

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Ордена Трудового Красного Знамени
Научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

Препринт № 81

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТНЫХ ПРОФИЛЕЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗ НАЗЕМНЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.И.Алешин, А.П.Наумов, В.М.Плечков,
М.И.Сумин, А.В.Троицкий.

Горький - 1975 г.

А н н о т а ц и я

Обсуждается ряд физических аспектов постановки и решения задачи по определению высотных профилей температуры из угломестных и спектральных радиометрических измерений атмосферного излучения в области $\lambda \sim 5$ мм. Оцениваются вариации яркостной температуры атмосферы, обусловленные вариациями основных метеопараметров (температуры, давления и влажности). Анализируется корреляционная связь между величинами яркостной температуры и приемной температуры атмосферы. Приведены результаты восстановления профилей температуры из экспериментальных данных. Дискутируется точность определения высотных профилей.

В последние годы радиометрические измерения атмосферного излучения в области спин-вращательной полосы поглощения O_2 , центрированной к $\lambda \approx 5$ мм, для последующего восстановления высотных профилей температуры в нижней атмосфере выполнялись в работах [1,2]. Определение высотных профилей температуры осуществляется из абсолютных спектральных, угловых или комбинированных (спектральных и угловых) измерений атмосферного излучения. Аналогичные спектральные измерения в спутниковом варианте выполнены в [3] (обзор микроволновых измерений со спутника "Нимбус-5" содержится в [4]).

В данной работе исследуется ряд физических аспектов постановки задачи по дистанционному зондированию атмосферы в области $\lambda \approx 5$ мм с поверхности Земли, приведены результаты восстановления высотных профилей температуры из экспериментальных данных, полученных весной и летом 1974 г., и дискутируется точность полученных результатов. Из физических вопросов рассмотрены вопросы, связанные с определением вариаций яркостных температур атмосферы в полосе O_2 $\lambda \approx 5$ мм, и поставлен вопрос об объективной мере ценности наземных радиометрических измерений атмосферного излучения, поскольку в некоторых случаях (и в определенной степени) не исключается связь яркостных температур атмосферы с приземными значениями метеопараметров.

1. Вариации яркостных температур на различных частотах ν и зенитных углах θ , обусловленные вариациями основных метеопараметров атмосферы (температуры, дав-

ления, влажности), в данной работе вычислялись по формуле

$$\delta T_{\text{Я}, \nu}(\theta) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [T_{\text{Я}, \nu}^i(\theta) - \bar{T}_{\text{Я}, \nu}(\theta)]^2}, \quad (1)$$

в которой текущие и средние значения $T_{\text{Я}, \nu}^i(\theta)$, $\bar{T}_{\text{Я}, \nu}(\theta)$, в свою очередь, рассчитывались по стандартным формулам с использованием результатов аэрологического зондирования атмосферы (около 90 зондов для каждого среднесезонного месяца) в Центральной части ЕТС.

Из сравнения $\delta T_{\text{Я}}$ с вариациями яркостных температур $\delta T_{\text{Я}}$, обусловленными только температурными эффектами (соответствующие оценки $\delta T_{\text{Я}}$ выполнены в [5]), следует, что разница между ними невелика (в зенитном направлении $\sim 0,5^\circ\text{K}$) в области $\nu = 53-60$ Гц и возрастает до $1 + 2^\circ\text{K}$ в области $\nu = 50 + 52$ Гц. Зависимость $\delta T_{\text{Я}}(\nu, \theta = 0^\circ)$ в отличие от вариаций, обусловленных только температурными эффектами, не достигает нулевых значений в рассматриваемом участке.

