

В.В. Розанов, В.С. Косцов

**ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАЗЕМНЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
В ОБЛАСТИ 0,8–1,35 СМ С ПАРАМЕТРИЗАЦИЕЙ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК**

Для ряда составляющих систематической ошибки, которые вне зависимости от конструктивных особенностей радиометра могут иметь место при спектрально-угловых измерениях радиояркой температуры нисходящего излучения в области длин волн 0,8–1,35 см, предложена простая параметризация в виде линейных функций от радиояркой температуры, соответствующей «среднему» состоянию атмосферы. На основе численных экспериментов и результатов обработки натуральных СВЧ-радиометрических измерений исследована эффективность использования предлагаемого подхода для исключения влияния систематических погрешностей рассмотренного типа. В частности, показано, что методика позволяет получать решение существенно нелинейной обратной задачи влажностного зондирования без применения специальных итерационных алгоритмов.

Введение. Радиометрические методы достаточно давно и интенсивно используются для определения различных параметров состояния как облачной, так и безоблачной атмосферы. В частности, измерения нисходящего радиотеплового излучения в области 0,8–1,35 см нашли широкое применение для определения профилей влажности, интегрального содержания водяного пара и водозаписа облаков [1, 6].

Основой для интерпретации наземных радиометрических измерений в этой области спектра является решение уравнения переноса микроволнового излучения, которое в отсутствие рассеяния (облачная атмосфера без осадков) может быть записано в следующем виде [1]:

$$\lambda, \theta, T, q, w, T_{\Phi} = \frac{1}{\cos \theta} \int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(z, T, q, w) T(z) \exp \left[-\frac{1}{\cos \theta} \int_0^z \alpha_{\lambda}(z', T, q, w) dz' \right] dz + T_{\Phi}(\lambda) \exp \left[-\frac{1}{\cos \theta} \int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(z, T, q, w) dz \right], \quad (1)$$

где z — высота; λ — длина волны; θ — зенитный угол; T — термодинамическая температура; q — влажность; w — водность облаков; T_{λ} — яркостная температура нисходящего излучения на уровне подстилающей поверхности; α_{λ} — коэффициент поглощения; $T_{\Phi}(\lambda)$ — яркостная температура фонового космического излучения, зависимостью которой от длины волны в рассматриваемой спектральной области можно пренебречь [9].

В силу нелинейности уравнения (1) относительно искомых метеопараметров атмосферы первым этапом решения обратной задачи является построение его линеаризованного аналога. Конкретные формы записи линеаризованного уравнения переноса можно найти, например, в [1, 4]. Если проведены измерения нисходящего радиотеплового излучения для некоторого набора длин волн и зенитных углов, то восстановление вертикального профиля какого-либо метеоэлемента (так называемая автономная задача) или совместное восстановление совокупности профилей (комплексная задача) [2]) сводится к решению следующего линейного конечномерного аналога уравнения (1):

$$\delta T_{\lambda} = A_{\lambda} \delta x + \varepsilon, \quad (2)$$

где δT_{λ} — вектор-столбец размерности $L \cdot \nu$, компонентами которого являются отклонения измеренных значений яркостной температуры от средних на длинах волн L и зенитных углах ν , δx — вектор-столбец, компонентами которого являются отклонения искомого метеопараметра от средних значений на N уровнях в атмосфере (при комплексном восстановлении δx представляет собой совокупный вектор вариаций искомых метеоэлементов [2]); A_{λ} — матрица, аппроксимирующая соответствующий линейный интегральный оператор; ε — вектор ошибок измерений, который будем представлять в виде суммы систематической и случайной составляющих ($\varepsilon = \varepsilon_c + \varepsilon_{сл}$).

Разработанные в настоящее время методы решения некорректных обратных задач позволяют построить решение только при наличии в правой части (2) случайной ошибки измерений [8]. Учет систематической составляющей осложняется, как правило, тем, что она зависит и от неизвестного состояния атмосферы.

