

УДК 551.524.72 : 551.547.5 : 551.593.1

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ
 АТМОСФЕРЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ
 РЕФРАКЦИИ ВБЛИЗИ ГОРИЗОНТА**

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

Приводятся результаты восстановления высотных профилей параметров атмосферы по измерениям оптической рефракции светил с поверхности земли на положительных углах места. Восстановление основано на решении соответствующей обратной задачи относительно профиля показателя преломления. Используются метод А. Н. Тихонова и метод статистической регуляризации. Результаты сопоставления восстановленных профилей с данными одновременного аэрологического зондирования атмосферы подтвердили теоретические оценки точности восстановления и показали перспективность разработанного метода дистанционного зондирования атмосферы. Приводятся примеры восстановления профилей температуры с инверсиями.

Введение. В работе представлены результаты восстановления высотных профилей атмосферных параметров из измерений оптической рефракции светил на малых положительных углах места. Методика восстановления полностью основана на результатах теоретического анализа задачи и алгоритмах, развитых в [1, 2]. В этих работах задача формулируется в виде интегрального уравнения Фредгольма I рода

$$\int_{p_0}^{p_H} N(p) \frac{px}{(p^2 - x^2)^{3/2}} dp = \tilde{\varepsilon}(x), \quad (1)$$

где N — индекс рефракции, связанный с показателем преломления соотношением $N = 10^6(n - 1)$; $p = nr$, $p_0 = n(r_0)r_0$, $x = n(r_0)r_0 \cos \theta_0$; $\tilde{\varepsilon}$ — правая часть уравнения, связанная с измеряемой рефракцией ε соотношением

$$\tilde{\varepsilon}(x) = -10^6\varepsilon(x) + x \left(\frac{N(p_0)}{\sqrt{p_0^2 - x^2}} - \frac{N(p_H)}{\sqrt{p_H^2 - x^2}} \right), \quad (2)$$

r — радиус-вектор из центра Земли, r_0 — радиус Земли, θ — угол места, $p_H = n(r_H)r_H$, где $r_H = r_0 + H$. Высота H достаточно велика (см. [2]). Полученное из решения (1) распределение $N(p)$ преобразуется в высотный профиль $N(h)$ с помощью соотношения $p = nr = n(r_0 + h)$. В оптическом диапазоне, зная $N(h)$, можно восстановить также высотные профили давления (P) и температуры (T), используя уравнения статики и газового состояния (см. [3]).

В [1, 2] показано, что для решения уравнения (1), которое представляет собой классический пример некорректно поставленной задачи, необходимо привлекать достаточно существенную априорную информацию об искомом профиле $N(p)$. Разработаны два алгоритма восстановления $N(p)$, основанные на известных методах решения такого рода за-

дач. Первый из них основан на принадлежности точного решения $N(p)$ к компактному множеству монотонно невозрастающих функций [4], а второй — на использовании ковариационных межуровневых связей $N(p)$ [5] (метод статистической регуляризации).

При обработке эксперимента существенно использовался выполненный в [2] анализ информативного диапазона углов, на которых должна измеряться рефракция. Известно, что с ростом угла места рефракция со все возрастающей точностью определяется значением приземного показателя преломления (так называемая «теорема Лапласа»). Таким образом, вариации рефракции, обусловленные изменениями стратификации атмосферы, быстро уменьшаются с ростом угла места. При заданной точности измерений этот эффект приводит к ограничению информативного диапазона углов сверху. На основе статистического анализа

ных из данных аэрологического зондирования) установлено, что при реализующейся в настоящее время точности измерений рефракции в оптическом диапазоне (14-10") диапазон информативных углов находится при $\theta < 4^\circ$.

