

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАНЕТАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Вествотер Е.Р., Вязанкин А.С., Гайкович К.П., Кадыгров Е.Н., Моисеев Д.Ю.

Выполнен статистический анализ ансамблей данных измерений профилей температуры пограничного слоя атмосферы тремя независимыми методами: радиометрическим, содаром и контактным, что позволило получить оценки среднеквадратичной погрешности каждого из этих методов в отдельности и оптимизировать алгоритм восстановления профилей температуры по радиометрическим данным путем минимизации его ошибки.

1. Введение.

Радиометрический метод восстановления профиля температуры по данным измерения теплового излучения на частотах в полосе поглощения кислорода с центром 60 ГГц развивался на протяжении более, чем трех десятилетий, начиная с работ [1-8], где были использованы измерения на склоне этой полосы и профиль восстанавливался до высоты несколько километров. Для решения проблемы регуляризации возникающей некорректной обратной задачи, сводящейся к интегральному уравнению Фредгольма 1-го рода, в этих работах применялись преимущественно методы, основанные на использовании метеорологической статистики.

В работах [9-11] было показано, что такой подход не учитывает специфики пограничного слоя атмосферы как с точки зрения информативности измерений, так и в аспекте решения обратной задачи. Действительно, вклад вариаций температурного профиля в пограничном слое в яркостные температуры на склоне полосы поглощения кислорода весьма невелик, в то время как этот слой характеризуется наиболее быстрой изменчивостью, связанной с теплообменом с поверхностью. Именно в этом слое обычно развиваются инверсии, приводящие к накоплению примесей в воздухе. С другой стороны, статистические методы решения обратной задачи тоже плохо соответствовали специфике пограничного слоя, связанной с влиянием весьма разнообразной подстилающей поверхности и быстрой динамики, когда трудно выделить какой-либо представительный статистический ансамбль, да и статистические данные для пограничного слоя имеются в немногих пунктах, где организованы специальные измерения на метеомачтах.

Для решения указанных выше проблем в [9] было предложено, во-первых, использовать угломестные измерения на частотах вблизи максимума кислородной полосы на 60 ГГц, что обеспечивало формирование излучения внутри пограничного слоя; во-вторых, был разработан метод решения обратной задачи, основанный на строгой теории некорректных задач Тихонова, который соответствовал специфике обратной задачи. В [10-11] этот метод был успешно применен для восстановления профиля температуры по данным угломестных измерений с помощью специально

разработанного радиометра. Высокая чувствительность этого широкополосного радиометра, низкий уровень влияния боковых лепестков, методика калибровки, основанная на создании большого контраста температур между эталонами, один из которых находился при температуре приземного слоя, минимизирующая погрешность шкалы, позволили реализовать точность измерений 0,05 К, необходимую для эффективного восстановления большинства типов распределений температуры в пограничном слое, даже включая приподнятые инверсии. Сравнения с данными прямых измерений подтвердили оценки точности метода.

В данной работе приводятся результаты испытаний полевого варианта радиометрического комплекса, способного работать в автоматическом режиме при достаточно редкой упрощенной процедуре автоматической калибровки, с компактной рупорно-скалярной антенной, обладающей относительно широкой диаграммой направленности (9°). Полученные данные позволили адаптировать алгоритм восстановления, основанный на методе Тихонова, с учетом реальных характеристик получаемых данных, как за счет определения некоторых его свободных параметров (параметр эффективной интегральной погрешности, верхний предел высоты восстановления), так и путем включения в алгоритм механизма контроля и коррекции решения, исправляющих ситуацию, когда реальная погрешность оказывается существенно больше, чем заданная как параметр метода. При решении задачи алгоритм был модифицирован для учета интегрирования по форме диаграммы направленности.

С ноября 1996 г. по март 1997 г. в Боулдерской атмосферной обсерватории (Boulder, США) проводилось сравнение различных методов измерения профилей температуры планетарного пограничного слоя атмосферы (ППА) [12-13]. В исследованиях были использованы дистанционные и контактные приборы Национального агентства по исследованию океана и атмосферы (NOAA) США: акустический содар, контактные датчики, установленные на метеорологической вышке, радиозонды, а также российский сканирующий радиометр миллиметрового диапазона волн. На метеорологической вышке высотой 300 м на уровнях 10, 50, 100, 200 и 300 м были установлены контактные датчики - платиновые термометры сопротивлений с номинальной погрешностью измерения температуры 0,2 К, съем данных производился каждые 15 минут. Акустический содар (RASS) работал на частоте 915 МГц в высотном интервале до 615 м при вертикальном разрешении 60 м и номинальной погрешности измерений 1,0 К. Информация с содара поступала каждый час, однако следует отметить, что данные содара были достоверны далеко не во всех метеорологических условиях, т.е. для сравнений были использованы примерно 20% данных содарных измерений.