Включение в алгоритм решения обратной задачи систематической составляющей можно осуществить двумя альтернативными способами: а) построить оценку δx с оператором A_x , игнорируя наличие систематической составляющей, а затем оценивая ее влияние на точность решения; б) попытаться оценивать систематическую составляющую наряду с искомым вектором δx в том же самом эксперименте. Для реализации обоих подходов необходима априорная информация о систематической составляющей ошибки измерений.

Целью настоящей работы является исследование возможностей второго подхода на основе параметризации компонент систематической ошибки измерений на примере решения обратной задачи восстановления вертикального профиля влажности безоблачной атмосферы, в этом случае уравнение (2) примет вид

$$\delta T_{я} = A_q \delta q + \varepsilon. \quad (3)$$

Основные соотношения. Полный анализ всей совокупности систематических составляющих ошибки измерения может быть выполнен лишь для конкретной радиометрической аппаратуры при известных условиях ее эксплуатации, поэтому здесь мы выделим лишь те составляющие систематической ошибки, которые в той или иной степени могут появляться при измерениях радиояркостной температуры вне зависимости от конструктивных особенностей радиометра. К ним в первую очередь будем относить: ошибки, обусловленные неточностью привязки по зенитному углу ε_θ ; ошибки, связанные с наличием космического фона ε_Φ ; ошибки калибровки ε_k ; ошибки линеаризации $\varepsilon_{л}$, которые будем формально интерпретировать как составляющую ошибки радиометрических измерений. Учитывая сложный характер их зависимости от неизвестного состояния атмосферы, целесообразно ввести их параметризацию в пространстве измерений (яркостных температур).

С этой целью рассмотрим характерный угловой ход систематических составляющих ошибок измерения и «полезного» сигнала — $f(\Theta)$ (вариаций яркостной температуры, обусловленных только вариациями вертикального профиля влажности), задаваемый на основе следующих соотношений:

$$\varepsilon_\Phi(\Theta) = T_{я}[\lambda, \Theta, \bar{q}, T_{\Phi 1}] - T_{я}[\lambda, \Theta, \bar{q}, T_{\Phi 2}]; \quad (4)$$

$$\varepsilon_\theta(\theta) = T_{я}[\lambda, \theta + \Delta\theta, \bar{q}, T_{\Phi 1}] - T_{я}[\lambda, \theta, \bar{q}, T_{\Phi 1}]; \quad (5)$$

$$f(\theta) = T_{я}[\lambda, \theta, \bar{q} + \delta q, T_{\Phi 1}] - T_{я}[\lambda, \theta, \bar{q}, T_{\Phi 1}]; \quad (6)$$

$$\varepsilon_k(\theta) = \gamma_k (T_k - T_{я}[\lambda, \theta, \bar{q}, T_{\Phi 1}]); \quad (7)$$

$$\varepsilon_{л}(\theta) = \delta T_{я}[\lambda, \theta, \delta q, T_{\Phi 1}] - f(\theta), \quad (8)$$

где $T_{я}[\dots]$ находится путем численного интегрирования (1) при соответствующих значениях аргументов, а $\delta T_{я}[\dots]$ — путем численного интегрирования его линеаризованного аналога; T_k — температура приземного слоя; γ_k — зависит от яркостной температуры в зените; \bar{q} — средний профиль влажности; δq — его вариация; $\Delta\theta$ — вариация зенитного угла.

В приведенных соотношениях (4)–(8) требует лишь некоторого обсуждения выражение для ошибки калибровки. При его выводе мы исходили из того, что при проведении радиометрических измерений в полевых условиях весьма удобно проводить калибровку аппаратуры на основе измерений яркостной температуры в направлении «на горизонт» и «в зенит» [1, 6]. При этом яркостная температура излучения при измерении «в зенит» может быть задана лишь весьма приближенно. Если считать, что яркостная температура измеренного излучения в направлении «на горизонт» известна и равна температуре приземного слоя, то ошибка калибровки, связанная с неопределенностью в значении яркостной температуры в направлении «зенит» может быть представлена выражением (7). Данная формула является частным случаем выражения для суммарной погрешности радиометрических измерений в случае абсолютной калибровки по двум реперам, подробный вывод и анализ которого представлен в [5]. Отметим, что и измерения в направлении «на горизонт», в свою очередь, осложняются тем, что боковые лепестки диаграммы направленности захватывают подстилающую поверхность, что может привести к значительным ошибкам. Однако предложенный подход в принципе позволяет учесть погрешности как в одной, так и в обеих калибровочных точках, что требует введения дополнительного параметра и модификации уравнения (7).

