

Государственный комитет РСФСР по делам науки и высшей школы
ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)
.....

П р е п р и н т № 322

ТЕРМИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ
В ЦЕНТРЕ ЛИНИИ ПОГЛОЩЕНИЯ КИСЛОРОДА
 $\nu = 60 \text{ ГГц}$

К. П. Гайнович
Е. Н. Кадыгров
А. С. Косов
А. В. Троицкий

Ни́жний Новгоро́д 1991

Г а й к о в и ч К. П., К а д ы г р о в Е. Н.
К о с о в А. С., Т р о и ц к и й А. В.

ТЕРМИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В ЦЕНТРЕ
ЛИНИИ ПОГЛОЩЕНИЯ КИСЛОРОДА $\nu = 60$ ГГц// Препринт № 322. - Нижний
Новгород: НИРФИ, 1991. - 13 с.

УДК 551.501.8

Предложен и экспериментально проверен радиометрический метод зондирования температуры пограничного слоя атмосферы в максимуме линии поглощения кислорода $\nu = 60$ ГГц. Разработан алгоритм обращения задачи, основанный на методе А.Н.Тихонова. Метод позволяет восстанавливать профиль температуры пограничного слоя $h = 0-500$ м с точностью $\sim 0,5$ К.

*) Е.Н.Калдыгров, А.С.Косов - сотрудники Центральной аэрологической обсерватории.

Пограничный слой атмосферы, расположенный между подстилающей поверхностью и свободной атмосферой, в зависимости от различных факторов имеет высоту от 100 до 1000 метров. Пограничный слой играет важную роль во взаимодействии атмосферы с земной поверхностью, близость которой обуславливает исключительное разнообразие профилей температуры $T(h)$ воздуха. Однако получение данных о высотном распределении температуры в пограничном слое встречает большие трудности. С помощью аэрологического зондирования, вследствие большой скорости подъема радиозонда, удается получить два-три значения температуры пограничного слоя на высотах, как правило, выше 300 метров. Этого явно недостаточно для определения высотного распределения температуры пограничного слоя.

Постановка задачи

В радиометеорологии известны методы дистанционного определения профиля температуры тропосферы по радиометрическим измерениям собственного излучения атмосферы на склоне полосы поглощения кислорода $\nu = 53-56$ ГГц /1-3/. Однако для достижения достаточного разрешения в пограничном слое на указанных частотах необходимо проводить измерения на очень низких углах места, что предполагает использование больших антенн с узкой диаграммой направленности. Точность абсолютных измерений при этом снижается, в то время как для термического зондирования пограничного слоя требуются измерения с очень высокой точностью (не хуже 0,1 К), поскольку вариации интенсивности радиоизлучения пограничного слоя незначительны. При восстановлении профиля температуры $T(h)$ в пограничном слое возникают также трудности при решении обратной задачи. Развитие в /1, 2/ методы статистической регуляризации предполагают использование априорной информации в виде ковариационных межуровневых связей $T(h)$.

Для пограничного слоя применение этого метода затруднительно, поскольку пространственное и временное разнообразие профилей $T(h)$ слишком велико, и не представляется возможным или практически оправданным выделить какой-либо представительный статистический ансамбль с устойчивыми ковариационными связями.

Физической основой термического зондирования пограничного слоя является использование собственного теплового радиоизлучения атмосферы в максимуме полосы поглощения кислорода $\nu \approx 60$ ГГц [4], где эффективная толщина слоя, формирующего излучение (толщина скин-слоя), составляет величину ~ 300 метров. Как обычно, под толщиной слоя, формирующего излучение, понимается высота H_B от поверхности Земли, на которой поглощение $\tau(H_B) = \frac{1}{\cos \theta} \int_0^{H_B} \gamma_{\nu}(h) dh = 1$ становится равным единице. Для пограничного слоя с достаточной степенью точности можно считать коэффициент поглощения $\gamma_{\nu}(h) = \text{const} = \gamma_{\nu}(0)$ и $H_B = \cos \theta / \gamma_{\nu}(0) \approx 300 \cdot \cos \theta$ м, где θ - зенитный угол зондирования. Таким образом, термическое зондирование пограничного слоя осуществляется приемом радиоизлучения атмосферы на различных зенитных углах в диапазоне $\theta = 0-90^\circ$. При этом толщина слоя, формирующего излучение, меняется в пределах $H_B \approx 0-300$ м.

