

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

Препринт № 153

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ
ИЗ ВНУТРИАТМОСФЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ
РЕФРАКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

К.П.ГАЙКОВИЧ

А.С.ГУРВИЧ

А.П.НАУМОВ

Горький 1982

Исследованы физические и математические аспекты постановки и решения обратной рефрактометрической задачи - восстановления профилей показателя преломления и метеопараметров по внутриатмосферным измерениям оптической рефракции внеземных источников. Показано, что если наблюдатель находится внутри атмосферы, то обратная задача хорошо обусловлена при отрицательных углах места и математически некорректна при положительных углах. С помощью численного моделирования рефракционного эксперимента на ЭЦВМ исследована возможность восстановления вертикальных профилей температуры, давления и даны оценки ошибок решения соответствующей обратной задачи. Показано, что в сферически-слоистой атмосфере сильные искажения изображения Солнца на восходе (закате) наблюдаются при отрицательных углах места и отображают структуру температурного поля ниже точки наблюдателя.

1. Введение⁺)

Наблюдая Солнце над горизонтом, можно отметить деформации диска, вызванные рефракцией. Большое количество фотографий заходов Солнца получено с помощью хорошего телескопа с фокусом 6 м в обсерватории Капель-Гандольфо [1]. Обсерватория расположена на высоте 435 м над уровнем моря, в 20 км от берега Средиземного моря. Дальность горизонта при наблюдении захода составляла около 100 км.

Если не принимать во внимание редко встречающиеся условия волноводного распространения [2, 3], то для описания рефракционных эффектов, наблюдающихся при малых углах места светила, можно, по-видимому, воспользоваться теорией рефракции в приближении сферически симметричной атмосферы. В этом приближении считается, что показатель преломления n в области, где влияние атмосферы на искривление световых лучей существенно, зависит только от расстояния r от центра планеты: $n = n(r)$.

Для сферически симметричной атмосферы может быть поставлена обратная задача — по измерениям углов рефрак-

⁺) Работа выполнена в Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ, г. Горький) МВССО РСФСР и в Институте физики атмосферы (ИФА, г. Москва) АН СССР. Результаты работы частично были доложены на совместном (ИФА АН СССР и Морского гидрофизического института АН УССР) научном семинаре "Учет атмосферных факторов в задачах гидрофизики" (г. Севастополь, июнь 1981 г.)

нии ε определить зависимость $n(r)$. Постановка обратной задачи представляет интерес для метеорологии, физики атмосферы, оперативного определения характеристик распространения электромагнитных волн различных диапазонов, так как индекс рефракции $N = (n - 1) \cdot 10^6$ в оптической и инфракрасной областях спектра пропорционален плотности воздуха ρ :

$$N = A_\lambda \rho, \quad (1)$$

где A_λ — коэффициент, слабо зависящий от длины волны [4]: для $\lambda = 0,6$ мкм $A_\lambda = 2,25 \cdot 10^5 \text{ г}^{-1} \text{ см}^3$. Таким образом; измерения рефракции открывают новые возможности дистанционного зондирования атмосферы, что было продемонстрировано результатами экспериментов по измерениям на ДОС "Салют - 6" [5, 6].

В данной работе поставлены и решаются прямая и обратная задачи об условиях наблюдений мелкомасштабных возмущений вертикальных профилей плотности, температуры и давления воздуха из результатов аналогичных рефракционных измерений с поверхности Земли и с различных высот, включая наблюдения с малых высот $\sim 10 + 500$ м. В качестве метода исследования в работе использовалось численное моделирование рефрактометрического эксперимента по наблюдениям восхода Солнца в оптическом диапазоне волн. В статье исследован также вопрос о математической корректности обратной задачи рефракции при различных условиях наблюдения (выше и ниже уровня наблюдателя, находящегося внутри атмосферы).

2. Основные соотношения для атмосферной рефракции.