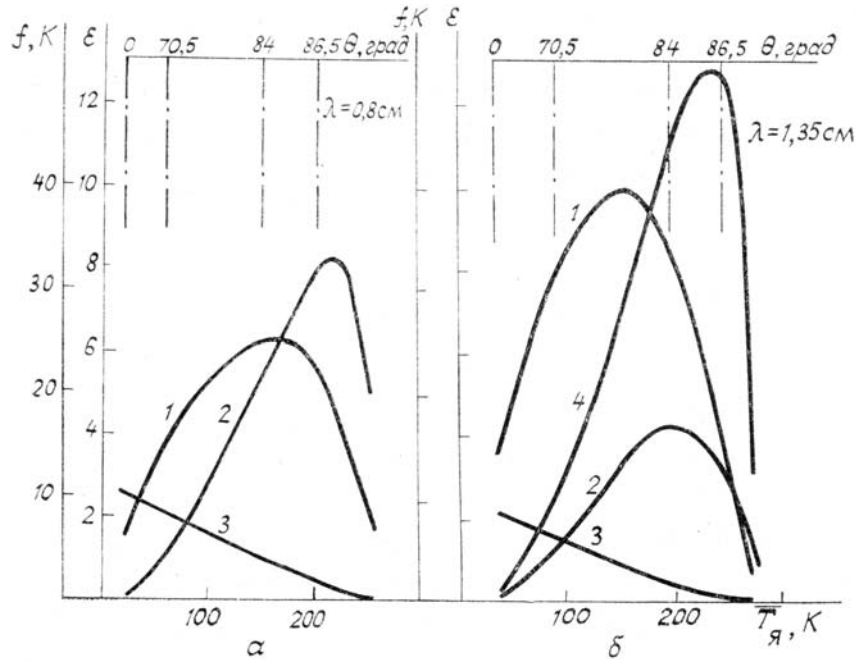


Рис. 1. Угловой ход полезного сигнала (f) и систематических составляющих ошибки наземных радиометрических измерений (ϵ_c): 1 — $f(\theta)$, 2 — $\epsilon_c(\theta)$, 3 — $\epsilon_\phi(\theta)$, 4 — $\epsilon_\lambda(\theta)$ ($T_{\phi 1} = 2,7$ К, $T_{\phi 2} = 0^\circ$ К, $\Delta\theta = 0,3^\circ$, вариации δq соответствуют 40% от среднего профиля)

Результаты расчетов составляющих систематических ошибок и «полезного» сигнала представлены на рис. 1, а, б (ошибки линеаризации для $\lambda = 0,8$ см не превышают десятых долей градуса и на рис. 1, а отсутствуют). Анализ данных, приведенных на рис. 1, указывает на два обстоятельства: во-первых, в интервале углов $0-86,5^\circ$ в пределах $\sim 1^\circ$ К составляющие систематической ошибки измерений могут быть представлены линейными функциями от средней яркостной температуры атмосферы, во-вторых, угловой ход полезного сигнала и составляющих систематической ошибки в указанном диапазоне углов существенно различается. Первое обстоятельство позволяет параметризовать составляющие систематической ошибки следующим образом:

$$\begin{aligned} \epsilon_\phi(\theta) &= \gamma_\phi(T_k - \bar{T}_y(\theta)); \quad \epsilon_\theta(\theta) = \beta_\theta \bar{T}_y(\theta); \\ \epsilon_\lambda(\theta) &= \beta_\lambda \bar{T}_y(\theta), \end{aligned} \quad (9)$$

где γ_ϕ , β_θ и β_λ — параметры, зависящие от длины волны, а $\bar{T}_y(\Theta) = T_y[\lambda, \Theta, \bar{q}, T_{\phi 1}]$. Второе обстоятельство говорит о возможности разделения «полезного» сигнала и систематической ошибки при интерпретации измерений нисходящего радиотеплового излучения атмосферы.

