

## Радиометрия как метод выявления аномалий и анализ данных радиозондирования

Е.В. Островский

ФГУП «Гидрометпоставка», г. Долгопрудный МО.  
Email: eugene.ostrovsky@gmail.com

*В работе исследовалась роль инверсий и оценивалось возможное их обнаружение радиометрической аппаратурой с различными техническими параметрами, в первую очередь – чувствительностью, шириной диаграммы направленности и углом сканирования.*

*The subject of the paper is how different technical characteristics affect the ability to determine inversions in atmosphere using passive radiometry.*

При сопоставлении синхронных данных микроволновых радиометрических измерений с данными, полученными в процессе влажностного радиозондирования, строгого совпадения результатов измерений даже общего содержания влаги в атмосфере ожидать не следует, даже если бы датчик влажности, установленный на радиозонде, и микроволновый радиометр точно измеряли влажность воздуха и уровень поступающего на вход радиометра излучения соответственно.

Это связано с тем, что радиозонд движется вместе с воздушным потоком, его может отнести даже при слабом ветре почти на десять километров от пункта радиометрических наблюдений. В дальнейшем необходимо доказать надежность методики сопоставления данных, полученных при таких совместных радиозондовых и радиометрических измерениях. Методика, применяемая при радиометрических измерениях, может существенно сказаться на результатах сравнительного анализа полученных данных.

В расчетах исследовалась роль инверсий и оценивалось возможное их обнаружение радиометрической аппаратурой с различными техническими параметрами, в первую очередь – чувствительностью, шириной диаграммы направленности и углом сканирования.

Для широкого диапазона углов визирования предполагается, что поглощение в атмосфере изменяется пропорционально  $\sec(\theta)$ , где  $\theta$  – угол визирования, отсчитанный от горизонта.

$$T_{\text{я}} = \bar{T}(\theta) [1 - e^{-\tau(\theta)}], \quad (1)$$

где  $\bar{T}(\theta) = \int \alpha T(h) dh$ .

Обратим внимание на то, что максимум зависимости  $\frac{dT_{\text{я}}(\theta)}{d\theta} \Delta\beta$  можно получить, приравняв вторую производную к нулю. При этом может быть использована как модель, не учитывающая рефракцию, так и модель, при которой используются рефракционные формулы. Так для простейшей модели, не учитывающей рефракцию:

$$\tau[\text{неп}] = 2\theta_m [\text{рад}],$$

а если учесть рефракцию, то

$$\tau[\text{неп}] = 2,2\theta_m [\text{рад}].$$

Угловая зависимость  $T_{\text{я}} = f(\sec(\theta))$  может быть использована при реализации так называемого «градиентного метода», который состоит в том, что в качестве исходных

данных в обработку поступает информация  $\frac{dT_{Я}(\theta)}{d\theta} \Delta\beta$ , где  $\Delta\beta$  – разность углов визирования  $\theta_1-\theta_2$  при антенне, направленной под углом  $\theta$  [1]. Величина  $\Delta\beta$ , в зависимости от ширины диаграммы направленности, может варьироваться от 1 до 3-4 градусов.

Ценность этого метода состоит в том, что он не требует абсолютной калибровки радиометрической аппаратуры, а лишь точного измерения угла визирования антенны относительно горизонта.

При реальных значениях интегральной влажности (2-5,0 кг/м<sup>2</sup>) и при рабочей длине волны радиометра 1.35 см, согласно расчетам, выполненным в [1], для обеспечения точности определения общего влагосодержания порядка 1 кг/м<sup>2</sup> требуется работать с узконаправленными антеннами, ширина диаграммы направленности которых составляет не более 20', а погрешность измерения угла визирования не должна превышать 5-10'. При больших влажностях и сохранении точности измерений максимум производной расширяется и точный отсчет угла становится практически невозможным. Поэтому возникает необходимость применения иных методов обработки информации, поступающей при таких измерениях. В таблице 1 приведены некоторые из них.