Геометрия хода лучей для рассматриваемой задачи изображена на рис. 1. Если поле показателя преломления обладает сферической симметрией $n = n(r)^+$, то для каждого луча можно записать закон Снеллиуса в форме [7]

$$rn(r) \sin \varphi = \rho = \text{const}, \quad (2)$$

^{+) О выполнении данного условия см. [8].}

где $\varphi = \varphi(r)$ - зенитный угол луча.

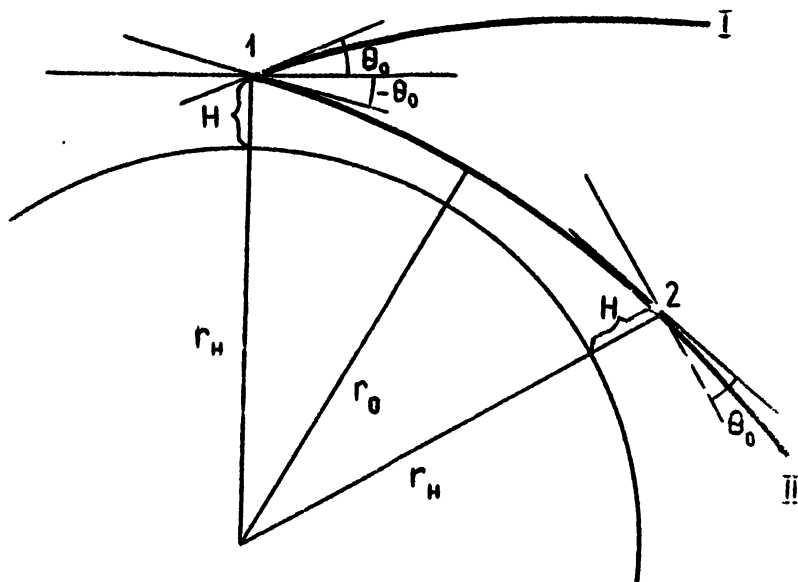


Рис. 1. Геометрия лучей рефракционного эксперимента с высот внутри атмосферы.

А) Рассмотрим сначала наблюдения рефракции при положительных углах места θ_0 в точке наблюдения r_H , $\theta_0 = \pi/2 - \varphi(\vec{r}_H)$. Этому случаю соответствует луч I на рис. 1. Наблюдаемый угол рефракции ϵ_+ для каждого θ_0 может быть вычислен по формуле

$$\epsilon_+ = -\rho \int_{r_H}^{\infty} \frac{d \ln n}{dr} \frac{dr}{[(nr)^2 - \rho^2]^{1/2}}, \quad \rho = r_H n(r_H) \cos \theta_0. \quad (3)$$

Уравнение (3) связывает измеряемый угол рефракции $\varepsilon(\rho)$ и неизвестный вертикальный профиль $n(r)$. Если одновременно с величиной рефракции измерить в точке наблюдения значение $n(r_H) = n_H$ и считать известным r_H , то решение уравнения (3) даст искомый профиль $n(r)$.

Интегрируя (3) по частям, получаем после замены переменной интегрирования $r n(r) = x$ уравнение

$$\frac{\varepsilon_+(\rho)}{\rho} - \frac{\ln n_H}{(r_H^2 n_H^2 - \rho^2)^{1/2}} = - \int_{r_H n_H}^{\infty} \frac{x \ln n(x)}{(x^2 - \rho^2)^{3/2}} dx, \quad (4)$$

которое является интегральным уравнением Фредгольма первого рода относительно неизвестной функции $\ln n(x) \approx 10^{-6} N(x)$. Однако решение этого уравнения является типичной некорректной (в классическом смысле) задачей [9]. Для решения (4) необходимо прибегнуть к тому или иному способу регуляризации. Отсутствие заметного влияния температурной стратификации на изображение Солнца в этом случае (см. разд. 3 настоящей статьи) подчеркивает трудности решения уравнения (4).