Выполнено численное моделирование решения обратной задачи и восстановления профилей параметров атмосферы как методом, использующим свойство монотонности $N(p)$, так и методом статистической регуляризации. На основе статистического анализа результатов для больших ансамблей, соответствующих зимним и летним условиям средней части ЕТ СССР, получены оценки погрешностей восстановления в зависимости от уровня моделируемой погрешности измерений. На рис. 1 представлены среднеквадратичные погрешности восстановления параметров атмосферы методом статистической регуляризации в зависимости от высоты для точности измерений $\delta\epsilon = 5''$, близкой к кк). Летний ансамбль ЕТ реализующейся в эксперименте (для летнего ансамбля). До высоты

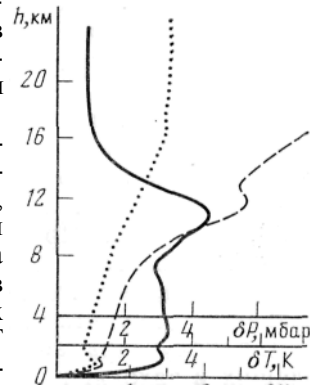


Рис. 1. Среднеквадратичные погрешности восстановления параметров атмосферы (индекса рефракции — сплошная, температуры — пунктир, давления — штрихпунктир) в зависимости от высоты для точности измерений $\delta\epsilon = 5''$, близкой к кк). Летний ансамбль ЕТ СССР, $\delta\epsilon = 5''$

~6 км точность определения индекса рефракции составляет $\delta N < 1,5$, давления $\delta P < 1$ мбар, температуры $\delta T < 1,5$ К, что сравнимо по точности с лучшими теоретическими оценками точностей восстановления методами наземной СВЧ-радиометрии [6]. Установлено, что при реализующихся точностях измерений предпочтительнее метод статистической регуляризации. Показана возможность восстановления инверсий температуры. Для использования метода важен установленный в [2] результат о слабом влиянии количества измерений рефракции в информативном диапазоне углов на точность восстановления — достаточно 5—10 измерений.

Таким образом, результаты теоретического анализа [1,2] показывали вполне определенные перспективы применения измерений рефракции на малых углах места для определения стратификации атмосферы. Вместе с тем теоретическое рассмотрение оставило незатронутыми ряд важных вопросов, связанных с практическим применением метода, ответы на которые можно было получить только из результатов эксперимента. 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, наличие горизонтальных неоднородностей приносит дополнительную погреш-

ность. Влияние горизонтальных неоднородностей на величину рефракции в различных условиях еще недостаточно изучено, поэтому трудно оценить соответствующие погрешности в рамках теоретического анализа. Без эксперимента трудно также учесть погрешности, вносимые в рефракцию турбулентными флуктуациями показателя преломления, а также погрешности, связанные с некоторой его дисперсией в оптическом диапазоне.

Необходим также последовательный учет влажности, которая вносит вклад в показатель преломления, а также входит в барометрическую формулу, что важно при расчете давления (в [2] влияние влажности не учитывалось). Все сформулированные вопросы могут быть решены только на основе эксперимента.

Комплексный эксперимент по определению рефракции светил и метеопараметров атмосферы. В работе использованы результаты одновременных астрономических и аэрологических наблюдений, выполненных в октябре 1968 и 1972 гг. Район измерений представлял собой слегка всхолмленную полупустыню с глинисто-каменистой подстилающей поверхностью.

Астрономические наблюдения велись в условиях «открытого воздуха» с помощью высокоточного универсального инструмента УВ 2"/2" и регистрирующей аппаратуры автономной службы времени. Регистрация моментов наблюдения производилась на ленту пишущего хронографа с точностью 0,02 с. Привязка к шкале эталонного времени осуществлялась с использованием импульсной приставки для автоматического приема сигналов точного времени всеволновым приемником. Высота над уровнем моря пункта наблюдения составляла 360 м.

Для получения астрономической рефракции по наблюдениям восходящих и заходящих ярких звезд, планет и Солнца определялась разность между измеренными в определенный момент зенитными расстояниями светил и вычисленными (истинными) значениями. Зенитные расстояния светил в фиксированный момент времени измерялись в произвольных часовых углах абсолютным методом, при этом ориентирование горизонтального и вертикального круга инструмента выполнялось по наблюдениям Полярной звезды. «Место зенита» на вертикальном круге определялось до и после серии наблюдений. В использованном методе измерения зенитных расстояний светил велись в широком секторе направлений— $\pm 45^\circ$ от первого вертикала восточной и западной части небесной сферы. Истинные зенитные расстояния светил вычислялись по известному моменту времени и эфемеридным значениям координат. Погрешность этих вычислений связана с ошибками определения момента наблюдения, ошибками широты и долготы пункта измерений и с ошибками координат светила.