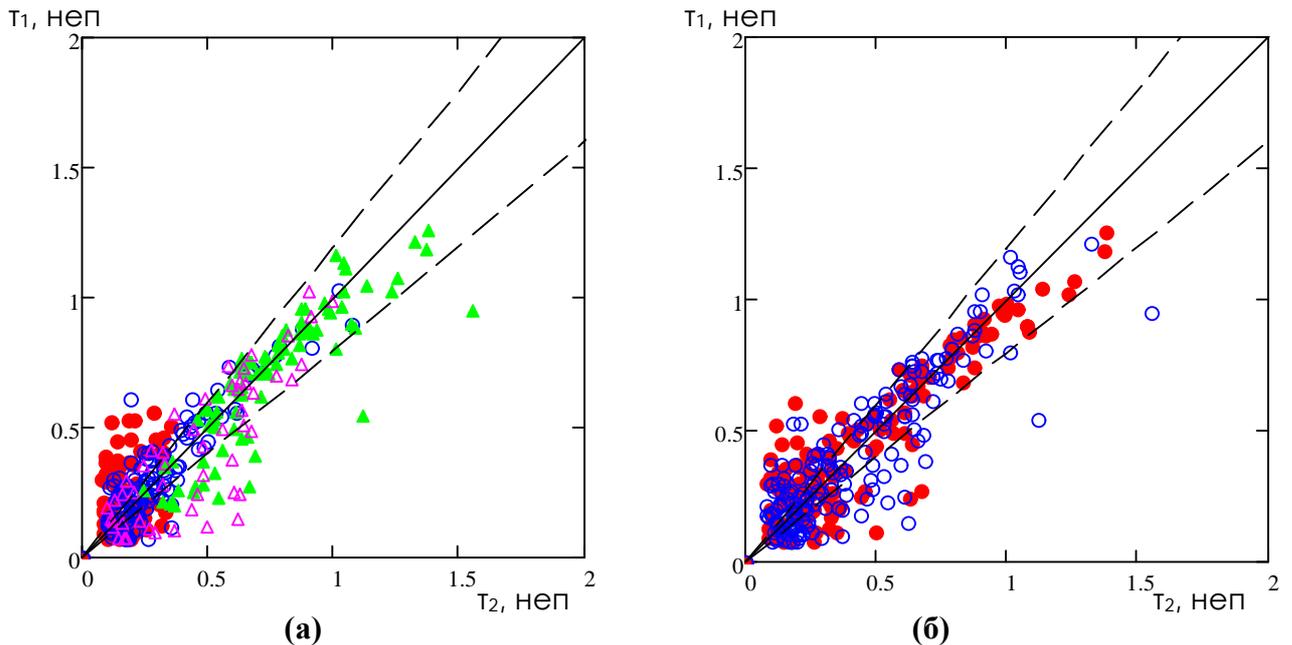
Таблица 1. Расчетные методы определения атмосферного поглощения

№	Метод	Измеряемая величина	Расчетные формулы
1	Метод абсолютных измерений	Фиксируется угол визирования, определяется радиояркая температура ТЯ,λ.	
2	Метод максимума градиента ТЯ	Определяется или вычисляется $\Delta T_{Я}(\theta)/\Delta\beta$ и $\theta_m$	Для изотермической атмосферы: $\tau=2*\theta_m$ Для неизотермической атмосферы: $\tau=2,2*\theta_m$
3	Ширина угломестной зависимости выходного сигнала радиометра	Определяется зависимость $u(\theta)$ ( $u$ – выходные показания радиометра в вольтах)	$\sigma = \sqrt{\theta^2 - (\bar{\theta})^2}$ $\overline{\theta^2} = \frac{\int_1^{75} \theta^2 u'(\theta) d\theta}{\int_1^{75} u'(\theta) d\theta}$ $\bar{\theta} = \frac{\int_1^{75} \theta u'(\theta) d\theta}{\int_1^{75} u'(\theta) d\theta}$
4	Интегральные методы	Определяется отношение интегралов зависимости $T_{Я}(\theta)$ , или ее производной в различных диапазонах углов места.	

Результаты численных экспериментов, теоретически иллюстрирующие методы из таблицы 1, приведены в [2]. В настоящей работе приведены результаты моделирования данных методов на основе реальных данных о высотном распределении температуры и влажности, полученных на сети радиозондирования. Выборка данных для численного эксперимента содержала результаты более 400 выпусков радиозондов. Данные радиозондирования в виде текстовых файлов-таблиц поступали на вход алгоритма обработки данных. Результатом работы программы являлись расчётные значения следующих величин: угловая зависимость радиояркой температуры  $T_{Я}(\theta)$ , градиент угловой зависимости  $\frac{dT_{Я}(\theta)}{d\theta} \Delta\beta$ , угол максимума градиента  $\theta_m$ , полное поглощение в зените  $\tau$  по методам 1-4 (см. Таблицу 1), медиана градиента, полное влагосодержание атмосферы  $R$ , абсолютная влажность у поверхности Земли  $a_0$ ,

Целью экспериментов являлась проверка применимости методов и алгоритмов обработки данных на реальных данных.

