

В.П. Якубов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ ПО НАЗЕМНЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ РЕФРАКЦИОННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Исследуется возможность восстановления приземного значения показателя преломления и его градиента по данным о производной угла рефракции, для получения которых предлагается использовать наземные измерения наблюдаемого различия в вертикальных и горизонтальных размерах диска Солнца или Луны. Приводится тестовая проверка работоспособности предлагаемой методики.

Разработанные к настоящему времени различные методы решения обратных рефракционных задач основаны на использовании существующей связи между профилем показателя преломления и изменениями параметров оптических и радиоволн при погружении лучевой линии в атмосферу. Особенно большие успехи достигнуты при предложенном в [1] сквозном просвечивании атмосферы, когда источник и приемник излучения находятся за пределами атмосферы, а лучевая линия просвечивания погружается в нее, сканируя область наибольшего погружения высотную структуру показателя преломления. В приближении сферически симметричной атмосферы задача восстановления высотного профиля показателя преломления в этом случае сводится к обращению преобразования Абеля. Такая методика с использованием бортовых передатчиков автоматических космических аппаратов позволила эффективно исследовать атмосферы Марса, Венеры и Солнца [2]. Для глобального исследования атмосферы Земли этот подход предполагает задействование двух ИСЗ [3], что сопряжено с известными трудностями. В более выгодном отношении находятся оптические и радионаблюдения за такими постоянно действующими естественными источниками излучения, как Солнце или Луна. В [4–7] разработана методика решения обратной задачи рефракции на основе фотографирования и последующего анализа регистрируемых искажений формы диска Солнца с борта орбитальных станций. В целом измерения при сквозном просвечивании свойственна высокая точность, а недостатком их является и высокая стоимость, и узкий круг возможных исследователей.

В данной статье предлагается использовать наземные наблюдения за искажениями формы диска Солнца или Луны при изменении их положения на небосклоне. Измерения относительного различия вертикальных и горизонтальных размеров диска определяют производную угла рефракции и избавляют от необходимости использовать априорную информацию об ожидаемом положении источника излучения. Проведение наземных наблюдений общедоступно, но при этом задача восстановления параметров атмосферы не сводится к простому преобразованию Абеля, а является более сложной и плохообусловленной [8–11]. Поэтому в работе для начала предлагается простая методика восстановления двух таких важных параметров, как приземные значения показателя преломления и его градиента, и затем приводится уравнение для обратной задачи, которое отличается от известных [8–11] использованием измерений производной угла рефракции в качестве исходных данных.

Будем считать, что источник излучения (Солнце или Луна) имеет форму правильного круга. Так, сплюснутость диска Солнца не превышает 0,005% [12] и это вполне допустимое предположение. Если δ — угловой диаметр этого круга, то при наблюдении за ним через атмосферу размер диаметра в вертикальной плоскости уменьшится на величину Δ , которая равна

$$\Delta = \xi\left(\varphi - \frac{\delta}{2}\right) - \xi\left(\varphi + \frac{\delta}{2}\right),$$

где $\xi\left(\varphi \pm \frac{\delta}{2}\right)$ — угол астрономической рефракции; φ — угловое положение центра диска над горизонтом. Вследствие малости горизонтальной рефракции размер диаметра в горизонтальном направлении практически не отличается от δ . Отношение разности размеров круга в горизонтальном и в вертикальном направлениях к размеру в горизонтальном направлении равно $\gamma = \Delta/\delta$ и вследствие $\delta \ll 1$ может быть оценено как

$$\gamma(\varphi) = -d\xi(\varphi)/d\varphi = -\dot{\xi}(\varphi). \quad (1)$$

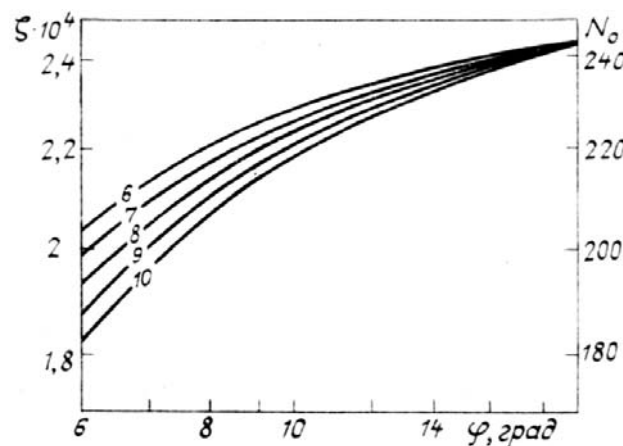
Согласно [13] угол рефракции ξ при $\varphi \geq 5^\circ$ может быть представлен как

$$\xi(\varphi) = N_0 \operatorname{ctg} \varphi [1 - H/(a \sin^2 \varphi)], \quad (2)$$