При измерениях астрономической рефракции вблизи горизонта в интервале углов места $0—5^\circ$ основной вклад в погрешность измерения видимого зенитного расстояния вносили турбулентное дрожание изображений и дисперсия показателя преломления атмосферы. Часть суммарной погрешности связана и с инструментальными ошибками измерений (табл. 1).

Наблюдения сопровождалась измерениями температуры, давления и влажности воздуха у объектива инструмента. Термодинамические параметры атмосферы (температура, давление и относительная влажность) определялись методом аэрологического (шаропилотного) зондирования до высоты около 30 км с помощью системы «Метеорит — РКЗ-2», которая обеспечивала измерения с высокой дискретизацией по высоте (через 100 м до 2 км; 101 точка до 25 км). Радиозонды выпускались в моменты астрономических наблюдений вблизи пункта наблюдения.

Результаты восстановления параметров атмосферы по экспериментальным данным. При восстановлении параметров атмосферы из изме-

рений рефракции предполагается сравнение восстановленных профилей с данными аэрологического зондирования, что является общепринятым методом проверки эффективности дистанционных методов, несмотря на то, что сами зонды определяют атмосферные параметры с определенной ошибкой.

Поэтому для применения разработанных алгоритмов восстановления в первую очередь необходимо сопоставление измеренных значений рефракции со значениями, рассчитанными по соответствующим аэрологическим данным в сферически-симметричном приближении. Помимо погрешностей измерений рефракции и погрешностей зондовых данных причинами различия вычисленных и измеренных значений рефракции являются погрешности расчета рефракции, а также влияние горизонтальных неоднородностей как непосредственно на рефракцию, так и на показания переносимого ветром зонда. Только в случае, если разница между измеренными и вычисленными значениями рефракции будет удовлетворять определенным в [2] требованиям к точности измерений, можно приступить к решению обратной задачи и сравнивать результаты восстановления с данными аэрологических измерений.

Таким образом, близость значений расчетной и измеренной рефракции предполагает достаточно точные измерения, алгоритм расчета и соответствие атмосферы сферически-симметричному приближению. Все эти требования являются вместе с тем и предпосылками для успешного решения задачи восстановления параметров атмосферы по измерениям рефракции.

Точность расчета рефракции с точки зрения решения обратной задачи определяет точность задания ядра интегрального уравнения. Для расчета рефракции по формуле (1) использовались значения показателя преломления, вычисленные на 101 уровне высоты от 0 до 25 км по зондовым данным о температуре и влажности атмосферы. Для согласования метеопараметров профиль давления рассчитывался по барометрической формуле. Приведем соответствующие выражения:

$$N = k_1(\lambda) P/T + k_2 E/T, \quad (3)$$

$$\rho(h) = \frac{M}{R_0(1 + 0,378E/P)} \frac{P}{T}, \quad (4)$$

$$P(h) = \int_h^{\infty} g(h') \rho(h') dh', \quad (5)$$

где ρ — плотность воздуха, E — парциальное давление водяного пара, g — ускорение свободного падения, k_1 — постоянная, слабо зависящая от длины волны λ ; k_2 — постоянная (значения k_1 , k_2 см. в [7]), M — молекулярный вес воздуха, R_0 — универсальная газовая постоянная. При расчетах учитывалась зависимость ускорения свободного падения $g(h)$ от широты пункта наблюдений. Эффективная длина волны измерений в (3) с учетом покраснения на малых углах места выбиралась $\lambda = 0,6$ мкм. При интегрировании выше 25 км использовалась стандартная модель атмосферы (вариации вклада в рефракцию этого слоя составляют менее 0,1"). Расчеты показали, что дискретизация по высоте вполне достаточна для точного интегрирования.

В табл. 2 представлены результаты сравнения измеренных значений рефракции для звезды Арктур и соответствующих значений рефракции, рассчитанных по данным аэрологического зондирования.