Отметим, что физической причиной, позволяющей использовать достаточно простую линейную параметризацию (9), является отсутствие эффектов «насыщения» яркостной температуры вплоть до зенитных углов, близких к $\pi/2$, обусловленное достаточно высокой прозрачностью атмосферы в рассматриваемой спектральной области. Суммируя все компоненты систематической ошибки измерений, получим следующее выражение для $\epsilon_c(\Theta)$:

$$\epsilon_c(\theta) = \beta \bar{T}_y(\theta) + \gamma(T_k - \bar{T}_y(\theta)), \quad (10)$$

где β и γ зависят только от λ , но не от Θ ; $\beta = \beta_\theta + \beta_\lambda$; $\gamma_\phi = \gamma_\phi + \gamma_k$.

Уравнение (3) с учетом (10) можно записать следующим образом:

$$f = A_q \delta q + A_p P + \epsilon_{c1}, \quad (11)$$

где P — вектор, компонентами которого являются параметры β и γ для длин волн 0,8 и 1,36 см: $P^T = (\beta_{0,8}, \beta_{1,35}, \gamma_{0,8}, \gamma_{1,35})$, а матрица A_p , составлена из элементов $\bar{T}_y(\lambda_i, \theta_j)$ и $T_k - \bar{T}_y(\lambda_i, \theta_j)$ $i = 1, 2$; $j = 1, \dots, v$.

Таким образом, из (11) видно, что использование приведенной выше параметризации систематической ошибки измерения требует оценки наряду с искомым вектором δq четырех дополнительных

параметров. В связи с этим примем в качестве решения уравнения (11) векторы $\hat{\delta q}$ и \hat{p} , доставляющие минимум следующему функционалу, записанному в энергетической норме:

$$\Phi = \|f - A_q \delta q - A_p P\|_{\Sigma}^2 + \|\delta q\|_D^2 + \|\delta q_s - S \delta q\|_s^2 + \|P\|_{D_p}^2, \quad (12)$$

где Σ – ковариационная матрица случайной компоненты ошибок измерения яркостной температуры; D – ковариационная матрица вектора δq ; δq_s – вектор «прямых» измерений влажности; s – оператор «прямых» измерений; Σ_s – матрица ошибок «прямых» измерений; $D_p^{-1} = rI$, I – единичная матрица размером 4×4 , $r = 10^{-4} \div 10^{-6}$. Ниже в качестве «прямых» измерений рассматриваются данные о приземном значении влажности, получаемые, например, гигрометром типа «Волна-1М» (абсолютная погрешность измерения относительной влажности $\pm 1,5\%$). В этом случае вектор δq_s является одномерным, матрица s состоит из одной строки, все элементы которой нулевые, за исключением первого, равного единице, а матрица Σ_s содержит один элемент, величина которого характеризует дисперсию прямых измерений.

Решая систему уравнений Эйлера для функционала (12), получим следующее выражение для оценки вектора $\hat{\delta q}$:

$$\hat{\delta q} = MA_q^+ \Sigma_s^{-1} f + MS + \Sigma_s^{-1} \delta q_s, \quad (13)$$

где

$$M = (A_q^+ \Sigma_s^{-1} A_q + S + \Sigma_s^{-1} S + D^{-1})^{-1}; \quad \Sigma_s = \Sigma + k A_p D_p A_p^+;$$

параметр k принимает значение 0 и 1. При $k = 0$ оценка (13) переходит в стандартную оценку метода статистической регуляризации с учетом результатов прямых измерений влажности на поверхности земли, при $k = 1$ дает оценку $\hat{\delta q}$ при наличии вектора дополнительных параметров p .