В качестве исходной величины для получения физической информации об атмосфере в радиодиапазоне обычно используют значение яркостной температуры T_{ν} , выражение для которой в нашем случае имеет вид

$$T_{\nu}(\theta) = \frac{1}{\cos \theta} \int_0^H T(h) \gamma(h, T) \times \quad (I)$$

$$\exp \left(- \frac{1}{\cos \theta} \int_0^h \gamma(h', T) dh' \right) dh = \int_0^H T(h) K(h, \theta) dh,$$

где $H \approx 2$ км - верхняя граница, выше которой вкладом атмосферы в радиоизлучение можно пренебречь, K - ядро.

Уравнение (I) является уравнением Фредгольма I-го рода, решение которого, как известно, является некорректной задачей. От виде

используемой априорной информации зависит выбор алгоритма обращения (I). Для решения задачи по обращению (I) использовался метод А.Н.Тихонова в форме принципа обобщенной невязки.

Метод решения обратной задачи

Перепишем (I) в операторном виде

$$K T = T_{\text{я}}^{\delta},$$

$$K T = \int_0^H T(h) K(h, \theta) dh, \quad (2)$$

где $T_{\text{я}}^{\delta}$ — измеренная реализация яркостной температуры с погрешностью $\delta T_{\text{я}}$, которая удовлетворяет

$$(\delta T_{\text{я}})^2 \leq \|K T - T_{\text{я}}^{\delta}\|_{L_2}^2 = \int_{\theta_1}^{\theta_2} [T_{\text{я}}(\theta) - T_{\text{я}}^{\delta}(\theta)]^2 d\theta, \quad (3)$$

где $T_{\text{я}}(\theta)$ соответствует точному решению $T(h)$.

При решении (3) приходится иметь дело не с точным ядром K , а с приближенным ядром K_z , мера погрешности которого Z оценивается из

$$Z \geq \sup \frac{\|K T - K_z T\|}{\|T\|}. \quad (4)$$

Это происходит как из-за дискретизации задачи при ее численном решении, так и из-за некоторой нелинейности (температурной зависимости) ядра K , обусловленной зависимостью коэффициента поглощения радиоволн от температуры.

Решение (2), как известно, является некорректной задачей, т.е. при решении (2) без использования достаточной дополнительной априорной информации о виде распределения $T(h)$ малым значениям погрешности δ соответствуют сколь угодно большие ошибки определения $T(h)$. Возможность применения метода А.Н.Тихонова, который использует информацию о квадратичной суммируемости и (или) гладкости и точного решения /5/, для зондирования приземного слоя показаны в /6/.

Согласно /5/, для нахождения приближенного решения (2) необходимо минимизировать на соответствующем множестве функционал

$$M^{\alpha}(T) = \|K_z T - T_{\gamma}^{\delta}\|_{L_2}^2 + \alpha \|T\|_{W_2}^2 =$$

$$= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[\int_0^{\infty} K_z(\theta, h) T(h) dh - T_{\gamma}^{\delta}(\theta) \right]^2 d\theta + \alpha \int_0^{\infty} \left[T^2(h) + \left(\frac{dT}{dh}(h) \right)^2 \right] dh, \quad (5)$$

$\|x\|$ - обозначает норму x как элемента пространства L_2 или W_2^1 (определения см. в /5/). При этом, если параметр регуляризации α согласован с погрешностью измерений так, что он определяется как корень одномерного нелинейного уравнения обобщенной невязки

$$\rho(\alpha) = \|K_z T^{\alpha} - T_{\gamma}^{\delta}\|_{L_2}^2 - \left(\delta + z \|T^{\alpha}\|_{W_2} \right)^2 = 0, \quad (6)$$