Видно, что измеренная рефракция совпадает с расчетной с точностью, достаточной для успешного восстановления параметров атмосферы по значениям $\epsilon_{\text{изм}}$. Результаты восстановления индекса рефракции, давления и температуры, представленные в табл. 3 для некоторых выбранных высот, показывают хорошее совпадение восстановленных по данным

Таблица 1

**Оценка вклада основных источников погрешности
при определении рефракции и оценки максимальной общей
ошибки fit.**

θ , град	Инструментальные, угл. с	Турбулентное дрожание, угл. с	Дисперсия, угл. с	Вычисление зенитного расстояния, угл. с	$\delta\epsilon$, "
5	2	1,7	1,4	0,6	3
2	2	2,4	2	0,7	4
1	2	3,3	2,6	1	5
0,5	2	4	3	1,1	6

Таблица 2

**Сравнение измеренных и расчетных значений
рефракции**

θ , "	ϵ изм, "	ϵ расч, "
5426	1238	1241
7224	1077	1078
9023	944	949
10 829	849	846
12623	760	761

табл. 2 профилей атмосферных параметров с соответствующими данными аэрологического зондирования. В частности, восстанавливается характерная особенность профиля — приземная инверсия температуры.

При восстановлении профиль $P(h)$ рассчитывался из профиля $N(h)$ на основе соотношений (3) — (5), при этом в (3), (4) подставлялся модельный профиль влажности, экспоненциально убывающий от приземного значения E с характерным масштабом $h_0 = 3$ км

$$E(A) = E_0 \exp(-h/h_0). \quad (6)$$

Профиль температуры восстанавливался путем решения (3) при уже известных профилях $N(h)$ и $P(h)$ относительно $T(h)$:

$$T(h) = (k_1 P + k_2 E)/N. \quad (7)$$

Отметим, что при восстановлении использовалась ковариационная матрица индекса рефракции B_{NN} , полученная на ансамбле, соответствующем не условиям наблюдений, а зимним условиям средней части ЕТ СССР, это не повлияло существенно на качество восстановления. Этот важный с практической точки зрения вопрос о возможности использования в алгоритмах восстановления ковариационных матриц, полученных для другого метеорологического ансамбля, исследовался специально. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что такие матрицы обладают достаточной универсальностью в рассматриваемом смысле. Это иллюстрирует другой пример восстановления профиля температуры по данным измерений рефракции звезды Арктур, приведенный на рис. 2. Восстановление выполнено методом статистической регуляризации при использовании матриц B_{NN} для летнего и зимнего ансамблей средней части ЕТ СССР. В табл. 4 приведены соответствующие значения измеренной и расчетной рефракции.

Видно, что использование и той и другой матрицы дает близкие результаты и хорошее совпадение с зондовым профилем.

Обобщение полученных данных и обработки эксперимента показывает, что отмеченные погрешности и другие причины, вызывающие рас-

Результаты восстановления параметров атмосферы

Таблица 3

H , км	N	N_1	N_2	T, K	T_1	T_2	P , мбар	P_1	P_2
0	276,9	—	—	280,0	—	—	985,6	—	—
0,2	263,1	261,2	262,7	286,5	288,6	287,0	957,8	958,2	958,3
0,5	255,8	254,9	256,9	284,3	285,7	283,5	924,1	925,3	925,6
1	243,7	243,7	242,8	281,0	281,6	279	870,0	872,0	870,9
2	220,5	221,3	222,2	274,7	274,5	272,9	769,5	771,8	770,9
3	198,8	199,3	197,3	268,8	268,7	266,8	678,7	680,5	678,8
4	179,3	179,3	180,1	262,0	262,6	260,5	596,8	598,2	596,0
5	160,8	161,3	162,3	256,2	256,2	253,3	523,2	524,7	522,4
6	145,2	145,0	145,7	247,8	248,8	246,1	457,0	458,2	455,2
7	131,0	130,2	130,9	238,8	240,9	237,7	397,3	398,5	395,2
8	117,0	116,8	117,1	231,2	232,8	229,5	343,6	345,2	341,5
9	103,8	104,7	104,3	224,5	224,6	221,1	295,9	297,6	293,8

Примечание. N, T, P — зоновые значения, N_1, T_1, P_1 — восстановленные методом статистической регуляризации, N_2, T_2, P_2 — методом решения на компактном множестве монотонных функций.