Заметим, что близкая по геометрии лучей и исходным уравнениям, хотя и не совсем подобная рассмотренной в данной работе, задача определения вертикальных профилей показателя преломления в планетных атмосферах при бистатической радиолокации планет (для положительных углов зондирования) обсуждалась в [10]. Поэтому все сделанные выше замечания о характере обратной рефракционной задачи при положительных углах зондирования в полной мере относятся и к постановке задачи в [10].

Существенно отметить, однако, то обстоятельство, что даже незначительный подъем пункта наблюдения (хотя бы на несколько метров) может позволить проводить наблюдения рефракции при отрицательных углах места, при которых возможна принципиально другая ситуация.

Б) Геометрия наблюдений внутритмосферной рефракции при отрицательных углах места ($\theta_0 < 0$) представлена на

рис. 1 лучом II.

Для углов $\theta_0 < 0$ угол рефракции ε может быть вычислен по формуле:

$$\varepsilon_- = -2\rho \int_{r_0}^{r_H} \frac{d \ln n(r)}{dr} \frac{dr}{[(nr)^2 - \rho^2]^{1/2}} - \rho \int_{r_H}^{\infty} \frac{d \ln n(r)}{dr} \frac{dr}{[(nr)^2 - \rho^2]^{1/2}}, \quad (5)$$

где $n = n(r_0)$, $r_0 < r_H$, $\rho = r_0 n_0 = r_H n_H \cos \theta_0$.

В правой части (5) стоит два слагаемых. Первое — описывает рефракцию луча на пути между точками 1 и 2, где $r \leq r_H$, второе — на остальном участке, где $r > r_H$. Второе слагаемое в (5) совпадает с (3), и это является следствием симметрии лучей относительно точки поворота $r = r_0$. Поэтому, при рассмотрении (5), как уравнения для определения $n(r)$ по измерениям $\varepsilon(\rho)$ для $\theta_0 < 0$ и при значениях ρ , приходящихся на интервал $r_0 \leq r \leq r_H$, становится очевидным, что второе слагаемое в этом уравнении может быть получено из измерений рефракции при $\theta_0 > 0$. Следовательно, для нахождения $n(r)$ для $r_0 \leq r \leq r_H$ необходимо решить уравнение

$$\frac{\varepsilon_-(\rho) - \varepsilon_+(\rho)}{2\rho} = - \int_{\rho}^{r_H n_H} \frac{d \ln n(x)}{dx} \frac{dx}{(x^2 - \rho^2)^{1/2}}, \quad x = r n(r). \quad (6)$$

В отличие от (4) уравнение (6) есть уравнение Вольтерра и элементарными преобразованиями оно может быть сведено к уравнению Абеля [11]. Точное решение (6) выражается следующей формулой:

$$\ln \left[\frac{n(x)}{n_H} \right] = \int_x^{r_H n_H} \frac{\varepsilon_-(\rho) - \varepsilon_+(\rho)}{(\rho^2 - x^2)^{1/2}} d\rho, \quad r = \frac{x}{n(x)}. \quad (7)$$

Имея точное решение, легко убедиться, что малые ошибки измерений ε приводят к малым же ошибкам в получаемых из (7) значениях n . Кроме того, при уменьшении радиуса корреляции погрешностей измерений ε погрешность восстановленных значений n так же убывает. Это позволяет сделать вывод, что задача восстановления показателя преломления из измерений рефракции космических источников при отрицательных углах места является хорошо обусловленной. Следовательно, наблюдения при $\theta_0 < 0$ могут позволить хорошо восстанавливать тонкую структуру вертикальных профилей $n(r)$, однако только для высот, меньших высот точки наблюдений.