где $N_0 = (n_0 - 1)$ — приземное значение приведенного показателя преломления; H — эффективная высота тропосферы и a — радиус Земли. Приземный градиент показателя преломления $G = dN/dh$ связан с H соотношением $G = N_0/H$. Первое слагаемое в (2) описывает рефракцию в приближении плоскостной атмосферы и преобладает при вертикальных углах визирования. Второе слагаемое учитывает сферическую симметрию атмосферы. С учетом (1) и (2) можно записать, что

$$\zeta(\varphi) = -\dot{\xi}(\varphi) \sin^2 \varphi = N_0 \left[1 - \frac{H}{a} (1 + 3 \operatorname{ctg}^2 \varphi) \right]. \quad (3)$$

На рисунке в двойном логарифмическом масштабе изображена зависимость $\zeta(\varphi)$ для различных H . Цифры 6, 7, 8, 9 и 10 означают высоту H , выраженную в километрах. Расчет проведен для $N_0 = 250 N$ — ед. Видно, что зависимость от H усиливается с уменьшением φ и исчезает при $\varphi \geq 25^\circ$, когда кривые сливаются. При больших φ величина $\zeta(\varphi)$ есть $\zeta(\varphi) = N_0 = \operatorname{const}$.



Зависимость дифференциального параметра рефракции от угла наблюдения для различной эффективной толщины тропосферы

В общем случае измеренные значения $\zeta(\varphi)$ могут быть использованы для восстановления N_0 и H по методу наименьших квадратов, когда в качестве оценок N_0 и H будут выбраны те, при которых соотношение (3) наиболее точно аппроксимирует экспериментально измеренные значения $\zeta(\varphi_i)$ ($i = 1, 2, \dots, M$; $M \geq 2$). Возникающая при этом система нормальных уравнений линейна и просто решается.

Когда измеренных значений всего два ($M = 2$), для определения N_0 и H (а значит и G) можно использовать рисунок как номограмму. Рассмотрим порядок действий при этом. Необходимо прежде всего два отсчетных значения $\zeta(\varphi_1)$ и $\zeta(\varphi_2)$ отметить соответствующими точками, провести через них отрезок. Опуская этот отрезок параллельно вниз, найти такое его положение, при котором концы отрезка попадут на какую-то одну и ту же кривую из семейства изображенных. Фиксируется величина сдвига отрезка вниз и кривая, на которую попали концы отрезка. Значение H , соответствующее этой кривой, и есть искомое значение высоты атмосферы. Величина N_0 считывается на сетке справа после добавления к отсчету $250 N$ — ед. отрезка, имеющего длину найденного параллельного сдвига.

Для проверки принципиальной работоспособности метода была использована таблица углов астрономической рефракции, рассчитанная в [14] для стандартной атмосферы численно. В результате получилось, что $\zeta(5^\circ) = 2,0 \cdot 10^{-4}$, $\zeta(10^\circ) = 2,5 \cdot 10^{-4}$, $\zeta(20^\circ) = 2,7 \cdot 10^{-4}$. Найденные по описанной методике значения параметров атмосферы оказались равными $N_0 = 280 N$ — ед. и $H = 8,3$ км ($G = -34 N$ — ед./км). Точные значения, заложенные при расчете таблицы, равнялись $N_0 = 278,24 N$ — ед. и $H = 8,4345$ км. Точность восстановления сравнима с соответствующей точностью метеоизмерений. Уменьшение погрешности восстановления возможно с использованием более точных измерений и объема выборки исходных данных $M \gg 2$.