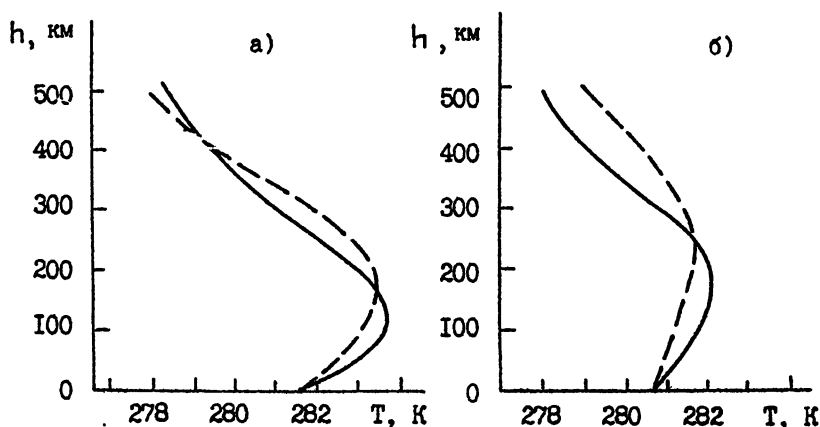
то при $\delta \rightarrow 0$ приближенное решение T^{α} равномерно сходится к точному решению $T(h)$, что составляет большое преимущество рассматриваемого метода по сравнению с другими, сходимость которых доказать, как правило, не удается. Отметим, что если в (5), (6) норма T берется в пространстве L_2 , то сходимость решения будет также в L_2 . Минимизация выпуклого функционала (5) осуществляется градиентными методами (например, методом сопряженных направлений). Мера

погрешности ядра Z определяется путем численного эксперимента. В рассматриваемом случае величина Z определяется главным образом нелинейностью уравнения, связанной с температурной зависимостью ядра K , и величина соответствующей погрешности $Z \parallel T \parallel \approx 0,03 \text{ K}$.

Метод позволяет гибко использовать и дополнительную информацию о точном решении $T(h)$ в виде ограничений, если, например, известно, что точное решение заведомо больше (или меньше) некоторой функции. Для этого надо минимизировать (5) на множестве положительно определенных функций, причем вместо $T(h)$ использовать отклонение $T(h)$ от функции-ограничения. Минимизация в этом случае достигается с помощью метода проекции сопряженных направлений.

При решении некорректной задачи нельзя установить справедливого во всех случаях соотношения между погрешностью измерения и ошибкой восстановления. Необходим численный эксперимент по замкнутой схеме, который позволяет судить о качестве восстановления для рассматриваемого класса точных решений и для рассматриваемого типа погрешностей, а также позволяет выбрать оптимальные параметры (набор углов) измерений.

Пример численного эксперимента по восстановлению $T(h)$ пограничного слоя представлен на рис. I. Видно, что при реализуемых в современной радиометрии точностях измерения $\delta T_{\text{я}} \approx 0,05 \text{ K}$ достигается хорошее качество восстановления профиля $T(h)$.