Российский сканирующий радиометр МП-5 имел следующие основные характеристики: центральная частота - 59,8 ГГц, полоса пропускания 4 ГГц, чувствительность 0,04 К при постоянной интеграции 1 сек; шаг сканирования 9° ; темп измерений - 5 мин. [11-12]. Данные радиометра были достоверны во всех метеорологических условиях, за все время сравнений не было ни одного

случая отсутствия радиометрических данных. Первые результаты сравнений показали высокую степень сходимости данных, полученных разными методами [12,13]. Высокая степень надежности и точности исходной измерительной информации (100 профилей температуры, определенных тремя методами одновременно, и 2000 - радиометрическим методом и измерениями на метеорологической вышке) дают хорошую возможность для детального анализа погрешностей восстановления профилей температуры ППА по данным радиометрических измерений на основе сравнения с результатами других независимых измерений температуры.

Наиболее важным моментом анализа является то обстоятельство, что при наличии трех способов независимого определения температуры статистический анализ разностных статистических характеристик позволяет получить оценки стандартного отклонения каждого из трех методов в отдельности от истинного температурного профиля. Решая же прямую задачу, то есть рассчитывая радиояркостную температуру по данным двух других методов, и, затем, сравнивая с данными сканирующего радиометра, можно аналогичным образом из анализа трех статистических ансамблей получить реальные оценки среднеквадратичной погрешности измерений радиометрического комплекса МП-5. Наконец, это позволяет оптимизировать методику восстановления температурного профиля, добиваясь наименьшей среднеквадратичной погрешности восстановления.

2. Методика восстановления температурного профиля.

Восстановление профиля температуры основано на решении уравнения, связывающего профиль температуры $T(h)$ с яркостной температурой теплового излучения атмосферы T_B , измеряемой на частоте 60 ГГц в зависимости от угла места θ :

$$T_B(\theta) = \int_0^{\infty} T(h)K(h,\theta)dh \cong \frac{1}{\cos\theta} \int_0^{\infty} T(h) \gamma e^{-\gamma h/\cos\theta} dh \quad (1)$$

где K - ядро уравнения, γ - коэффициент поглощения теплового излучения воздуха на частоте 60 ГГц. Оценки [9-11] показывают, что зависимостью γ от температуры и давления в пределах пограничного слоя атмосферы можно пренебречь. Тогда уравнение получает простой вид, приведенный в правой части (1). Однако алгоритм решения в первом приближении учитывает эту зависимость и при необходимости допускает итерационную процедуру для решения уравнения как нелинейного, в чем, как было установлено, нет необходимости.

Учитывая довольно большую ширину диаграммы направленности сканирующего радиометра, был разработан алгоритм, учитывающий отличие антенной и яркостной температур. Антенная

температура представляет собой свертку яркостной температуры с формой диаграммы направленности по углу места:

$$T_B(\theta_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\theta - \theta_0) d\theta \int_0^{\infty} T(h) K(h, \theta) dh = \int_0^{\infty} T(h) dh \int_0^{\infty} \Phi(\theta - \theta_0) K(h, \theta) d\theta \quad (2)$$

Внутренний интеграл в (2) образует новое ядро K' в уравнении для антенной температуры, которое также является уравнением с постоянными пределами типа Фредгольма 1-го рода:

$$T_A(\theta_0) = \int_0^{\infty} T(h) K'(h, \theta_0) dh \quad (3)$$

а) метод Тихонова

Основной подход к решению (3), также, как и уравнения (1) в [9-11], основывался на применении принципа обобщенной невязки Тихонова (см. [15], с.101), использующем весьма общую информацию о квадратичной суммируемости точного решения и его производной, который решает проблему для класса непрерывных функций и который хорошо согласуется со спецификой рассматриваемой задачи.

Перепишем (3) в операторном виде, опуская далее индекс s:

$$\mathbf{K}'T = T_B^\delta \quad (4) \text{ где } T_B^\delta -$$

вектор данных, полученных с некоторой погрешностью, мерой которых в методе Тихонова служит интегральная погрешность δT_B , определяемая как

$$\delta T_B^2 = \left\| \mathbf{K}'T - T_B^\delta \right\|_{L_2}^2 = \frac{1}{\theta_0^{\max}} \int_0^{\theta_0^{\max}} [T_B(\theta_0) - T_B^\delta(\theta_0)]^2 d\theta_0 \quad (5)$$

где T_B - правая часть (4), которая соответствует точному решению $T(h)$, $\|x\|_{L_2}^2$ - норма функции x в пространстве L_2 [15], θ_0^{\max} - максимальное значение θ_0 , в рассматриваемом случае близкое к $\pi/2$.

В методе Тихонова [15] приближенное решение минимизирует сглаживающий функционал

$$M^\alpha(T) = \left\| \mathbf{K}T - T_B^\delta \right\|_{L_2}^2 + \alpha \|T\|_{W_2^1}^2, \quad (6)$$

т.е. может быть найдено путем его минимизации. В приведенных выше соотношениях

$$\|T\|_{W_2^1}^2 = \frac{1}{h^{\max}} \int_0^{h^{\max}} [T(h)^2 + (h^{\max} \frac{dT(h)}{dh})^2] dh$$

обозначает норму функции $T(h)$ как элемента

функционального пространства W_2^1 (пространство квадратично суммируемых функций, имеющих квадратично суммируемые производные) [15], h^{\max} - высота верхней границы слоя, в котором ищется решение. Задача минимизации выпуклого функционала, каковым является (6) после соответствующей дискретизации задача сводится к своему конечномерному аналогу, представляющему собой хорошо изученную с вычислительной точки зрения задачу квадратичного программирования, и решается стандартными градиентными методами. В данной работе применялся метод сопряженных градиентов, описание которого можно найти, например, в [16], с.273, (в [15] приводится его алгоритм на языке Fortran). Численная реализация метода, в данной работе написанного на языке Borland Pascal 7.0, решает задачу за 0,5 секунды на PC IBM-Pentium-200.