Таблица 4
4 Измеренные и расчетные значения рефракции к примеру на рис. 3

$\theta, ''$	$\epsilon_{\text{изм}}, ''$	$\epsilon_{\text{расч}}, ''$	$\theta, ''$	$\epsilon_{\text{изм}}, ''$	$\epsilon_{\text{расч}}, ''$
2114	1676	1663	9266	933	936
3352	1466	1477	10492	867	865
4581	1308	1326	11671	803	806
5777	1197	1203	12907	749	751
6937	1094	1101	14305	694	696
8091	1006	1013			

Таблица 5

Измеренные и расчетные значения рефракции при наблюдениях звезды Вега

$\epsilon_{\text{расч}}, ''$	$\epsilon_{\text{изм}}, ''$	$\epsilon_{\text{расч}}, ''$
3597	1444	1443
5399	1242	1241
8900	952	954
10793	852	851
12597	762	765

Таблица 6

Измеренные и расчетные значения рефракции при наблюдениях Солнца

$\theta, ''$	$\epsilon_{\text{изм}}, ''$	$\epsilon_{\text{расч}}, ''$
4366	1429	1423
6842	1152	1150
9123	981	973
11835	814	819

хождение измеренных и расчетных значений рефракции, в разных случаях могут вносить существенно неодинаковый вклад. В частности, встречаются ситуации, когда на всех углах расчетная рефракция весьма близка к измеренной, что подтверждает хорошую точность расчетов, а также высокое качество эксперимента. Это иллюстрирует пример, представленный в табл. 5 и на рис. 3 (наблюдения рефракции звезды Вега).

Значительный интерес представляет чувствительность метода к восстановлению особенностей распределения параметров в пограничном слое атмосферы, таких как инверсии температуры. На рис. 4 представлен пример восстановления мощной инверсии температуры по данным измерения рефракции Солнца (метод статистической регуляризации). Соответствующие измеренные и расчетные значения рефракции приведены в табл. 6.

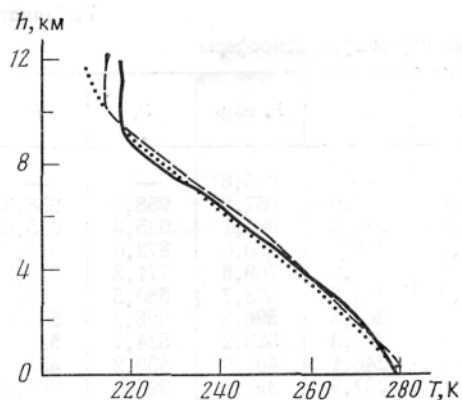


Рис. 2

Рис. 2. Сравнение зондового профиля температуры (сплошная кривая) с профилями, восстановленными из измерений рефракции звезды Арктур методом статистической регуляризации: пунктир — с использованием летней матрицы B_{NN} , точки — с использованием зимней матрицы

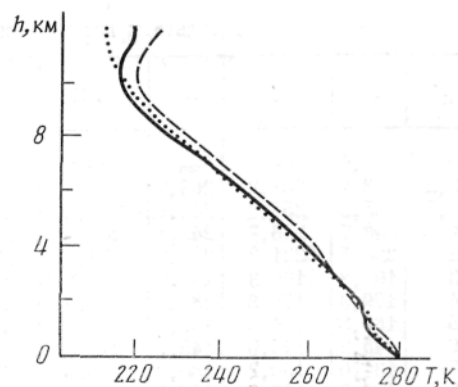


Рис. 3

Рис. 3. Сравнение зондового профиля температуры (сплошная кривая) с профилями, восстановленными из измерений рефракции звезды Вега (табл. 5). Пунктир — метод статистической регуляризации, точки — восстановление на множестве монотонных

функций

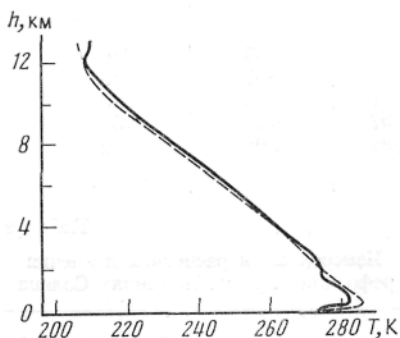


Рис. 4. Восстановление профиля температуры с сильной инверсией по измерениям рефракции Солнца методом статистической регуляризации (пунктир). Сплошная кривая — зондовый профиль