Р и с. I

Пунктир - расчетные значения, сплошная - восстановление

Уверенно регистрируется не только наличие приземной инверсии тем-пературы величиной $\Delta T = 2$ К, но и изменение ее высоты на $\Delta h = 50$ м. Выполнение численных экспериментов для различных модельных профилей с разными величинами дисперсии $\delta T_{\text{я}}^2$ моделируемой случай-ной нормально распределенной погрешности, а также с различной дис-кретизацией измерений по углу позволило установить следующее. Вос-становление при $\delta T_{\text{я}} \approx 0,05$ К эффективно до высот $\sim 0,5$ км, и средняя точность восстановления составляет $0,1-0,2$ К для гладких профилей, а для профилей с инверсиями $0,3-0,6$ К (как правило чем сильнее и резче инверсия, тем больше погрешность). Число независи-мых измерений на различных углах в интервале $0-85^\circ$ составляет не более 6 для заданной погрешности $\delta T_{\text{я}} \approx 0,05$ К. Для более слож-ных по форме профилей $T(h)$ число независимых измерений больше, чем для простых. С уменьшением погрешности измерений ошибки восстанов-ления уменьшаются, но относительно медленнее. Эти результаты пред-ставляют интерес, в частности, и потому, что в реальном экспери-менте довольно трудно получить для сравнения данные прямых измере-ний температуры в пограничном слое, особенно с точностью до деся-тых долей градуса, и тем самым, трудно сделать обоснованные выводы об эффективности восстановления.

Методика измерений

Для осуществления термического зондирования пограничного слоя в ИКИ АН СССР был разработан и изготовлен высокочувствительный су-пергетеродинный радиометр на $\nu = 60$ ГГц. Чувствительность радио-метра составила $\delta T_{\text{я}} = 0,06$ К при постоянной времени интегрирова-ния сигнала $\tau = 1$ с. В качестве приемной антенны используется ска-лярно-рупорная антенна с диаграммой направленности $\sim 6^\circ$. Такая ан-тенна обладает малым коэффициентом рассеяния вне главного лепестка $\beta \approx 1\%$, что обуславливает незначительное влияние боковых и задних лепестков диаграммы направленности на точность измерений при угло-вом сканировании.

Калибровка принимаемого радиоизлучения осуществляется с по-мощью двух "черных" эталонных излучателей, располагающихся в даль-ней зоне антенны $D \sim 1$ м и имеющих температуру либо окружающего воздуха T_0 , либо кипящего азота /3/. Яркостная температура азотно-го эталона $T_{\text{я}}$ рассчитывается по соотношениям для теплового излу-

чения слоистых сред. При калибровке таким методом выражение для измеряемой яркостной температуры имеет вид

$$T_{\text{я}} = T_0 - \frac{m}{m_{\text{к}}} (T_0 - T_{\text{Ая}}), \quad (7)$$

где m - разность показаний регистрирующего прибора при приеме радиоизлучения атмосферы и эталона при T_0 , $m_{\text{к}}$ - разность показаний при приеме радиоизлучения от эталонов при T_0 и $T_{\text{Ая}}$.

Остановимся подробнее на ошибках измерений $T_{\text{я}}$ при зондировании в максимуме полосы поглощения $O_2 \nu = 60$ ГГц, знание которых принципиально необходимо для решения обратной задачи по восстановлению профиля температуры. Про дифференцируем (7):

$$\delta T_{\text{я}} = \delta T_0 \frac{m}{m_{\text{к}}} (\delta T_0 + \delta T_{\text{Ая}}) + (T_0 - T_{\text{Ая}}) \delta \frac{m}{m_{\text{к}}}. \quad (8)$$

В выражении (8) первый член - ошибка измерения приземной температуры $\delta T_0 \approx 0,2$ К, которая связана только с точностью измерения термометра и имеет статический характер. Она вносит постоянную аддитивную добавку в измеряемую яркостную температуру на всех углах зондирования. Это не ведет к искажению формы ни зависимости $T_{\text{я}}(\theta)$, ни восстановленной зависимости $T(h)$, а только смещает их параллельно самим себе на величину ошибки термометра. При исследовании эффективности дистанционного метода путем сравнения с контактными погрешностью термометра можно пренебречь, т.к. она входит в оба метода с равным весом.

Точность определения яркостной температуры азотного эталона $\delta T_{\text{Ая}} \leq 1,5$ К [7]. Третий член в (8) представляет собой флуктуационную ошибку отсчета, измеряемую экспериментально и равную $\sim 0,03$ К при чувствительности радиометра $\delta T_{\text{я}} = 0,06$ К и времени интегрирования сигнала $\tau = 10$ с. Подставляя в (8) численные значения и учитывая, что $m = (T_0 - T_{\text{я}})\alpha \approx 3\alpha$, а $m_{\text{к}} = (T_0 - T_{\text{Ая}})\alpha \approx 200\alpha$, где α - коэффициент передачи радиометра, имеем величину случайной ошибки, равную $\delta T_{\text{я}} \approx 0,06$ К.