Параметр регуляризации α во втором слагаемом (6) определяет степень сглаженности приближенного решения. Именно это стабилизирующее слагаемое обеспечивает выпуклость, а, следовательно, и саму возможность минимизации функционала и решения задачи. Полученное решение выделяет среди множества функций, удовлетворяющих исходному некорректному уравнению такую, которая является минимальной в смысле используемой нормы стабилизирующего слагаемого W_2^1 , содержащей и саму функцию и ее производную, т.е. реализует условие некоторого компромисса минимальности по абсолютной величине и гладкости для искомой функции. Как показано в [15], параметр регуляризации, и это является большим достоинством метода обобщенной невязки, оказывается однозначно связанным с интегральной мерой погрешности данных (числом), убывая по мере убывания уровня погрешности, но более медленно. При этом по мере увеличения точности роль второго стабилизирующего слагаемого в (6) постепенно уменьшается. Параметр α находится как корень одномерного нелинейного уравнения обобщенной невязки:

$$\rho(\alpha) = \left\| \mathbf{K}'T^\alpha - T_B^\delta \right\|_{L_2}^2 - \delta^2 = 0, \quad (7)$$

где T^α - функция, минимизирующая функционал (6), т.е. алгебраическое уравнение (7) решается совместно с функциональным уравнением (6). Смысл (7) состоит в том, что норма невязки полученного решения должна быть в точности равна норме погрешности, поскольку нет оснований минимизировать отклонение от данных измерений за пределами уровня ошибок. В уравнение (7) входит параметр эффективной погрешности δ , который должен быть определен априори, исходя из конкретных условий решения задачи. Этот параметр должен включать в себя все составляющие

ошибок измерения и интерпретации. В частности, в δ должна быть включена ошибка измерений δT_B , как случайная, так и систематическая, а также погрешность ядра δ_h , которая включает в себя погрешность дискретизации при численном решении и возможную неточность его аппроксимации соответствующими функциями:

$$\delta^2 = \left\| \mathbf{K}_h T - T_B \delta \right\|_{L_2}^2 \leq (\delta T_B + \delta_h)^2 \quad (8)$$

В методе Тихонова значения входящих в (8) параметров должны представлять собой соответствующие оценки по максимуму на классе возможных реализаций для искомой функции. При этом величина параметра регуляризации α , а следовательно, и степень сглаженности решения, связываются с величиной параметра эффективной погрешности δ . Последнее обстоятельство является весьма существенным достоинством метода, поскольку теперь субъективизм исследователя переносится с области интерпретации экспериментальных данных на оценку погрешности своих измерений. Поскольку оценка погрешности всегда содержит некоторую неопределенность, существует возможность выбора стратегии решения. Так, если ставится задача заведомого исключения несуществующих деталей в решении, то лучше принять оценку погрешности с некоторым избытком, что, конечно может привести к заглаживанию некоторых реальных деталей тонкой структуры. Если при решении задачи более важным представляется не пропустить эти детали, то следует принять наименьшую ошибку из области ее реально возможных значений. В этом случае, однако, становится возможным появление в решении и не существующих реально (ложных) деталей. Правильная оценка ошибки дает оптимальное в смысле метода Тихонова решение. После определения величины δ процедура получения конечного результата становится формальной.

Очень важное преимущество метода обобщенной невязки по сравнению с другими известными методами состоит в том, что при стремлении δ к нулю в интегральной метрике приближенное решение сходится к точному равномерно, т.е. в метрике, где нормой является максимум модуля, хотя, как правило, в отличие от корректных задач, скорость сходимости не пропорциональна уменьшению δ , а более медленная. Равномерная сходимость позволяет использовать для оценки погрешности метода единичные численные эксперименты с типичными или экстремальными исходными распределениями, что невозможно сделать в случаях, когда имеет место интегральная или среднеквадратичная сходимость.

Параметр δ_h определяется на основе численного моделирования и задачей создания эффективного алгоритма является его минимизация до уровня, пренебрежимо малого по сравнению с погрешностью измерений. В методе Тихонова [15] также рассматривается роль возможной несовместности уравнения типа (3) со своей правой частью, что приводит к некоторому

дополнительному вкладу в эффективную погрешность, который не превышает уровня ошибок измерения. В данной работе, поскольку эффективная погрешность все равно является искомым параметром, минимизирующим среднеквадратичную погрешность восстановления на ансамбле данных, мы не останавливаемся на введении этой составляющей.