Теоретические оценки точности и результаты численных экспериментов. Из выражения (13) видно, что определение дополнительных параметров, характеризующих систематическую ошибку измерения, в рассматриваемом случае адекватно восстановлению вертикального профиля влажности с дополнительной эффективной ошибкой, определяемой ковариационной матрицей $A_p D_p A_p^+$. В связи с этим рассмотрим прежде всего теоретические оценки точности восстановления в случае учета систематической ошибки и при ее отсутствии, полученные на основе расчета матрицы M ($k = 1$, $k = 0$ соответственно), диагональные элементы которой ($\hat{\sigma}^2$) характеризуют дисперсии восстановления искомого профиля влажности. В расчетах предполагалось, что ковариационная матрица D соответствует модельной статистике [3], а случайные ошибки измерений некоррелированы с дисперсиями $\sigma_a^2 = 1K^2$.

Относительные погрешности определения профиля влажности $\hat{\sigma} / \bar{q}$ (%) радиометрическим методом (на основе расчёта матрицы ошибок)

Z, км	0,2	0,6	1,0	1,8	2,6	3,4	4,2	5,0	6,0
Стандартная методика ($k=0$)	12	16	17	19	22	23	24	26	30
Предложенная методика ($k=1$)	14	18	21	21	23	26	27	30	31

В таблице представлены теоретические относительные погрешности определения профиля влажности после проведения микроволнового эксперимента ($\lambda_1 = 0,8$ см, $\lambda_2 = 1,35$ см, $\Theta_{1-8} = 0,45; 60; 70,5; 75,5; 78,5; 84; 86,5^\circ$) с учетом прямых измерений влажности у поверхности земли. Укажем, что погрешности восстановления $q(z)$ только по данным приземных измерений с помощью метода статистической экстраполяции существенно выше и составляют $\sim 30\%$ уже на высотах порядка 1,5 км.

Необходимо отметить, что оценки погрешностей восстановления, выполненные для стандартной процедуры обращения уравнения (3), являются, вообще говоря, заниженными, поскольку во внимание принимается только случайная компонента ошибок радиометрических измерений. В этом смысле они характеризуют предельную (потенциальную) точность восстановления. Матрица ошибок, рассчитанная при $k = 1$, служит более адекватной характеристикой точности, поскольку она отражает влияние систематических погрешностей, хотя и в приближенной форме.

Как видно из приведенных в таблице данных, точность определения профиля влажности при совместном восстановлении δq и компонент параметризации ошибок незначительно отличается от потенциальной точности, расхождения составляют несколько процентов. Близость значений погрешно-

стей восстановления δq , соответствующих двум рассмотренным методикам, в свою очередь, подтверждает сделанный выше вывод о возможности разделения «полезного» сигнала и систематической составляющей ошибки.

