисперсия которого равна квадрату моделируемой среднеквадратичной ошибки измерения, а среднее значение равно нулю. Заметим, что, поскольку численное решение осуществлялось, естественно, с дискретным шагом ($\sim 0,1$ — $0,7$ км) по высоте, то термин «некоррелированная ошибка» используется для дискретной величины.

В результате выполненных статистических исследований было получено, что при постоянной относительной ошибке измерений рефракции погрешности восстановления температуры и давления не зависят от высоты и пропорциональны ошибке измерений:

$$6\Gamma(\text{Я}) = \text{Я} \cdot 6\varepsilon(\%), \quad 6P(\%) = \text{Я} \cdot 6\varepsilon(\%). \quad (7)$$

где коэффициенты трансформации ошибок в средних широтах составляют соответственно $K_T = 0,8$ и $K_P = 0,3$. При $6\varepsilon \rightarrow 0$ решение сходится к точному решению. Эти особенности решения показывают хорошую обусловленность обратной задачи в рамках рассмотренной схемы ее постановки, адекватность восстановления метеопараметров из рефрактометрических наблюдений продемонстрирована рядом натуральных примеров, рассмотренных в [4, 8—11]. Однако имеющиеся пока проблемы в привязке космических измерений к существующей метеорологической сети [9] затрудняют оценки реальной точности метода. Но последние, как видно из рассмотренного примера, сравнительно несложным путем получаются из результатов статистического моделирования.

Из (7) можно сделать выводы, что при ошибке измерений $\delta\varepsilon \sim 1\%$ обеспечивается весьма хорошая точность восстановления метеорологических элементов. Практический интерес представляют, по-видимому, измерения, выполненные с погрешностью меньше 7%, так как большие ошибки приводят к отклонениям в восстановлении температуры, превышающим среднеквадратичные вариации. На рис. 3 приведен пример восстановления профилей $N = (n - 1) \cdot 10^6$ и T из моделируемых наблюдений восходящей звезды с погрешностью $\delta\varepsilon = 2\%$.

Однако практические измерения обычно сопровождаются погрешностями (инструментальными ошибками), которые характеризуются постоянством дисперсий. Поскольку рефракция с ростом высоты экспоненциально стремится к нулю, то относительная погрешность при постоянной абсолютной дисперсии будет неограниченно возрастать, что приведет к росту ошибок решения уравнения (1). Устойчивость решения обратной задачи в этом случае обеспечивается, например, дополнением с некоторой высоты h_M результатов аэрологического зондирования, которые используются в численном эксперименте, данными стандартной модели атмосферы. Такой прием дополнения рассматриваемой модели атмосферы был использован и в [4]. В качестве высоты h_M мы принимали высоту, на которой среднеклиматические вариации метеоэлементов сравнимы с погрешностями их восстановления. При этом говорить о восстановлении метеоэлементов имеет смысл, разумеется, только на высотах $h < h_M$, и относительная погрешность решения на самом деле возрастает с увеличением высоты h (по мере приближения к высоте h_M). Упомянутые обстоятельства также получили количественное подтверждение в проведенных статистических экспериментах.

Горизонтальное разрешение метода определяется угловым разрешением измерений, поскольку основной вклад в рефракцию вносит слой, прилегающий к высоте, соответствующей прицельному параметру (см. выше) и при шаге восстановления по высоте $\Delta H \sim 500$ м масштаб горизонтального осреднения составляет десятки километров. В связи с этим обстоятельством мы еще раз подчеркиваем, что обратная задача по восстановлению

метеоэлементов из рефракционных данных всеми авторами (включая и приведенные результаты) до сих пор решалась в приближении сферической симметрии земной атмосферы. Если не задаваться этим условием, то постановка соответствующей обратной задачи существенно усложняется (см., например, [14]). Предварительные оценки возможных горизонтальных неоднородностей атмосферы выполнены в [15], но в целом определение влияния горизонтальных неоднородностей на рефракционные измерения требуют дополнительных исследований.