Поскольку вариации $\delta T_{\text{Я}, \nu}(\theta)$ являются естественной мерой точности при формулировке требований к радиометрической аппаратуре для зондирования атмосферы, то более подробные исследования зависимости вариаций $\delta T_{\text{Я}}$ от зенитного угла выполнялись в работе для рабочих частот радиометра, с помощью которого проводились абсолютные измерения атмосферного излучения [6,7]. На оптимальной частоте радиометра $\nu = 53,4$ Гц соответствующие вариации достигают в континентальном районе при $\theta = 0^\circ \sim 5,9^\circ\text{K}$ летом и $4,8^\circ\text{K}$ зимой, а при $\theta = 85^\circ \sim 6,7^\circ\text{K}$ летом и $7,9^\circ\text{K}$ зимой. Соответствующие вариации в тропической зоне океана заметно меньше: $\sim 1,6^\circ\text{K}$ при $\theta = 0^\circ$ и $1,1^\circ\text{K}$ при $\theta = 85^\circ$. Из приведенных сведений следует, что точность зондирования атмосферы на выбранной частоте в континентальном районе должна быть не хуже $1 \pm 1,5^\circ\text{K}$ (см. также [5]), а к зондированию атмосферы в тропической зоне океана должны предъявляться еще более жесткие требования.

2. На рис. 1 яркостные температуры атмосферы $T_{\text{я}}$ на частоте $\nu = 53,4$ Гц и зенитных углах $\theta = 0^\circ, 85^\circ$, вычисленные по результатам аэрологического зондирования атмосферы в 1971-1974 гг. для среднесезонных месяцев (январь, апрель, июль) в Центральной части ЕТС, сопоставлены с соответствующими приземными значениями температуры T_0 . Оценки коэффициентов корреляции по приведенным на рисунке выборочным значениям дают: зимой $\hat{\rho}_{T_0, T_{\text{я}}}(\theta = 0^\circ) = 0,36$, $\hat{\rho}_{T_0, T_{\text{я}}}(\theta = 85^\circ) = 0,62$, летом $\hat{\rho}_{T_0, T_{\text{я}}}(\theta = 0^\circ) = 0,86$, $\hat{\rho}_{T_0, T_{\text{я}}}(\theta = 85^\circ) = 0,98$. Линии регрессии $\hat{T}_{\text{я}, T_0}(\theta)$ по T_0 для летнего периода года описываются уравнениями, определенными методом наименьших квадратов ($\nu = 53,4$ Гц):

$$\begin{aligned} \hat{T}_{\text{я}, T_0}(\theta = 0^\circ) &= 25,44 + 0,661T_0 (\text{°K}), \\ \hat{T}_{\text{я}, T_0}(\theta = 85^\circ) &= 10,12 + 0,956T_0 (\text{°K}). \end{aligned} \quad (2)$$

Выборочные стандартные отклонения $T_{\text{я}}$ от прогнозируемых по (2) значений $\hat{T}_{\text{я}}$ составляют: $\sigma_{T_{\text{я}}, T_0}(\theta = 0^\circ) = 2,28^\circ\text{K}$, $\sigma_{T_{\text{я}}, T_0}(\theta = 85^\circ) = 1,05^\circ\text{K}$. Вероятности нахождения значений $T_{\text{я}}$ по (2) с погрешностями, не превышающими 1°K и $1,5^\circ\text{K}$, в случае нормального закона распределения ошибок, равняются: при $\theta = 0^\circ$ $\Phi = 0,34$ и $0,49$, а при $\theta = 85^\circ$ $\Phi = 0,65$ и $0,85$.

Полученные результаты свидетельствуют о невысокой точности возможного прогноза $\hat{T}_{\text{я}}$ по величинам T_0 даже в летний, более благоприятный, период года (особенно при наблюдениях при небольших зенитных углах). Поэтому измерения яркостных температур атмосферы с погрешностями в $1 \pm 1,5^\circ\text{K}$ в континентальном районе действительно уменьшают неопределенность в информации о состоянии атмосферы по сравнению с априорными оценками по среднеклиматическим данным. Разумеется, что при дальнейшем повышении точности радиометрических измерений (например, до $\delta T_{\text{я}} \sim 0,5^\circ\text{K}$) будет возрастать и ценность этих измерений для решения рассматриваемой задачи. Указанная величина $\delta T_{\text{я}}$ приближается к точности зондирования, при которой в спектре излучения атмосферы могут быть зафиксированы особенности, обусловленные температурными инверсиями [8].