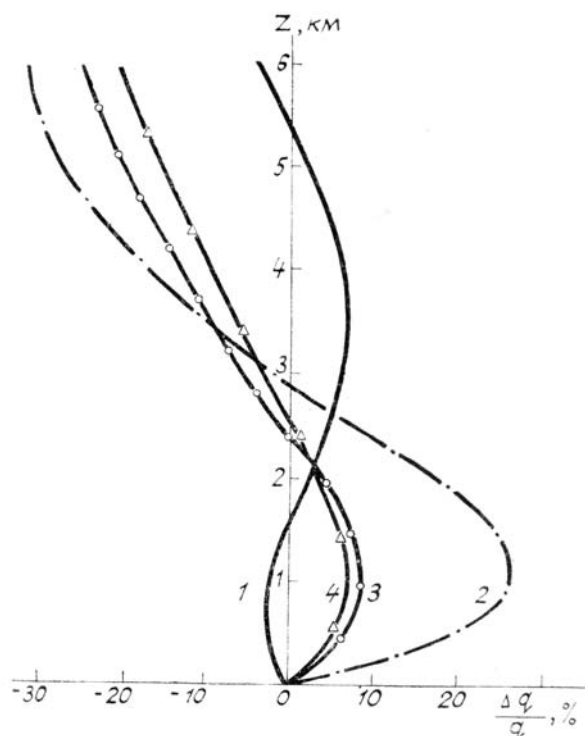


Рис. 2. Относительные погрешности восстановления профиля влажности по результатам численного эксперимента: 1, 2 – восстановление по стандартной методике в отсутствие (1) и при наличии (2) систематических ошибок; 3, 4 – восстановление по предлагаемой методике в отсутствие (3) и при наличии (4) систематических ошибок

Перейдем теперь к обсуждению результатов численных экспериментов, цель которых – продемонстрировать работоспособность предлагаемой методики как при наличии перечисленных выше составляющих систематической ошибки, так и при их отсутствии.

Исходными данными при проведении численных экспериментов выступали два массива яркостных температур, рассчитанных в соответствии с формулой (1). Первый массив «измерений» моделировал ситуацию, в которой присутствует как случайная, так и систематическая составляющая ошибки измерения. Величины систематических ошибок при этом в каналах 0,8 и 1,35 см соответствовали приведенным на рис. 1, ошибка в задании яркостной температуры «в зенит», используемой для внешней калибровки, принималась равной 3 К. Второй массив «измерений» содержал только случайную составляющую ошибки измерения.

На рис. 2 представлены погрешности восстановления вертикального профиля влажности ($\Delta q/q \cdot 100\%$) при обработке обоих массивов исходных данных стандартным методом (кривые 1, 2) и предлагаемым методом (кривые 3, 4). Отметим, что при использовании стандартного подхода для нейтрализации ошибок, обусловленных нелинейностью, использовался итерационный алгоритм, описанный в [7].

Анализ результатов численных экспериментов, приведенных на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы:

1. При наличии систематических ошибок в яркостной температуре погрешности восстановления профиля влажности стандартным методом могут быть в несколько раз больше, чем при их отсутствии (см. кривые 1 и 2 на рис. 2).

2. Использование предложенной методики исключения влияния систематической ошибки позволяет при ее наличии в результатах измерения яркостной температуры практически в два-три раза уменьшить погрешности определения профиля водяного пара по сравнению со стандартным методом (ср. кривые 2 и 4).

3. Отсутствие систематических ошибок в результатах измерения яркостной температуры практически не отражается на погрешностях восстановления профиля водяного пара (ср. кривые 3 и 4), что говорит о высокой «избирательности» предлагаемого метода по отношению к систематическим ошибкам указанного типа.

4. Погрешности восстановления $q(z)$ при наличии систематических ошибок тем не менее превышают «потенциальную» точность восстановления, однако, как видно из сравнения кривых 1 и 4, увеличение

погрешности восстановления не превышает 10%. Это представляется вполне естественным, так как то же количество измерений яркостной температуры используется для оценивания большего числа параметров.

В схеме решения обратной задачи с учетом систематических ошибок, вообще говоря, не предусмотрено раздельное восстановление всех компонент систематической составляющей ошибки. Однако в методических целях мы проанализировали точности восстановления различных составляющих. Анализ показал, что составляющие $\varepsilon_{\text{ф}}$, $\varepsilon_{\text{л}}$ и $\varepsilon_{\text{к}}$ восстанавливаются с достаточно высокой точностью ($\sim 0,3$; ~ 1 и $0,3^\circ\text{K}$ соответственно). Это свидетельствует, в частности, о том, что использование предложенной методики позволяет при интерпретации радиометрических измерений в области $0,8-1,35$ см не прибегать к итерационной процедуре корректировки ядер [7] для устранения ошибок линеаризации. Значительно большие погрешности восстановления характерны для ε_{Θ} . Их величина может достигать нескольких градусов. Это указывает на то, что при использовании предлагаемой методики особое внимание при проведении измерений следует уделять угловой привязке.