Отметим также, что при высотах наблюдения ~ 100 м, когда изображение Солнца находится как при положительных так и при отрицательных углах места, и для всех точек изображения при $\theta_0 < 0$ имеются соответствующие точки изображения при равных по абсолютной величине, но положительных значениях θ_0 , представляется возможным определить разность $\varepsilon_- - \varepsilon_+$ для выражения (6) из одной фотографии по формуле

$$\varepsilon_-(\theta_0) - \varepsilon_+(\theta_0) = \sqrt{d^2 - a^2} + \sqrt{d^2 - b^2} - 2\theta_0, \quad (8)$$

где d — угловой радиус Солнца, a и b — отсчитываемые от центра диска абсциссы точек изображения, соответствующие положительным и отрицательным углам θ_0 . В этом случае не нужно определять порознь абсолютные значения ε_+ и ε_- , что требует достаточно точной временной привязки измерений и сказывается на общей точности результатов. В данной ситуации для восстановления метеозлементов до уровня по-

верхности необходимо, чтобы Солнце касалось горизонта.

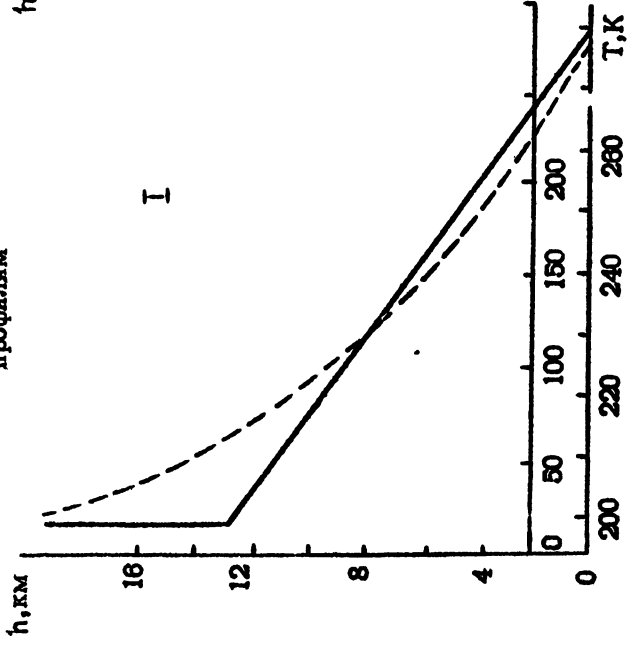
Метод оперативного определения метеорологических элементов, основанный на внутриатмосферных наблюдениях оптической рефракции, может быть весьма полезным, например, при исследовании приводного слоя атмосферы в океане, особенно для малых высот над поверхностью воды.

3. Количественные результаты решения обратной рефракционной задачи

Численные эксперименты на ЭЦВМ позволили получить наглядное подтверждение приведенных выше общих результатов. При моделировании рефракционного эксперимента использовались профили температуры как близкие к стандартному профилю (см. рис. 2-1), так и профили с различными инверсиями, включая и небольшие инверсии на высотах $\sim 250 + 400$ м (рис. 2-II). В метеорологических реализациях, изображенных на рис. 2, давление у поверхности составляло 1000 мб. Для всех данных были рассчитаны вертикальные профили индекса рефракции N в оптическом диапазоне длин волн по формуле (1). По результатам расчетов N для наглядности были построены изображения (рис. 3) самого яркого внеземного источника света — Солнца на восходе для наблюдателей, расположенных на высотах $H = 500$ м — выше инверсии (наблюдатель А) и $H = 25$ м — ниже инверсии (наблюдатель В). Изображения Солнца воспроизводились на графопостроителе ЭЦВМ (БЭСМ-6).