3. Восстановление профилей температуры в данной работе осуществлялось для безоблачных дней методом статистической регуляризации [9]. Исходное уравнение Фредгольма 1-го рода для восстановления профилей получается из решения уравнения переноса излучения в атмосфере в приближении Релея-Джинса:

$$T_{я, \theta} = \frac{1}{\cos \theta} \int_{P_{min}}^{P_0} T(P) \left\{ \frac{10^2 \gamma(P, T)}{\rho_g(P, T) g} \exp \left[-\frac{1}{\cos \theta} \int_P^{P_0} \frac{10^2 \gamma(P', T)}{\rho_g(P', T) g} dP' \right] \right\} dP \quad (3)$$

В (3) ρ_g - плотность воздуха в г/см³, g - ускорение силы тяжести в см/сек², коэффициент поглощения γ выражен в км⁻¹, давление P - в мбар.

Основные параметры радиометра, использовавшегося в измерениях, методика измерений, вопросы калибровки измерений и другие аналогичные вопросы рассмотрены в [6, 7]. Точность измерений яркостной температуры составляла $\pm 1,5^\circ\text{K}$. При решении задачи считалось, что распределение водяного пара в атмосфере известно[†]). Оптимизация условий наблюдения при спектральных и угломестных измерениях атмосферного излучения в аспекте решения рассматриваемой задачи в рамках метода статистической регуляризации выполнена в [5, 10].

Восстановление профилей температуры в данной работе осуществлялось в основном из угломестных радиометрических измерений на фиксированной частоте, но в методических целях проводилось и сравнение результатов восстановления по угломестным и спектральным (при небольшом разном рабочим частот) измерениям атмосферного излучения как с введением в решение дополнительной информации о температуре T_0 в приземном слое атмосферы, так и без введения соответствующей информации. Следует однако отметить, что угломестные измерения атмосферного излучения в данной работе выполнялись обычно в условиях, более приближающихся к оптимальным [10], нежели соответствующие спектральные измерения.

[†]) Неучет коэффициента поглощения водяного пара в (3) может привести в летних условиях к погрешностям $T_{я}$ равным $\sim 1+3^\circ\text{K}$ при $\theta = 0^\circ$ и $\sim 0,1+0,4^\circ\text{K}$ при $\theta = 80^\circ$.

Примеры восстановления профилей из экспериментальных данных приведены на рис. 2,3. Там же результаты восстановления профилей сравниваются с результатами аэрологического зондирования атмосферы, среднеклиматическими профилями и профилями, построенными методом оптимальной экстраполяции [11] по приземным значениям T_0 .

Из полученных результатов восстановления профилей температуры следует:

1) Высшие профили температуры в общем удовлетворительно (при реализованной точности радиометрических измерений) восстанавливаются в нижних слоях атмосферы ($h \approx 0 + 3$ км). Разность между восстановленными значениями и фактическими (зондовыми) данными $T(P)$ не превышала, как правило, $1 + 2^\circ\text{K}$.

2) Для большинства рассмотренных дней восстановленные профили из угломестных радиометрических измерений атмосферного излучения оказались предпочтительнее профилей, рассчитанных методом оптимальной экстраполяции.

3) Профили температуры, восстановленные из угломестных измерений атмосферного радиоизлучения на фиксированной частоте, оказались предпочтительнее в общем профилей, восстановленных из спектральных (при малом разносе рабочих частот $\delta\nu \sim 1$ Гц) измерений в зенитном направлении.

4) При наличии инверсий ошибка восстановления температуры на высотах инверсий возростала на несколько градусов.