Численное моделирование показало, что существенное улучшение точности восстановления может быть получено, если решать уравнение как отклонение от достаточно близкого к точному решению первого приближения, которое должно принадлежать к классу функций, на котором решение ищется. При этом правая часть (3) представляет собой отклонение измеренной зависимости яркостных температур от рассчитанной для 1-го приближения.

б) точное решение для линейного профиля

Существуют упрощенные подходы к решению уравнений типа (3), основанные на применении различного рода аппроксимаций решения известными функциями, использования разложений в ряд по степеням аргументов или по собственным функциям ядра, ограничиваясь несколькими первыми слагаемыми. Наиболее простой метод восстановления профиля температуры - это применение точного решения (1) для линейного профиля температуры

$$T(h) = T_0 + \frac{dT}{dh} h \quad (9)$$

В этом случае решение записывается [14] как

$$T(h) = T_B(h_{eff} = h), \quad h_{eff} = \frac{\cos\theta}{\gamma}, \quad (10)$$

где h_{eff} - эффективная толщина слоя, где в основном формируется тепловое излучение для заданного угла места (толщина скин-слоя). Видно, что линейный профиль является собственной функцией ядра (1). Применение (10) для решения задачи может быть оправдано тем обстоятельством, что типичное распределение температуры в тропосфере обычно близко к линейному.

в) точное решение для квадратичного профиля

Можно продвинуться еще дальше в разложении решения по степеням высоты и получить точное решение для квадратичного профиля

$$T(h) = T_0 + \frac{dT}{dh} h + \frac{1}{2} \frac{d^2T}{dh^2} h^2 \quad (11)$$

в виде

$$T(h = h_{eff}) = T_B(h_{eff}) + \frac{1}{4} \frac{d^2T_B}{dh_{eff}^2}(h_{eff}) h_{eff}^2 \quad (12)$$

Из решения (12) видно, что точное решение для линейного профиля (10) отчасти справедливо и за пределами своей применимости, поскольку входит в качестве первого слагаемого в (12), а слагаемое, содержащее первую производную в (12) отсутствует и ряд продолжается слагаемым, содержащим уже вторую производную. Решение для квадратичного профиля наглядно иллюстрирует некорректность рассматриваемой обратной задачи, требуя вычисления второй производной по экспериментальным данным.

3. Результаты статистического анализа.

Описанные в предыдущем разделе методы были применены для восстановления профилей и последующего статистического анализа, основанного на трех ансамблях (число измерений $N = 100$) высотных профилей температуры: измеренных датчиками метеомачты (T_{tw}), содаром (T_{RASS}) и восстановленных по радиометрическим данным (T_R), а также трех ансамблей яркостных температур: рассчитанных по профилям температуры, измеренным на метеомачте ($T_{B_{tw}}$) и содаром ($T_{B_{RASS}}$), и измеренных сканирующим радиометром (T_{BR}). Для вычисления яркостных температур (что особенно существенно на высоких зенитных углах) данные метеомачты и содара дополнялись линейно убывающим с высотой профилем со стандартным градиентом 6,5 К/км, что соответствовало наибольшему сближению вычисленных яркостных температур с данными радиометра.