Дифференциальные измерения $\zeta(\varphi)$ могут быть использованы для решения обратной задачи восстановления высотного профиля показателя преломления атмосферы $N(h)$. Для этого вместо (2) необходимо взять более общее выражение [10]

$$\xi(\varphi) = [N_0 - \nu(\varphi)] \operatorname{ctg} \varphi, \quad (4)$$

где

$$\gamma(\varphi) = s \int_0^{\infty} N(u) u [u^2 + s^2]^{-3/2} du, \quad (5)$$

$$s = a(1 + N_0) \sin \varphi,$$

и переменная интегрирования u связана с текущей высотой точки h над поверхностью Земли соотношением

$$u^2 = (a+h)^2 n^2(a+h) - a^2 n^2(a).$$

Здесь высотный профиль показателя преломления определяется как

$$n(a+h) = 1 + N.$$

В результате простого дифференцирования выражения (4) можно записать, что

$$\zeta(\varphi) = N_0 - s \sin^2 \varphi \int_0^{\infty} f(u, s) N(u) u [u^2 + s^2]^{-3/2} du, \quad (6)$$

$$f(u, s) = [u^2 + s^2 (1 + 3 \operatorname{ctg}^2 \varphi)] / [u^2 + s^2].$$

Как показывают численные оценки при $\varphi > 3^\circ$, величина $f(u, s) \approx 1 + 3 \operatorname{ctg}^2 \varphi$, и тогда подобно (3) имеем

$$\zeta(\varphi) = N_0 - (1 + 3 \operatorname{ctg}^2 \varphi) \sin^2 \varphi \cdot v(\varphi). \quad (7)$$

По измеренным значениям $\zeta(\varphi_i)$ согласно (7) можно найти $v(\varphi)$. Методы решения интегрального уравнения (5) рассмотрены в [10, 11]. Если условие $\varphi > 3^\circ$ не выполняется, то для решения обратной задачи восстановления высотного профиля показателя преломления следует исходить из интегрального уравнения (6).

Предложенный метод измерения атмосферных параметров по наземным наблюдениям искажения формы диска Солнца или Луны может найти широкое применение для оперативного контроля состояния атмосферы. Для получения исходных дифференциальных данных могут быть также использованы измерения по рефракционному смещению относительного положения звезд на небе.

1. Fjeldbo G., Eshleman V.R. // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. № 13. P. 3217.
2. Яковлев О.И. Распространение радиоволн в космосе. М.: Наука, 1985. 216 с.
3. Яковлев О.И., Александров Ю.Н., Ваганов И. Р. и др. // Тезисы докл. XVI Всесоюз. конференции по распространению радиоволн. Харьков, 1990. С. 146.
4. Гречко Г.М., Гурвич А.С., Романенко Ю.В. и др. // ДАН СССР. 1979. Т. 248. № 4. С. 828.
5. Гречко Г.М., Гурвич А.С., Ляхов В.А. и др. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т. 17. № 11. С. 1123.
6. Соколовский С.В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т. 17. № 6. С. 574.
7. Волков А.А., Гречко Г.М., Гурвич А.С. и др. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. № 11. С. 1228.
8. Павельев А.Г. // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29. № 9. С. 1658.
9. Арманд Н.А., Андрианов В.А., Смирнов В.М. // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 4. С. 673.
10. Якубов В.П., Симакова Н.А. // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 7. С. 1367.
11. Симакова И.А., Якубов В.П. // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34. № 7. С. 1329.
12. Астрономический календарь. Постоянная часть. М.: Наука, 1981. 704 с.
13. Колосов М.А., Шабельников А.В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. М.: Сов. радио, 1976. 220 с.
14. Оптическая рефракция в земной атмосфере (рефракционные модели атмосферы) / А.В. Алексеев, Д.Л. Дробязко, М.В. Кабанов, И.Ф. Кушкин. Новосибирск: Наука, 1987. 104 с.

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова,
Томск

Поступила в редакцию
6 декабря 1990 г.

V. P. Y a k u b o v. **Determination of the Atmospheric Parameters by Differential Ground-Based Refractive Observations.**

A possibility of restoring the surface value of the refractive index and its gradient from the data on the refraction angle derivative is investigated. To obtain such data it is suggested in the paper to use the ground-based measurements of the difference between the apparent vertical and horizontal sizes of the solar or moon discs. A test proving the technique is being carried out.