Важным положительным обстоятельством при термическом зондировании в области очень большого поглощения является то, что измерения яркостной температуры происходят как бы в "черном ящике" с температурой, приблизительно равной приземной температуре T_0 (контраст яркостной температуры атмосферы относительно T_0 составляет величину ~ 3 К). Как следствие этого факта, усредненная по боковым и задним лепесткам температура фона T_{Φ} отличается от $T_{Я}$ менее, чем на 3 К, и изменением T_{Φ} при угловом сканировании можно пренебречь. Действительно, выражение для измеряемой антенной температуры T_A , приведенной ко входу рупора, имеет вид

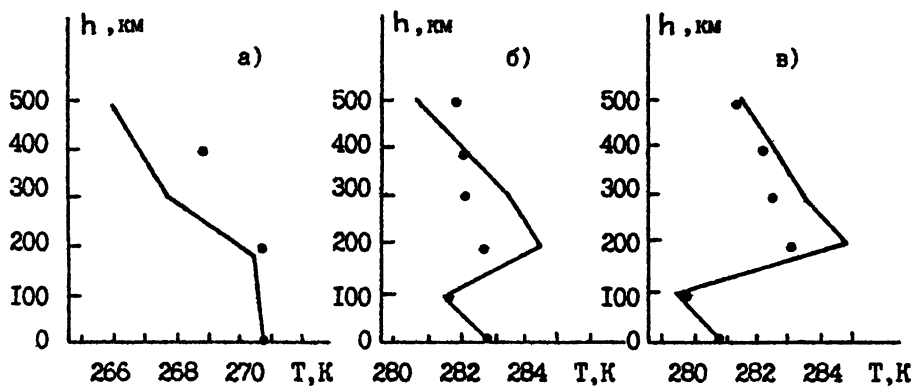
$$T_A = T_{Я} - \beta (T_{\Phi} - T_{Я}). \quad (9)$$

Оценки величин $T_{Я}$, T_{Φ} и β (см. выше) показывают, что вклад второго члена в (9) не превосходит 0,03 К. Естественно, что его изменения при угловом сканировании еще меньше (фактически реализуется ситуация, когда $T_A \approx T_{Я}$).

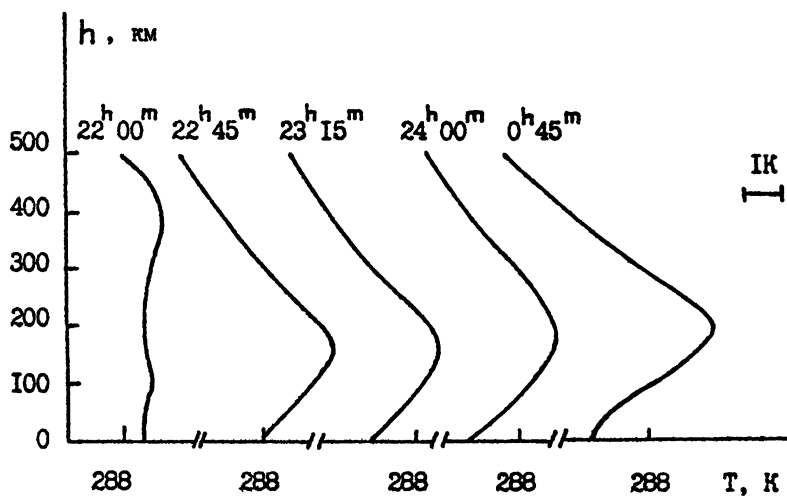
Таким образом, применение высокочувствительного радиометра, специальной антенны и специфические условия эксперимента ($T_{\Phi} \approx T_{Я}$) позволяют реализовать столь высокую точность измерений.