Интерпретация данных натурального эксперимента. Предлагаемая методика параметризации систематических составляющих погрешности радиометрических измерений и их учета непосредственно в алгоритме решения обратной задачи была апробирована при интерпретации данных серии наземных СВЧ-радиометрических измерений, проводимых на Карадагской экспериментальной базе ГГО им. А.И. Воейкова летом 1986 г. на аппаратном комплексе, работающем на длинах волн $\lambda_1 = 0,8$ и $\lambda_2 = 1,35$ см при значениях зенитных углов $\Theta = 0; 45; 60; 70,5; 75,5; 78,5; 84; 86,5^\circ$.

Переходя к обсуждению результатов обработки экспериментальных данных, необходимо отметить, что составляющая ошибки ε_{Θ} , вообще говоря, может носить как систематический, так и случайный характер, что определяется конкретными особенностями проведения углового сканирования. Эффективная матрица ошибок (если предположить случайный характер ε_{Θ}) примет вид

$$\Sigma_{\Theta} = \Sigma + \Sigma_{\text{сл}}^{\Theta} + k A_p D_p A_p^+, \quad (14)$$

где $\Sigma_{\text{сл}}^{\Theta}$ — диагональная матрица, элементы которой рассчитываются на основе априорных оценок погрешностей, обусловленных неточностью установки по зенитному углу.

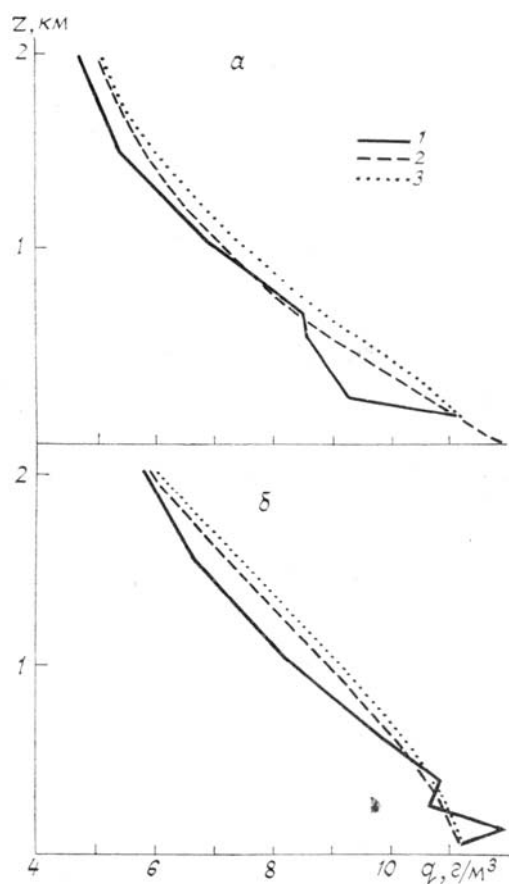


Рис. 3. Восстановление профиля влажности (Карадагская экспериментальная база ГГО им. А.И. Воейкова), *a* — безоблачная атмосфера, 07.06.86; *b* — сплошная слоистообразная облачность, 02.06.86. 1 — данные самолетных измерений; 2 — восстановление по стандартной методике; 3 — восстановление по предлагаемой методике

В связи с этим интерпретация данных натуральных измерений с помощью рассмотренного выше подхода была выполнена в предположении как систематического, так и случайного характера ошибки ϵ_Θ .

Результаты восстановления профилей влажности для безоблачной атмосферы, а также профилей влажности и водности при сплошной слоистообразной облачности, полученные стандартным методом в итерационной процедуре корректировки ядер [7] с использованием Σ_Θ вида (14) при $k = 0$, представлены в работе [3]. При обработке результатов эксперимента в [3] величина $T_\Phi = 2,7^\circ\text{K}$ явно учитывалась на этапе, предшествующем решению обратной задачи.