Сравнение изображений (рис. 3) показывает, что картина, которую должен наблюдать А, резко отличается от той, которую может видеть В. Наблюдатель А легко может отметить разницу между гладким профилем и профилем с наличием инверсии, тогда как для В картины являются почти неразличимыми. Этот результат наглядно демонстрирует и разницу в чувствительности рефрактометрических измерений к вариациям показателя преломления при наблюдениях при положительных и отрицательных углах места. Полученные данные свидетельствуют о том, что при наблюдениях при положительных углах места не фиксируются какие-либо особен-

10 Профили T, N , близкие к стандартным: профилям



Профили T, N при наличии небольшой приземной инверсии температуры

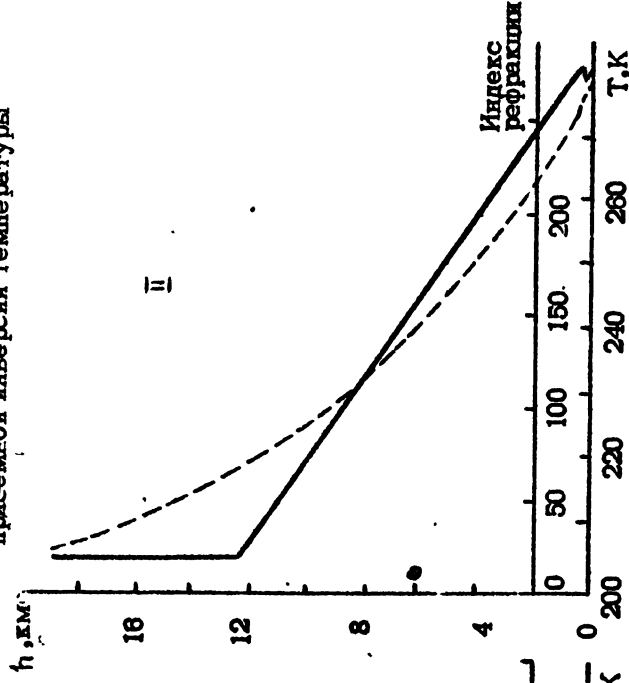


Рис. 2 Примеры высотных зависимостей температуры T (сплошные кривые) и индекса рефракции $N = (n - 1) \cdot 10^6$ в оптическом диапазоне (пунктирные кривые)

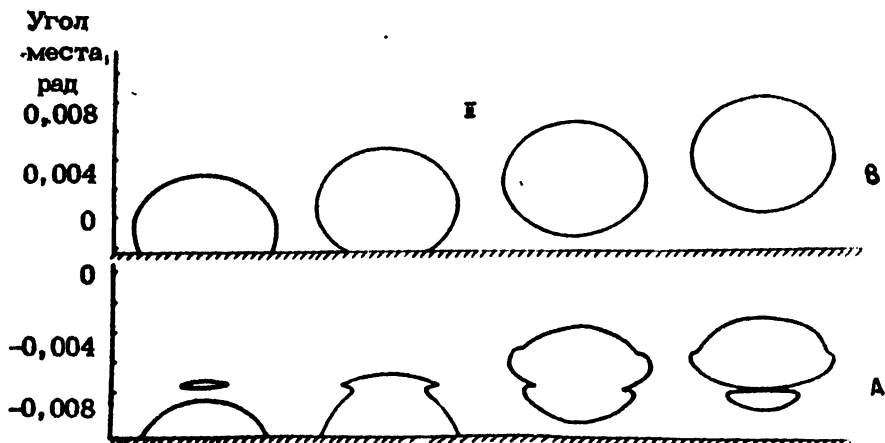
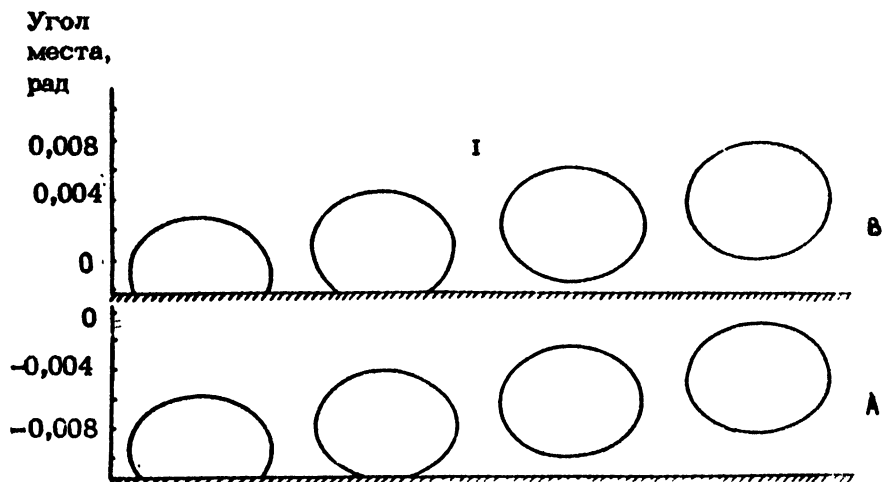