На рисунках 1(а, б) и 2(а, б) горизонтальная ось соответствует результатам расчёта полного поглощения в зените по формуле (1), по вертикальной оси отложены расчётные значения полного поглощения методами 2 и 3 из таблицы 1. Для расчёта использованы формулы вычисления поглощения из [3]. Различные символы на рисунках соответствуют различным временам года (рис. 1а и 2а) или различному времени суток (рис. 1б и 2б). Для наглядности на рисунках показаны прямые, соответствующие отклонениям в 20% в меньшую и в большую стороны от прямой  $y(x)=x$ .

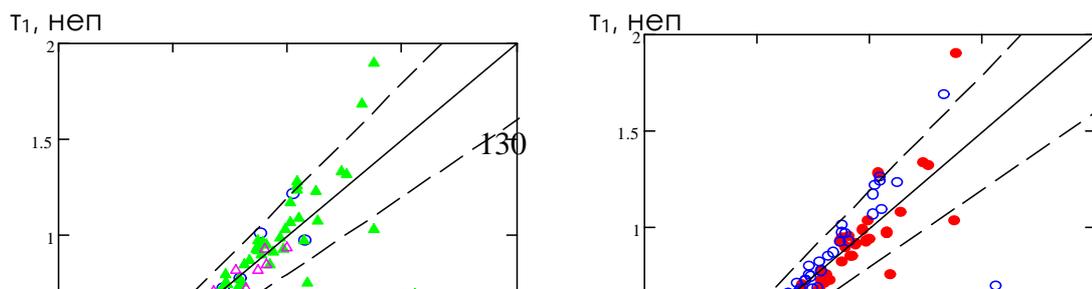


**Рис. 1. Сравнение методов максимума производной (ось абсцисс) и абсолютного измерения (ось ординат)**

Анализ результатов показал, что существует порог поглощения, ниже которого величина поглощения, определённая обоими методами, в несколько раз отличается от её расчётного значения. Как следствие, для зимнего периода, когда вероятность малого поглощения высока, данные методы не работают.

Указанные в таблице 1 методы неравноценны в смысле их информационных возможностей. При наличии инверсий в приземном слое площадные методы показывают более стабильные результаты, чем метод максимума градиента  $T_{\text{г}}$ . Это происходит из-за меньшей чувствительности интегральной величины к быстрым резким изменениям градиента. Однако, интегральные методы обработки данных требуют более совершенного аппаратного обеспечения для достижения той же точности.

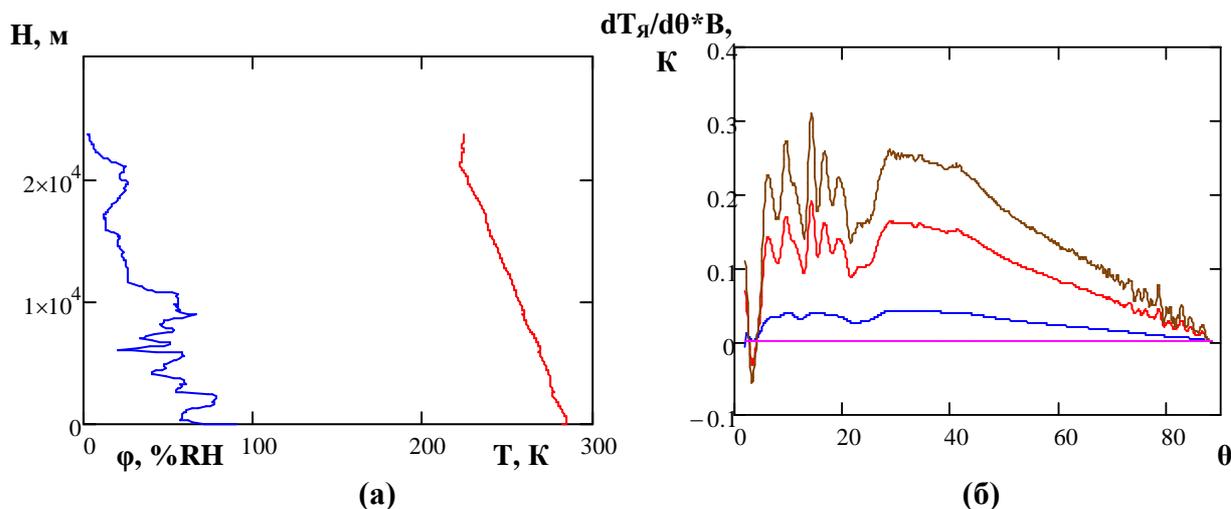
Анализ причин отклонения величины поглощения по методу максимума производной показал, что они относятся к одному из двух типовых случаев: когда при малом поглощении в атмосфере присутствуют инверсия или резкие колебания температуры или влажности в нижней тропосфере, либо когда в верхних слоях величина температуры начинает расти, а также при комбинации данных случаев (см. рис. 3).