Заключение. Результаты обработки экспериментальных данных, в частности сопоставление рассчитанной по аэрологическим данным и измеренной рефракции, а также сравнение восстановленных двумя различными методами профилей параметров атмосферы с зондовыми профилями, показывают, что точность измерений рефракции, точность расчета ядра интегрального уравнения и степень соответствия реальной атмосферы сферически-симметричному приближению в условиях эксперимента удовлетворяют сформулированным в [2] требованиям для успешного восстановления параметров атмосферы. Точность восстановления при реализующихся точностях измерения рефракции соответствует теоретическим оценкам точности, полученным в [2], и сравнима с лучшими теоретическими оценками точностей восстановления метода наземной СВЧ-радиометрии. Хорошо восстанавливаются инверсии температуры. Это свидетельствует об эффективности разработанных алгоритмов восстановления параметров атмосферы (особенно на основе метода статистической регуляризации) и показывает перспективность использования рефрактометрических измерений в задачах дистанционного зондирования атмосферы.

Необходимо дальнейшее исследование метода в различных условиях, накопление статистики. В ряде ситуаций (неоднородная подстилающая поверхность, атмосферные фронты и т. п.) можно предположить, что горизонтальные неоднородности существенно влияют на рефракцию. Тогда

сами неоднородности могли бы стать объектом исследования рефрактометрическими дистанционными методами.

Значительный интерес связан с исследованием обратной задачи астрономической рефракции применительно к радиодиапазону, что объясняется всепогодностью радиометодов, возможностью использования спутниковых передатчиков, а также возможностью исследования стратификации влажности.

Не исключено, что разработанные здесь практически первые алгоритмы восстановления могут быть улучшены, равно как может быть улучшена и методика измерений. Работы в этом направлении могут существенно прояснить взаимосвязи рефракции и стратификации атмосферы.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гайкович К. П., Сумин М. И.* К решению обратной задачи астрономической рефракции. Тез. докл. Всесоюз. совещ. по проблемам совершенствования аппаратурных средств и таблиц для определения рефракции электромагнитных волн в земной атмосфере.—Иркутск: ТФ СО АН СССР, 1984, с. 37—38.
2. *Гайкович К. П., Сумин М. И.* О восстановлении высотных профилей показателя преломления, давления и температуры атмосферы по наблюдениям астрономической рефракции.—Изв. АН СССР. ФАО, 1986, т. 22, № 9.
3. *Гурвич А. С., Кан В., Попов Л. И., Рюмин В. В., Савченко С. А., Соколовский С. В.* Восстановление профиля температуры в атмосфере по кино съемке Солнца и Луны с орбитальной станции «Салют-6».—Изв. АН СССР. ФАО, 1982, т. 18, № 1, с. 3—7.
4. *Тихонов А. Н.* Об устойчивости обратных задач.— Докл. АН СССР, 1943, т. 39, № 5, с. 195—198.
5. *Турчин В. Ф., Козлов В. П., Малкевич М. С.* Использование методов математической статистики для решения некорректных задач.— УФН, 1970, т. 102, вып. 3, с. 345—386.
6. *Gaikovich K. P., Markina N. N., Naumov A. P., Plechkov V. M., Sumin M. I.* Investigation of remote sensing possibilities of the lower atmosphere in the microwave range and some aspects of statistical data use.— Int. J. Remote Sensing, 1983, v. 4, № 2, p. 419—431.
7. *Колосов М. А., Шабельников А. В.* Рефракция электромагнитных волн в атмосфере Земли, Венеры и Марса. М.: Сов. радио, 1976. 219 с.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
15.VII.1985,
после доработки 28.X.1985

RETRIEVAL OF ATMOSPHERE TEMPERATURE AND PRESSURE VERTICAL PROFILES FROM MEASUREMENTS OF THE REFRACTION AT LOW POSITIVE ELEVATION ANGLES

VASILENKO N. A., GAIKOVICH K. P., SUMIN M. I.

The results of ground-based retrieval of atmosphere parameters vertical profiles from measurements of optical refraction of stars at positive elevation angles are presented. The retrieval is founded from the solution of corresponding inverse problem about refraction index. The Tikhonov's method and statistical regularization method are used. Results of the comparison between retrieved profiles and meteorological sounding data are in good agreement with theoretical evaluations of retrieval errors and show the new method of atmosphere remote sensing to be useful. The examples of the retrieval of temperature profiles with inversion are presented.