Рис. 3 Динамика изображения восходящего Солнца, видимого через атмосферу Земли. Моделирование наземного эксперимента для высотных профилей температуры, представленных на рис. 2 (обозначения I, II на данном рисунке соответствуют аналогичным обозначениям на рис. 2)

ности (кроме общего сжатия) на изображении диска⁺, а все разнообразие искажений фигуры Солнца вблизи горизонта наблюдается только при отрицательных углах места.

Исследование возможностей восстановления вертикальных профилей температуры из рефрактометрических данных осуществлялось на профилях температуры с большим числом мелких деталей ниже точки наблюдателя. Один из таких профилей представлен на рис. 4. Численный эксперимент включал в себя решение прямой (вычисление ε по известным метеоданным) и обратной (восстановление профилей N , T и давления P по зависимости $\varepsilon(p)$) задач. На вычисление при решении прямой задачи для каждой использованной метеорологической реализации "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.

Пример восстановления профиля температуры для высоты наблюдений 500 м: приведен на рис. 4. При восстановлении использовались моделируемые данные с шагом по высоте, равным ~ 10 м, что соответствует шагу по углу примерно в $20''$. Ошибки моделируемых измерений считались статистически независимыми со среднеквадратичным значением $\sim 1\%$, что соответствует точности измерений углов оптической рефракции около $15''$. Восстановление профилей N и T осуществлялось как с помощью соотношения (7), так и с помощью численного метода решения обратной задачи, изложенного в [12].

В последнем случае уравнение (6) первоначально решалось относительно производной $\frac{dn}{dr}$, а затем определялись высотные профили n (по известным значениям $n(r_H)$ и $\frac{dn}{dr}$), P (из барометрической формулы, имеющей с учетом (1) вид $\frac{dp}{dr} = \text{const}(n-1)$) и T (из соотношения (1) по известным значениям $n(r)$ и $P(r)$). Восстановленные описанным способом профили температуры повторяют исходные профили с

⁺) Этот вывод справедлив и для очень сильных температурных инверсий.