Дальнейшее совершенствование измерительной аппаратуры и развитие методов решения соответствующей обратной задачи должны стимулировать дальнейший прогресс дистанционных радиофизических методов определения параметров атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

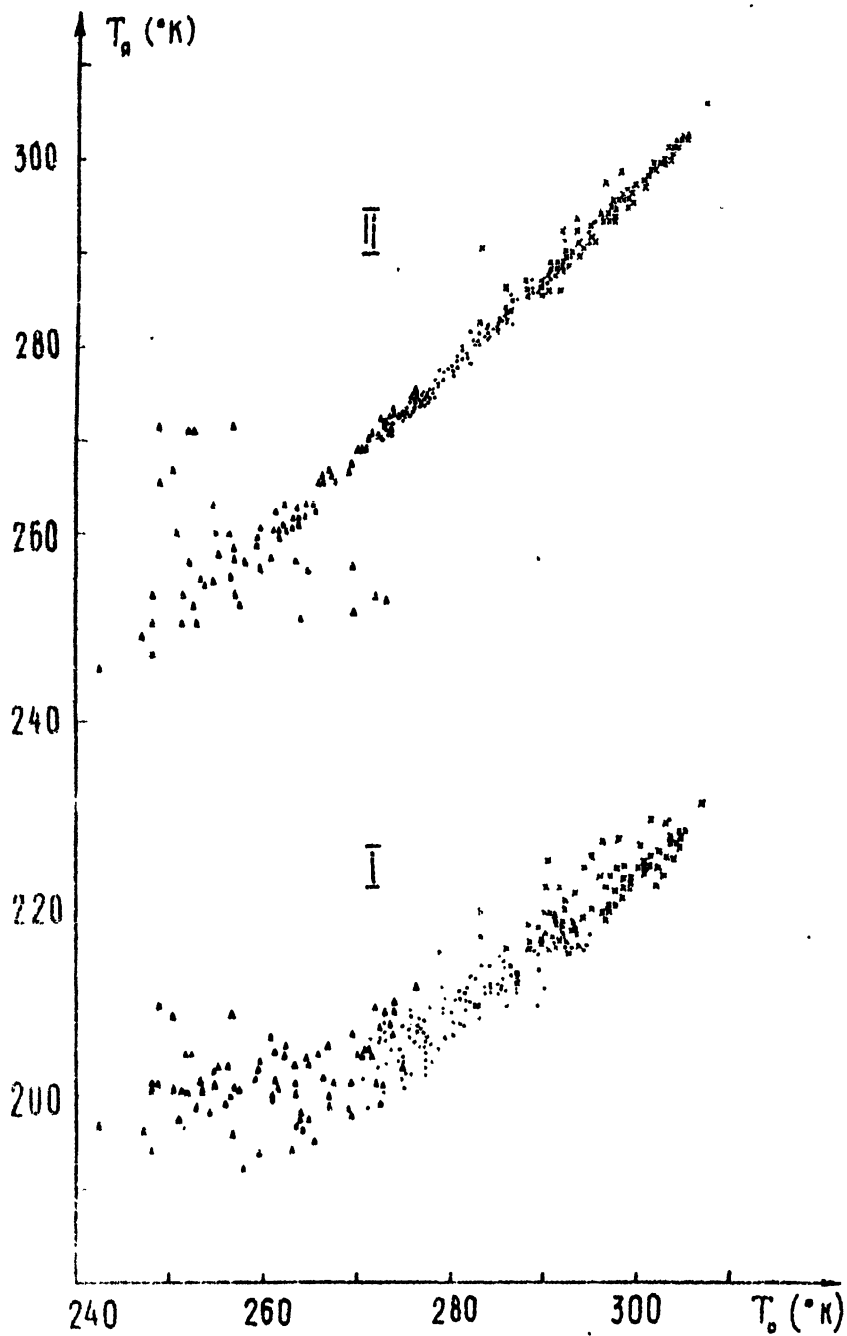
1. E.R. Westwater. Monthly Weather Review, 100, NI, 15 (1972).
2. G.F. Miner, D.D. Thornton, W.J. Welch. J. Geoph. Res., 77, 975 (1972).
3. D.H. Staelin, A.H. Barrett, J.W. Waters, F.T. Barath, E.T. Johnston, P.W. Rosenkranz, N.E. Gaut, W.B. Lenoir. Science, 182, 1339 (1973).
4. D.H. Staelin. Proc. of the 6-th Conference on Aerospace and Aeronautical Meteorology, 12-15 November, 1974. Publ. Amer. Meteor. Soc., Boston, p. 216.
5. А.Т. Ершов, А.П. Наумов, Изв. высш. уч. заведений, Радиофизика, 17, № 11 1810 (1974).
6. Ю.В. Лебский, Л.К. Сизьмина, А.М. Штанюк. Препринт № 64. НИРФИ. г. Горький, 1974 г.
7. Ю.В. Лебский, А.П. Наумов, В.М. Плечиков, Л.К. Сизьмина, А.В. Гроцкий, А.М. Штанюк. Изв. высш. уч. зав. Радиофизика, 18, № 12 (1975).
8. А.В. Троицкий. Изв. высш. уч. зав. Радиофизика (в печати).
9. В.Ф. Турчин, В.П. Козлов, М.С. Малкевич. Усп. физ. наук. 102 № 3, 345 (1970).
10. А.Т. Ершов, Ю.В. Лебский, А.П. Наумов, В.М. Плечков. Изв. АН СССР, сер. "Физика атмосферы и океана" (в печати).
11. Л.С. Гандин. Труды ГГО, вып. 114, 75 (1980).