(а) T<sub>4</sub>, НЭП (б) T<sub>4</sub>, НЭП

**Рис. 2. Сравнение методов ширины угломестной зависимости (ось абсцисс) и абсолютного измерения (ось ординат)**

В первом случае градиент углового распределения радиояркой температуры испытывает сильные колебания в зоне малых углов, где, как правило, располагается его максимум. Соответственно, метод максимума производной в этих условиях не работает. При наличии небольших инверсий возможно применить дополнительный сглаживающий фильтр или антенну с широкой диаграммой направленности. На рис. 3б приведены три расчётных градиента – для антенн с узкой (30 минут), средней (1 градус) и с широкой (8 градусов) диаграммой направленности. Сглаживание даёт возможность увеличить диапазон применимости метода максимума производной, однако при этом соответственно падает его точность из-за уменьшения абсолютных значений градиента.



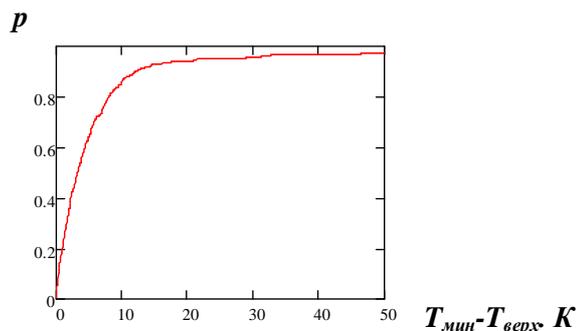
(а) (б)

**Рис. 3. Данные радиозондирования (а) и результат обработки (б) – угловое распределение градиента  $\frac{dT_{я}(\theta)}{d\theta} \Delta\beta$  вечернего выпуска радиозонда 29.7.2006 г**

Отдельно следует отметить, что при анализе данных радиозондирования обнаружено систематическое повышение температуры, отмечаемое радиозондом, в верхней части тропосферы и в зоне тропопаузы. Положительный градиент температуры в зоне тропопаузы в ходе моделирования выражается в повышении значения радиояркой температуры в области зенитных углов, что, в свою очередь, ведёт к завышенной величине поглощения, рассчитанной по формуле (1). В 10% выпусков

повышение температуры в верхней части тропосферы, показанное радиозондом, составляет 10 К и выше (см. рис. 4).

Известно, что погрешность показаний радиозонда в условиях низких температур растёт [4]. Поэтому, для целей численного эксперимента верхняя часть данных радиозонда в таких случаях отбрасывалась, что равносильно прекращению работы радиозонда на более низкой высоте.



**Рис. 4. Распределение вероятности появления положительной разности между температурой на максимальной высоте измерений и минимальной температурой по данным радиозондирования**

Численное моделирование с использованием радиозондовых данных о высотном распределении температуры и влажности подтвердило возможность применения расчётных методов для определения поглощения в атмосфере. Полученные результаты позволяют рекомендовать использовать для условий низких поглощений в зимний период, а также весной и осенью, радиометры, работающие на длинах волн с большим поглощением, чем то, что проявляется на 1,35 см. Раздельный анализ дневных и ночных выпусков не показал существенной разницы между ними с точки зрения выбора метода обработки данных. Площадные методы анализа градиента  $T_{\text{Я}}$  целесообразно применять при наличии резких колебаний температуры или влажности в нижних слоях тропосферы.

Радиометрический метод можно использовать для контроля результатов радиозондирования. В частности, проверка качества показаний радиозонда на большой высоте может быть выполнена путём анализа углового распределения радиояркостной температуры или его градиента.

### **Литература**

1. Горелик А.Г., Райкова Л.С., Фролов Ю.А. Сверхвысокочастотные радиометрические методы измерения влажности в нижней тропосфере. Метеорология и гидрология, 1975, №5, с. 106–111.
2. Горелик А.Г., Островский Е.В. микроволновые радиометрические методы определения поглощения и возможность их применения для влажностного зондирования атмосферы. Научный вестник МГТУГА, 2010.
3. Бин Б. Р., Даттон Е. Дж. Радиометеорология. Гидрометиздат. Л. 1971.
4. Островский Е.В., Фридзон М.Б. Надежность и достоверность определения общего влагосодержания дистанционными методами при их сопоставлении с данными стандартного радиозондирования атмосферы. Научный вестник МГТУГА, 2008.