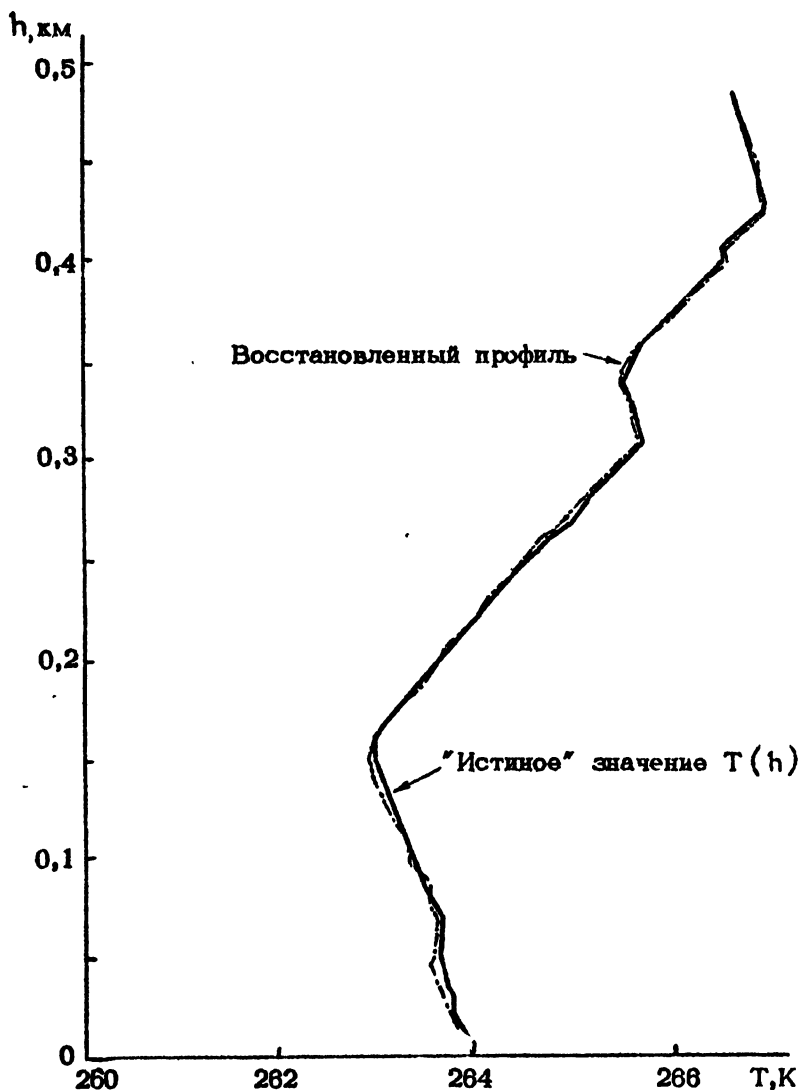


Рис. 4 Пример восстановления высотного профиля температуры при наблюдениях атмосферной рефракции с погрешностью $\delta\epsilon = 1\%$ с высоты $H = 500$ м (численный эксперимент)

погрешностью менее 0,1 К, а соответствующие погрешности определения атмосферного давления составляют не хуже 0,1 мб. (с учетом использования барометрической формулы для давления при средних значениях влажности на соответствующих высотах). Эти оценки говорят сами за себя.

Применение рефрактометрических методов для восстановления метеорологических элементов в нижних слоях атмосферы в существенной степени стимулируется возможностями весьма точного знания ядра интегрального уравнения (6), которое определяется преломляющими свойствами атмосферы. Так, неопределенность в знании индекса рефракции (из-за неопределенности коэффициента A_λ , см. обзор данных, например, в [13]) не превышает $\sim 7 \cdot 10^{-2}$ ед. N в нижних слоях атмосферы, что соответствует относительной погрешности $\delta N \sim 0,03\%$.

Вместе с тем, следует ещё раз подчеркнуть, что все предыдущее рассмотрение основывалось на предположении о сферической симметрии поля показателя преломления. Физический смысл этого условия заключается в том, что слой атмосферы толщиной h должен иметь горизонтальную протяженность вдоль луча порядка $\sim 2(a_0 h)^{1/2}$, где a_0 — эквивалентный радиус Земли. Это условие является довольно жестким условием, особенно, если учесть неизбежное влияние турбулентности. Исследование влияния несферичности и турбулентности на восстановление усредненных (по области формирования изображения космических источников) профилей представляет достаточно сложную задачу, которая в целом ещё стоит на очереди.

На основании полученных результатов отметим также возможную перспективность использования рефрактометрических методов и в диапазоне микрорадиоволн для дистанционного определения метеорологических параметров атмосферы в различных погодных условиях, включая и облачные ситуации,

4. Заключение

Кратко сформулируем основные выводы работы:

- 1) Обратная задача рефракции в сферически-симме-

тричной атмосфере является математически хорошо обусловленной для наблюдений внеземных источников при зенитных углах более 90° (при отрицательных углах места) и некорректной — при зенитных углах менее 90° (при положительных углах места).