Каждый из трех ансамблей характеризуется независимыми погрешностями определения истинной температуры (δT_{tw} , δT_{RASS} , δT_R) или яркостной температуры ($\delta T_{B_{tw}}$, $\delta T_{B_{RASS}}$, δT_{BR}) в зависимости от высоты или зенитного угла соответственно. Их искомыми статистическими характеристиками являются средние значения ($\langle \delta T_{tw} \rangle$, $\langle \delta T_{RASS} \rangle$, $\langle \delta T_R \rangle$) и дисперсии ($\sigma T_{B_{tw}}^2$, $\sigma T_{B_{RASS}}^2$, σT_{BR}^2), а также средняя по зенитному углу дисперсия случайной составляющей ошибки метода Тихонова (5) σT_B^2 . Из экспериментальных данных можно получить оценки статистических характеристик ансамблей, связанные с искомыми:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_{B_R-RASS} = \langle T_{B_R} \rangle - \langle T_{B_{RASS}} \rangle = \langle T_{B_R} - T_{B_{RASS}} \rangle = \langle \delta T_{B_R} - \delta T_{B_{RASS}} \rangle = \langle \delta T_{B_R} \rangle - \langle \delta T_{B_{RASS}} \rangle, \\ \Delta T_{B_R-tw} = \langle T_{B_R} \rangle - \langle T_{B_{tw}} \rangle = \langle T_{B_R} - T_{B_{tw}} \rangle = \langle \delta T_{B_R} - \delta T_{B_{tw}} \rangle = \langle \delta T_{B_R} \rangle - \langle \delta T_{B_{tw}} \rangle, \\ \Delta T_{B_{RASS}-tw} = \langle T_{B_{RASS}} \rangle - \langle T_{B_{tw}} \rangle = \langle T_{B_{RASS}} - T_{B_{tw}} \rangle = \langle \delta T_{B_{RASS}} - \delta T_{B_{tw}} \rangle = \langle \delta T_{B_{RASS}} \rangle - \langle \delta T_{B_{tw}} \rangle, \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_{R-RASS} = \langle T_R \rangle - \langle T_{RASS} \rangle = \langle T_R - T_{RASS} \rangle = \langle \delta T_R - \delta T_{RASS} \rangle = \langle \delta T_R \rangle - \langle \delta T_{RASS} \rangle, \\ \Delta T_{R-tw} = \langle T_R \rangle - \langle T_{tw} \rangle = \langle T_R - T_{tw} \rangle = \langle \delta T_R - \delta T_{tw} \rangle = \langle \delta T_R \rangle - \langle \delta T_{tw} \rangle, \\ \Delta T_{RASS-tw} = \langle T_{RASS} \rangle - \langle T_{tw} \rangle = \langle T_{RASS} - T_{tw} \rangle = \langle \delta T_{RASS} - \delta T_{tw} \rangle = \langle \delta T_{RASS} \rangle - \langle \delta T_{tw} \rangle, \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma T_{B_R-RASS}^2 = \langle (T_{B_R} - T_{B_{RASS}} - \langle T_{B_R} - T_{B_{RASS}} \rangle)^2 \rangle = \sigma T_{B_R}^2 + \sigma T_{B_{RASS}}^2, \\ \sigma T_{B_R-tw}^2 = \langle (T_{B_R} - T_{B_{tw}} - \langle T_{B_R} - T_{B_{tw}} \rangle)^2 \rangle = \sigma T_{B_R}^2 + \sigma T_{B_{tw}}^2, \\ \sigma T_{B_{RASS}-tw}^2 = \langle (T_{B_{RASS}} - T_{B_{tw}} - \langle T_{B_{RASS}} - T_{B_{tw}} \rangle)^2 \rangle = \sigma T_{B_R}^2 + \sigma T_{B_{tw}}^2, \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma T_{R-RASS}^2 = \langle (T_R - T_{RASS} - \langle T_R - T_{RASS} \rangle)^2 \rangle = \sigma T_R^2 + \sigma T_{RASS}^2, \\ \sigma T_{R-tw}^2 = \langle (T_R - T_{tw} - \langle T_R - T_{tw} \rangle)^2 \rangle = \sigma T_R^2 + \sigma T_{tw}^2, \\ \sigma T_{RASS-tw}^2 = \langle (T_{RASS} - T_{tw} - \langle T_{RASS} - T_{tw} \rangle)^2 \rangle = \sigma T_R^2 + \sigma T_{tw}^2, \end{array} \right. \quad (16)$$

Системы уравнений (13) и (15) относительно средних значений ошибок являются, к сожалению, линейно зависимыми, и позволяют получить только оценки средней разности температуры для каждой пары из трех различных методов в зависимости от высоты. Учитывая, однако, что эта зависимость (или зависимость от зенитного угла - для яркостных температур) независима для трех методов, можно полагать, что абсолютная величина максимума разности систематических ошибок будет не хуже максимального систематического отклонения худшей двух пар методов. Следует также заметить, что исключение систематической ошибки не является столь серьезной проблемой, как минимизация случайных погрешностей.

Дисперсии же случайных ошибок могут быть определены для каждого из трех методов путем решения систем уравнений (14) и (16):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma T_{B_R}^2 = \frac{\sigma T_{B_R-RASS}^2 + \sigma T_{B_R-tw}^2 - \sigma T_{B_{RASS}-tw}^2}{2}, \\ \sigma T_{B_{RASS}}^2 = \frac{\sigma T_{B_R-RASS}^2 - \sigma T_{B_R-tw}^2 + \sigma T_{B_{RASS}-tw}^2}{2}, \\ \sigma T_{B_{tw}}^2 = \frac{-\sigma T_{B_R-RASS}^2 + \sigma T_{B_R-tw}^2 + \sigma T_{B_{RASS}-tw}^2}{2}, \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma T_R^2 = \frac{\sigma T_{R-RASS}^2 + \sigma T_{R-tw}^2 - \sigma T_{RASS-tw}^2}{2}, \\ \sigma T_{RASS}^2 = \frac{\sigma T_{R-RASS}^2 - \sigma T_{R-tw}^2 + \sigma T_{RASS-tw}^2}{2}, \\ \sigma T_{tw}^2 = \frac{-\sigma T_{R-RASS}^2 + \sigma T_{R-tw}^2 + \sigma T_{RASS-tw}^2}{2}, \end{array} \right. \quad (17)$$

Дисперсия ошибки метода Тихонова $\sigma_{T_B}^2$ определяется из (5) интегрированием по зенитному углу дисперсии $\sigma_{T_B}^2(\theta_0)$, полученной из первого соотношения (16).

На рис.1 представлены результаты определения погрешности радиометрических измерений.