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ.

Рис. 1. Сопоставление яркостных температур атмосферы $T_{\text{я}}$ на частоте $\nu = 53,4$ ГГц с приземными значениями температуры T_0 в континентальном районе (ЕТС): I - $\theta = 0^\circ$, II - $\theta = 85^\circ$, Треугольники - зима, точки - весна, кресты - лето.

Рис. 2. Пример восстановления температурного профиля $T(P)$ по угломестным измерениям атмосферного излучения на частоте $\nu = 53,4$ ГГц 4.IV.1974 г.: сплошная линия - зондовые значения $T(P)$, треугольники - среднеклиматические сезонные значения, один кружок - результаты восстановления из экспериментальных значений $T_{\text{я}}$ с привязкой к поверхностной температуре, два кружка - то же без привязки к поверхностной температуре, штриховая линия - профиль, вычисленный методом оптимальной экстраполяции.

Рис. 3. Пример восстановления температурного профиля $T(P)$ по угломестным измерениям атмосферного излучения на частоте $\nu = 53,4$ ГГц 13.VI.1974 г. Обозначения те же, что и на рис. 2.



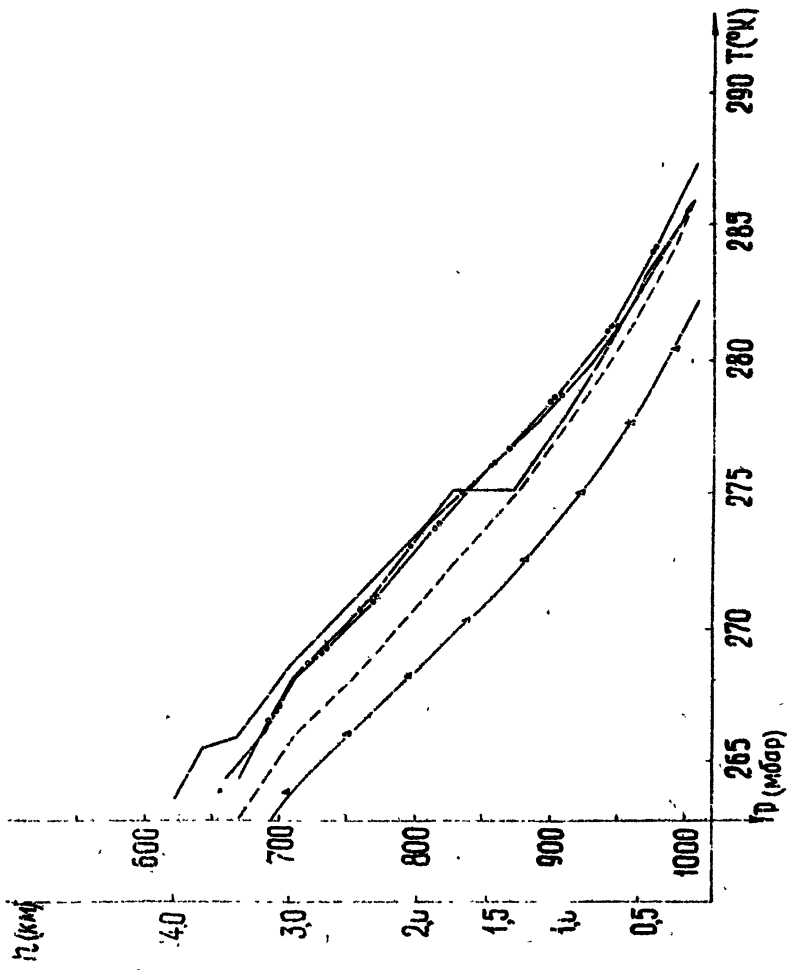


Рис. 2

12c.

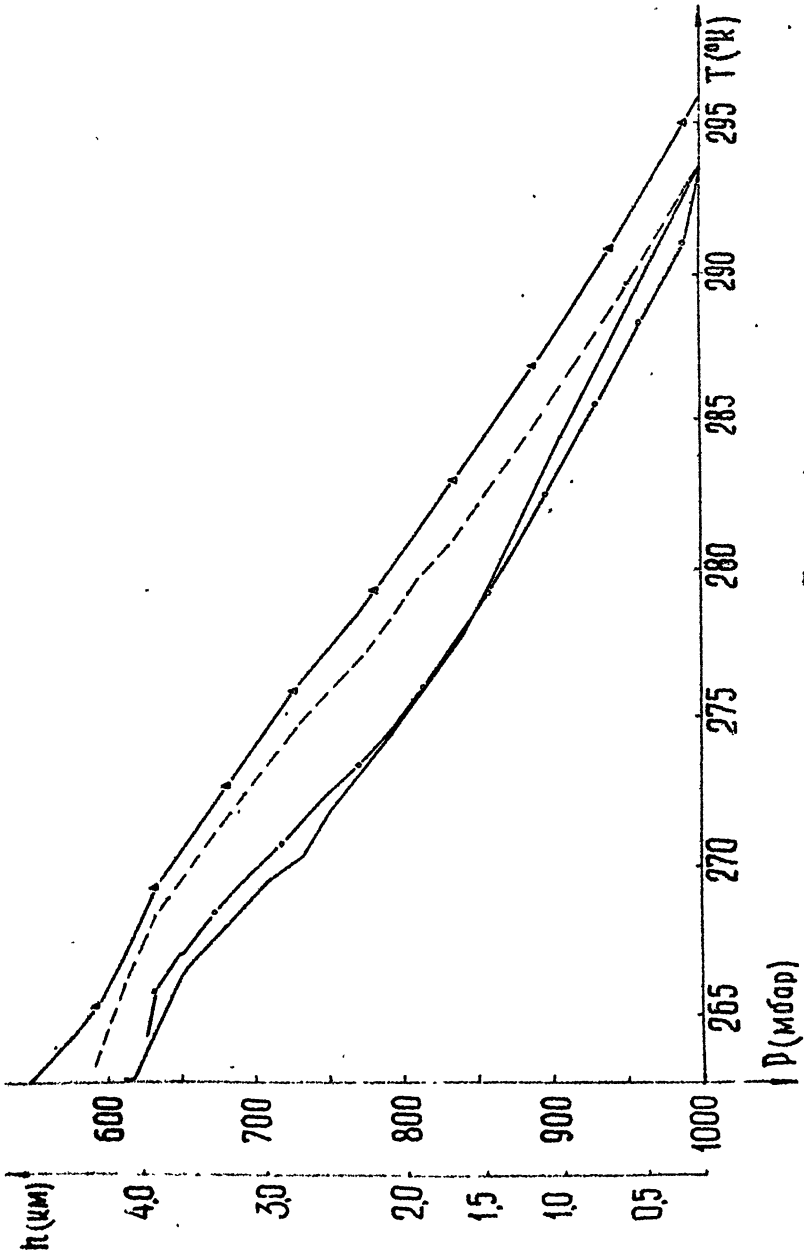


Рис. 3