Результаты эксперимента

Термическое зондирование пограничного слоя выполнялось в 1989-1990 гг. на полигоне ЦАО в г.Рыльске с помощью радиометра на $\nu = 60$ ГГц и по методике, изложенной выше. Измерения проводились на 6 зенитных углах $\theta = 0,40, 60, 70, 80, 85^\circ$. При этом толщина слоя, формирующего излучение, составила величину $H_B(\theta) \approx 300, 225, 150, 100, 50, 25$ м. Восстановленные значения $T(h)$ сравнивались с данными контактных измерений, выполненных с помощью привязного аэростата. Примеры восстановления различных типов профилей $T(h)$ пограничного слоя приведены на рис.2, из которых видно, что стратификации $T(h)$ (изотермия, приподнятая инверсия различной мощности) уверенно восстанавливаются из радиометрических измерений. Расхождение контактных и дистанционных результатов зондирования в опре -



Р и с. 2



Р и с. 3

деления амплитуды инверсии может быть объяснено тем, что контактные измерения с аэростата "просмотрели" максимум инверсии, т.к. дискретизация измерений равнялась 100 м.

Существенным преимуществом радиометрического метода является возможность непрерывного слежения за изменением температуры пограничного слоя. На рис.3 показано восстановление динамики $T(h)$ пограничного слоя в процессе развития ночной инверсии. Видно, что изотермическое распределение трансформируется сначала в приземную, а затем в приподнятую инверсию.

Отметим, что, в отличие от термического зондирования тропосферы /1-3/, наличие облачности и тумана не сказывается на результатах зондирования пограничного слоя, т.к. поглощение в кислороде на $\lambda = 60$ ГГц в десятки раз превышает поглощение даже в мощных облаках. Так, например, вклад мощного облака с водозапасом $W = 2$ кг/м² и нижней границей 200 м в радиоизлучение составляет всего $\Delta T_{\text{я}} = 0,08$ К. Восстановление $T(h)$, приведенное на рис.2б, выполнено при наличии сильного тумана толщиной $\Delta h \approx 150$ м.

В ы в о д ы

Радиометрический метод термического зондирования пограничного слоя атмосферы позволяет:

- осуществлять термическое зондирование пограничного слоя до высоты $h \approx 500$ м с вертикальным разрешением ~ 50 м в интервале высот $h \approx 0-200$ и 100 м в интервале $h \approx 200-500$;
- реализовать точность восстановления профиля $T(h) \sim 0,5^\circ\text{C}$;
- уверенно регистрировать основные особенности профиля температуры (изотермию, приземную и приподнятую инверсию и т.д.) и их динамику;
- проводить измерения при наличии любой облачности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Westwater E.R. // Mon.Wea Rev. - 1972. - V.100, N 1. - P.15.
2. Алешин В.И., Наумов А.П., Плечков В.М., Сумин М.И., Троицкий А.В.//Изв.вузов. Радиофизика. - 1977. - Т.20, № 2. - С.198.

3. Троицкий А.В.//Изв.вузов. Радиофизика. - 1986. - Т.29, № 8.-
- С.878.
4. Гайкович К.П., Кадыгров Е.Н., Троицкий А.В., Шапошников А.Н.
Тезисы Всесоюзной конференции "Применение дистанционных ра -
диофизических методов в исследовании природной среды". Ереван,
1990. - С.28.
5. Тихонов А.Н., Гончаровский А.В., Степанов П.В., Ягола А.Г.Ре -
гуляризирующие алгоритмы и априорная информация. - М.: Наука,
1983. - 200 с.
6. Гайкович К.П., Сумин М.И. Тезисы 7-го Всесоюзного Совецания я
по радиометеорологии. Москва, 1986. - С.6.
7. Троицкий А.В. Радиофизические исследования атмосферы. - Л.:
Гидрометеоиздат, 1975.

Дата поступления статьи

28 января 1991 г.