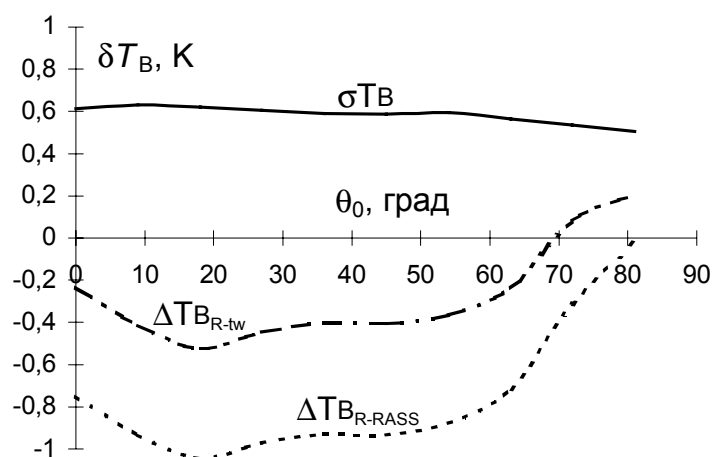


Рис.1.

Можно видеть, что уровень случайной погрешности в ходе непрерывных измерений в автоматическом режиме оказался выше, чем номинальная точность измерений 0,04 К. Среднеквадратичная величина случайной составляющей погрешности метода Тихонова, определенная по данным, представленным на рис.1, составила $\sigma_{T_B} = 0,5$ К. Средние значения отклонений измеренных яркостных температур от результатов расчетов по профилям температуры метеомачты оказались малы по сравнению со случайной ошибкой. Для содара систематическое отклонение больше, что обусловлено, как будет показано ниже, худшим качеством данных. На рис.2 можно видеть гистограмму плотности вероятности распределения ошибки метода Тихонова в интервалах шириной 0,1 К такой, какой она была бы, если считать, что профили температуры содара (черный цвет) или метеомачты (белый) являются точными (относительное число среднеквадратичных по углу отклонений измеренной яркостной температуры от рассчитанной по профилям содара или метеомачты).

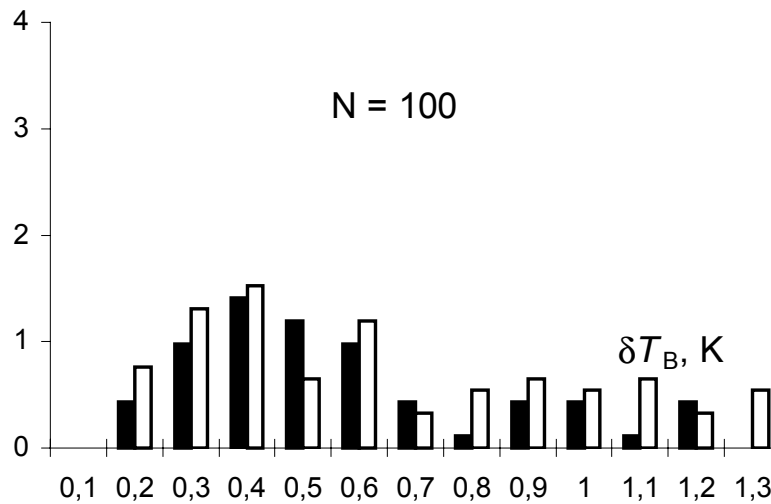


Рис.2.

Положение максимума плотности вероятности для метеомачты и для содара (0,4 К) оказалось близко к определенному выше значению стандартного отклонения метода Тихонова (0,5 К), но для содара данные более неравномерны по своему качеству, что, очевидно, связано с помехами, зависящими от неопределенности скорости ветра. Более высокий уровень погрешностей радиометрических измерений по сравнению с номинальным (0,04 К) помимо упрощенной процедуры калибровки может быть связан как со имеющимися случаями очень быстрой динамики температурного режима, так и с ошибкой датчика температуры эталона излучения, который находился при температуре приземного слоя воздуха. В методике калибровке его показания, что естественно, рассматривались как истинные, но в данном случае, когда имеются независимые контактные измерения, погрешность датчика, составляющая 0,1 - 0,2 К, с неизбежностью вносится в измерения. Эта погрешность имеет в каждом измерении систематический характер по зенитному углу, но в ансамбле она проявляется как случайная.

Возможность определения среднеквадратичной погрешности восстановления температурного профиля позволила оптимизировать алгоритм восстановления. Оказалось, что оптимальным является выбор ошибки метода Тихонова $\delta = \sigma T_B = 0,4$ К. При ее уменьшении точность решения несколько возрастает в интервале высот ниже 150 м, но уменьшается выше 150 м. Наоборот, с ростом этого параметра точность решения возрастает выше 150 м, но падает в приземном слое. Оптимальное значение верхней границы высоты слоя h_{\max} , в котором осуществляется восстановление (интервал, на котором ищется решение) составило $h_{\max} = 1,5$ км, но интегрирование по высоте с учетом модельного профиля должно выполняться до высоты 5 км. Оптимальным начальным приближением, в виде отклонения от которого искалось решение, оказался линейный профиль, до высоты 500 м соответствующий точному решению уравнения для линейного профиля (10) с использованием

яркостной температуры, измеренной в зенитном направлении. Выше 500 м профиль начального приближения продолжается как линейный, убывающий с градиентом 6,5 К. Среднеквадратичное отклонение яркостных температур от рассчитанных для такого первого приближения составляет около 2 К при полной величине среднеквадратичных вариаций 10 К, которое почти точно соответствует величине температурных вариаций в слое 0 - 500 м.