Сопоставление данных [3] и результатов восстановления профилей влажности по предложенной в настоящей работе методике, в которой так же исключена ϵ_Φ на предварительном этапе, иллюстрирует рис. 3. При решении обратной задачи наряду с восстановлением профилей влажности оценивалась величина суммарной систематической ошибки ϵ_c . Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) Полученные профили влажности (кривые 3 на рис. 3) в пределах нескольких процентов совпадают с результатами восстановления по стандартной методике (кривые 2), если используется предположение о случайном характере ошибки ϵ_Θ .

Значения $\epsilon_c(\Theta)$ на $\lambda = 0,8$ см не превосходят $0,5 - 1,0$ К, а $\epsilon_c(\Theta)$ на $\lambda = 1,35$ см возрастает с увеличением угла Θ , достигая ~ 10 К при $\Theta = 86,5^\circ$.

Полученные результаты говорят о том, что методика эффективно исключает погрешности, обусловленные нелинейностью задачи влажностного зондирования. Сопоставление величин $\epsilon_c(\Theta)$ на λ равной $0,8$ и $1,35$ см, позволяет сделать вывод о том, что ϵ_c в данном эксперименте обусловлена в основном ошибками линеаризации.

2) Расхождения между вертикальными профилями влажности, восстановленными в предположении о систематическом характере ошибки ϵ_Θ ($\Sigma_{сл}^0 = 0$), и данными самолетных измерений составляют $20 - 30\%$, следовательно, в рассматриваемом микроволновом эксперименте погрешности углового сканирования носят случайный характер.

3) Результаты восстановления показали работоспособность предложенной методики при комплексном восстановлении профилей влажности и водности при наличии облачности малой мощности (представленным на рис. 3, б результатам определения $q(z)$ соответствовала облачность с водозапасом $4,5 \cdot 10^{-2}$ кг/м²).

Основные выводы. На основе анализа угловой структуры ряда систематических составляющих погрешности наземных радиометрических измерений в области $0,8 - 1,35$ см представлена их параметризация и предложена методика их оценивания непосредственно в алгоритме решения обратной задачи.

Результаты численных экспериментов и интерпретации данных натуральных СВЧ-радиометрических измерений показали, что предложенная методика позволяет эффективно подавлять погрешности, обусловленные нелинейностью, наличием космического фона, а также ошибками калибровки.

Авторы благодарят Ю.М. Тимофеева за ряд замечаний, сделанных при подготовке статьи.

1. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
2. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М. //Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 5. С. 519—527.
3. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М., Точилкина Т.А. и др. //Труды ГГО. 1988. Вып. 526. С. 62—69.
4. Маркина Н.Н., Наумов А.П., Сумин М.И. К общей постановке обратных задач дистанционного зондирования атмосферы в микроволновом диапазоне. 1981. 47 с. (НИРФИ/Препринт № 149).
5. Петренко Б.З. //Исследование Земли из космоса. 1982. № 3. С. 83—89.
6. Степаненко В.Д., Шукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. //Л. Гидрометеиздат, 1987. 283 с.
7. Тимофеев Ю.М., Розанов В.В., Поляков А.В., Поберовский А.В. //Метеорология и гидрология. 1986. № 8. С. 66—73.
8. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 287 с.
9. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.

Ленинградский государственный университет

Поступила в редакцию
3 мая 1989 г.

V. V. Rozanov, V. S. Kostsov. Interpretation of Ground-Based Radiometric Measurements in the 0.8—1.35 cm Region Including a Parameterization of Systematic Errors.

For a number of components of a systematic error which, being independent of the peculiar features of a radiometer can occur in spectral-angular measurements of the brightness temperature of the downward going radiation in the wavelength region $0.8 - 1.35$ cm, a simple parameterization is proposed in the form of linear functions of the brightness temperature corresponding to the «average» state of the atmosphere. Based on the numerical experiments and on the results of processing SHF-radiometric measurements, the efficacy of using the proposed approach to eliminate the influence of systematic errors of the type considered is investigated. In particular, it is shown that the above method makes it possible to obtain the solution of an essentially nonlinear inverse problem of humidity remote sounding avoiding special iteration algorithm.