2) На основании численного эксперимента показано, что восстановление вертикальных профилей температуры и давления ниже точки наблюдения может быть выполнено с малой погрешностью (соответственно менее 0,1 К и $\sim 0,1$ мб) при весьма умеренных требованиях к точности измерения углов оптической рефракции ($\sim 15''$).

3) В условиях сферически-слоистой атмосферы наиболее сложные деформации изображения Солнца на восходе или закате наблюдаются при отрицательных углах места и являются проявлением структуры температурного поля в области перигея луча на высотах, меньших высоты точки наблюдения. При наблюдениях на положительных углах места деформации изображения Солнца отражают структуру температурного поля выше уровня наблюдателя лишь усредненно (вдоль луча) и проявляются только в виде большей или меньшей сплюснутости диска.

Авторы пользуются случаем выразить благодарность Г.М. Гречко, С.В. Загогуйко и С.В. Соколовскому за полезное обсуждение полученных результатов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. O'Connell D.J.K. The green flash and other low sun phenomena. - Ricerche Astronomiche - Specola Vaticana: Citta del Vaticano, 1958, v.4, p.1-184.
2. Lehn W.H. The Novaya Zemlya effect: An arctic mirage. - J. Opt. Soc. of Amer., 1979, v.69, N5, p.776-781.
3. Lehn W.H., German B.A. Novaya Zemlya effect: The analysis of an observation. - Appl. Opt., 1981, v.20, N12, p.2043-2047.
4. Справочник по геофизике. - М.: Наука, 1965. - 571с.
5. Гурвич А.С., Кан В., Попов Л.И., Рюмин В.В., Савченко С.А., Соколовский С.В. Восстановление профиля температуры в атмосфере по киносъёмкам Солнца и Луны с орбитальной станции "Салют-6". - Изв. АН СССР. Серия Физика атмосферы и океана, 1982, т. 18, № 1, с. 3-7.
6. Гречко Г.М., Гурвич А.С., Обухов А.М., Попов Л.И., Рюмин В.В., Савченко С.А. Использование рефрактометрической информации при зондировании атмосферы из космоса. - Препринт № 13, (материалы семинара "Атмосфера-океан-космос" под руководством академика Г.И. Марчука), М.: ВИНТИ, 1981.
7. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. - М.: Наука, 1980. - 504с.
8. Гурвич А.С., Загоруйко С.В., Кан В., Попов Л.И., Рюмин В.В., Савченко С.А., Чочиа П.А. Структура неоднородностей температуры по наблюдениям атмосферной рефракции с орбитальной станции "Салют-6" - ДАН СССР, 1981, т. 259, № 6, с. 1330-1333.
9. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1979. - 280с.
10. Павельев А.Г. К решению обратной задачи рефракции. - Радиотехника и электроника, 1980, т. 25, № 12, с. 2504-2509.

11. Уиттекер Э.Т., Ватсон Дж.Н. Курс современного анализа. - М.: Физматгиз, 1962, т. 1. - 373 с.
12. Гайкович К.П., Наумов А.П. К определению метеопараметров атмосферы из измерений оптической рефракции космических источников. - Метеорология и гидрология (в печати).
13. Колосов М.А., Шабельников А.В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. - М.: Сов. радио, 1976. - 219 с.

Дата поступления
статьи
17 декабря 1981 г.

Константин Павлович ГАЙКОВИЧ
Александр Сергеевич ГУРВИЧ
Альберт Поликарпович НАУМОВ .

**К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ
ИЗ ВНУТРИАТМОСФЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ
РЕФРАКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ**

Подписано в печать 18.01.82 г. МЦ 00608. Формат 60×84 1/16
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 0,98 усл. печ. л.
Тираж 120 экз. Заказ 2704. Бесплатно

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский радиофизический институт, г. Горький 603600, ГСП-51, ул. Лядова 25/14, т. 38-90-91, доб. 5-09

Отпечатано на ротаприанте НИРФИ