Численные эксперименты показали, что учет формы диаграммы направленности улучшает точность восстановления в приземном слое 0 - 50 м, что однако нельзя обнаружить на основе имеющихся данных, поскольку измерения температуры осуществлялись именно с таким интервалом.

Были исследованы простые алгоритмы решения для линейного и квадратичного профилей. Оказалось, что метод, основанный на точном решении для квадратичного профиля (12) имеет большую погрешность даже при аппроксимации измеренной зависимости яркостной температуры от зенитного угла сплайнами. Его погрешность превышала 1 К на высоте 100 м.

Простой метод решения, основанный на точном решении для линейного профиля (10) также исследовался на основе имеющихся данных. При этом значения температур, полученные из (10), в интервалах между уровнями формирования теплового излучения для соответствующих зенитных углов интерполировались кубическими сплайнами. При относительно невысокой точности измерений яркостной температуры среднеквадратичная погрешность этого метода оказалась близкой к ошибке метода Тихонова, хотя надо отметить, что это - в первую очередь результат близости среднего распределения температуры к линейному, где и проявляются естественные преимущества (10) как точного решения для этого случая. При наличии инверсий систематическая погрешность (10) быстро возрастает, и сложные профили не могут быть восстановлены с его помощью в принципе. Метод же Тихонова имеет гарантированную сходимость к любому распределению.

Как уже отмечалось, в случаях, когда задаваемая при решении ошибка метода Тихонова существенно меньше, чем реальная, что при ее распределении, показанном на рис.2, неизбежно происходит, в решении могут появляться ложные особенности в виде отклонений большой амплитуды, которые существенно портили статистику ошибок восстановления. При увеличении задаваемого в методе Тихонова параметра ошибки δ до уровня, включающего максимально возможные отклонения, происходит заглаживание реальных особенностей решения и среднеквадратичная погрешность восстановления возрастает уже по этой причине. Эффективное решение проблемы было найдено на основе включения алгоритма контроля возникновения больших отклонений. Этот алгоритм проверял отклонение решения от результатов точного решения для линейного профиля (10), который заведомо не усиливает имеющиеся погрешности данных. Если это отклонение превышало 4 К, то вместо решения метода Тихонова использовалось решение (10). При задаваемой погрешности метода Тихонова 0,4 К это происходило примерно в 20% случаев, но применение такого алгоритма позволило примерно в 2 раза уменьшить среднеквадратичную ошибку

восстановления. Метод (10) применялся в алгоритме решения также в еще более редких случаях, когда отклонение яркостных температур от первого приближения, в качестве которого и использовалось соотношение (10) было меньше задаваемого уровня ошибки (в этом случае согласно методу Тихонова решение уже найдено).

Итак, на рис.3 представлен основной результат работы - среднеквадратичная погрешность трех независимых методов определения температуры в зависимости от высоты: радиометрического (сплошная линия), метода контактных измерений на метеомачте (пунктир) и содарного метода (штрих-пунктир).

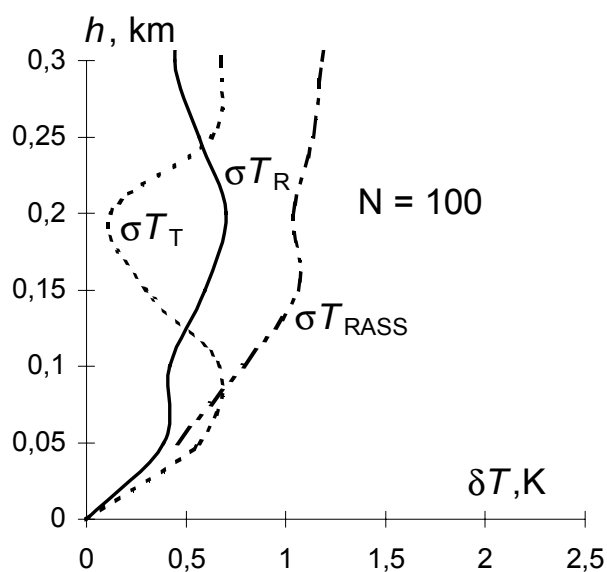


Рис.3.

Можно видеть, что радиометрический метод определения температуры в пограничном слое атмосферы, оказался наиболее точным до 130 и выше 250 м, его среднеквадратичная погрешность в слое 0 - 300 м не превосходит 0,6 К. Видно также, что погрешность контактных датчиков метеомачты (пунктир) весьма велика и она является в основном случайной, как показывают представленные на рис.4 результаты разностей систематических ошибок определения температуры между радиометрическим и двумя другими методами (как уже отмечалось, третья разность определяется из двух других).