Выполненные исследования и, в частности, статистические оценки (7) ошибок восстановления подтверждают вывод [2, 4] о новых возможностях определения метеоэлементов рефрактометрическими методами по сравнению с другими дистанционными методами (радиотеплолокационными, лазерными и т. д.). Немаловажным обстоятельством является и то, что рассмотренные возможности характеризуют еще один независимый метод определения метеорологических параметров, и, таким образом, при комплексном подходе к решению проблемы дистанционного зондирования атмосферы с учетом полученных результатов становятся возможными оценки абсолютных точностей различных оперативных методов измерения метеоэлементов (температуры, давления) по методике, примененной, например, в [16]. Анализ возможностей определения метеоэлементов из внутриатмосферных измерений (включая и малые высоты наблюдений ~100—150 м) оптической рефракции космических источников выполнен в [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Jones L. M., Fischbach F. F., Peterson J. M. Satellite measurements of atmospheric structure by refraction.- *Planet. Space Sci.*, 1962, v. 9, № 3, p. 351-352.
2. Гречко Г. М., Гурвич А. С., Романенко Ю. В. и др. Вертикальная структура температурного поля в атмосфере по наблюдениям рефракции с орбитальной станции «Салют-6».- Докл. АН СССР, 1979, т. 248, № 4, с. 828-831.
3. *Pure and Applied Geophysics (Paheorph.)*, 1980, v. 118, № 1/2.
4. Гречко Г. М., Гурвич А. С., Обухов А. М. и др. Использование рефрактометрической информации при зондировании атмосферы из космоса. Препринт № 13.— В кн.: Матер. семинара «Атмосфера — океан — космос». М., 1981. 20с.
5. Гречко Г. М., Гурвич А. С., Ляхов В. А. и др. Результаты исследования рефракции в третьей экспедиции на орбитальной станции «Салют-6».— Изв. АН СССР. Физика атм. и океана, 1981, т. 17, № 11, с. 1123-1133.
6. Гречко Г. М., Гурвич А. С., Романенко Ю. В. и др. Слоистая структура температурного поля в атмосфере по измерениям рефракции с орбитальной станции «Салют-6».- Изв. АН СССР. Физика атм. и океана, 1981, т. 17, № 2, с. 115-122.
7. Гречко Г. М., Романенко Ю. В. О горизонтальной неоднородности поля яркости атмосферы Земли.— В кн.: Исследования атмосферно-оптических явлений с борта орбитальных научных станций «Салют-4, -6». Тарту: Изд-во АН ЭССР, 1979, с. 122-132.
8. Гурвич А. С., Кан В., Попов Л. И. и др. Восстановление профиля температуры в атмосфере по киносъемке Солнца и Луны с орбитальной станции «Салют-6».— Изв. АН СССР. Физика атм. и океана, 1982, т. 18, № 1, с. 3-7.
9. Соколовский С. В. О восстановлении возмущений профиля плотности в атмосфере по измерениям рефракции с ИСЗ.— Изв. АН СССР. Физика атм. и океана, 1981, т. 17, № 6, с. 574-579.
10. Соколовский С. В. Исследование возможности определения параметров атмосферы рефрактометрическими методами: Дис. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. М.: ИФА АН СССР, 1981. 108 с.
11. Гурвич А. С., Кан В., Попов Л. И. и др. Киносъемка из космоса заходов Лупы как способ изучения атмосферы Земли.— Исслед. Земли из космоса, 1981, № 6, с. 58-62.
12. Наумов А. П. О статистической структуре распределения радиометеорологических характеристик.— Изв. АН СССР. Физика атм. и океана, 1979, т. 15, № 2, с. 175-186.
13. Гайкович К. П. Об использовании измерений теплового радиоизлучения атмосферы для определения рефракции радиоволн.— Изв. вузов. Радиофизика, 1980, т. 23, № 7, с. 782-788.
14. Иванов В. М., Лукин Д. С. Решение обратной задачи радиопросвечивания атмосферы с учетом формы планеты.— Космич. исслед., 1981, т. 19, № 1, с. 120—124.
15. Гурвич А. С., Загоруйко С. В., Кан В. и др. Структура неоднородностей температуры по наблюдениям атмосферной рефракции с орбитальной станции «Салют-6».- Докл. АН СССР, 1981, т. 259, № 6, с. 1330-1333.