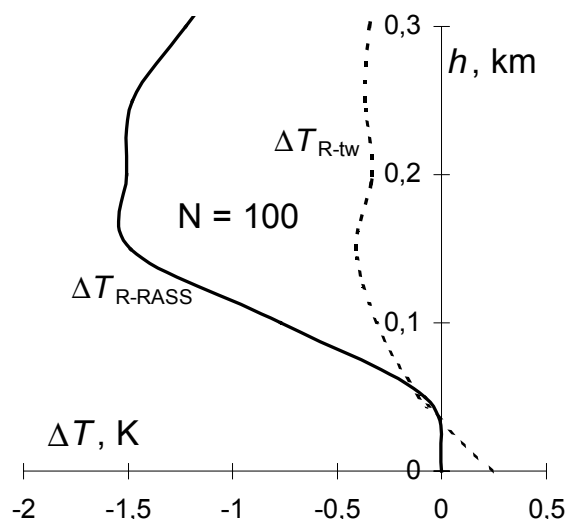


Рис.4.

Случайная и систематическая ошибка данных содара, как можно видеть из рис.3-4, превосходит погрешность двух других методов.

Отметим, что оптимизированный с точки зрения минимизации среднеквадратичных погрешностей алгоритм метода Тихонова может быть неоптимальным для восстановления сложных профилей температуры, что должно стать предметом дальнейших исследований.

Естественно, возникает вопрос о точности полученных оценок среднеквадратичных ошибок определения температуры тремя методами из решения системы (17). Выборочная погрешность среднего квадрата разности для каждого из трех слагаемых подчиняется распределению χ_n^2 , где $n = N = 100$ - число степеней свободы, равное размеру выборки в предположении некоррелированности ошибок измерения. При $N > 30$ это распределение практически не отличается от нормального и для среднеквадратичных отклонений температуры выборочная погрешность составляет около 0,1 К, что подтверждает справедливость основных выводов работы.

5. Заключение

Выполненный в работе статистический анализ результатов измерения профилей температуры в пограничном слое атмосферы тремя независимыми методами (радиометрическим, содаром и контактными датчиками метеомачты) позволил определить среднеквадратичные погрешности каждого из методов и оптимизировать алгоритм восстановления профилей температуры по данным радиометрических измерений, основанный на методе обобщенной невязки Тихонова путем минимизации его среднеквадратичной погрешности.

Оказалось, что разработанный радиометрический метод практически не уступает по точности результатам прямых измерений на метеомачте. Его среднеквадратичная погрешность в слое 0 - 300 м

не превышает 0,6 К. Точность содара существенно хуже и его работоспособность серьезно ограничена погодными условиями. Данные датчиков метеомачты дают ошибки, сравнимые с радиометрическим методом, и их нельзя рассматривать при анализе как совершенно точные.

Задачами дальнейшего развития радиометрического метода является расширение высотного диапазона восстановления путем включения в анализ измерений на частотах, лежащих на склоне полосы поглощения кислорода, и совершенствование алгоритма восстановления в направлении учета специфики температурной стратификации пограничного слоя.

Литература

1. Westwater E.R. Ground-based passive probing using microwave spectrum of oxygen// Radio Science, 1965, v.69D, No.9, p.1201.
2. Westwater E.R. Ground-based determination of temperature profiles by microwaves. Thesis of dissertation. University of Colorado, USA, 1970.
3. Кузнецова М.Г., Рассадковский В.А., Троицкий А.В. Дистанционное измерение метеопараметров облачной атмосферы радиометрическим методом// Изв.вузов. Радиофизика, 1979, т.22, N.8, с. 938-945.
4. Сумин М.И., Троицкий А.В. О возможностях определения температурных инверсий при наземном дистанционном зондировании атмосферы в полосе поглощения O_2 5 мм// Изв.АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1980, т.23, N 9, с. 1090-1093.
5. Gaikovich K.P.,Markina N.N.,Naumov A.P.,et al. Investigation of remote sensing possibilities of the low atmosphere in the microwave range and some aspects of statistical data use// Int. Journal of Remote Sensing, 1983, v.4, No.2, p.419-431.
6. Westwater E.R., Sweezy W.B., McMillin L.M., Dean C. Determination of atmosphere temperature profiles from a statistical combination of ground-based profiler and operational NOAA 6/7 satellite retrievals// J. Climate and Meteorology, 1984, v.23, No.5, p. 689-703.
7. Askne J., Skoog G., Winberg E. Test of a ground-based microwave radiometer for atmospheric temperature profiling with meteorological applications// Int. J. Remote Sensing, 1985, v.6, No.7, p.1241-1256.
8. Троицкий А.В. Дистанционное определение температуры атмосферы из спектральных радиометрических измерений в линии $\lambda=0,5$ мм// Изв.вузов. Радиофизика, 1986, т.29, N 8, с. 878-887.
9. Гайкович К.П., Сумин М.И. Возможность восстановления метеопараметров пограничного слоя атмосферы из СВЧ радиометрических измерений// В кн: Радиометеорология. Труды 7-го Всесоюзн. совещания. Суздаль 21-24 окт., 1986, Л.: Гидрометеиздат, 1989, с. 11-13.

10. Гайкович К.П., Кадыгров Е.Н., Косов А.С., Троицкий А.В. Термическое зондирование пограничного слоя атмосферы в центре линии поглощения кислорода// Изв.вузов. Радиофизика, 1992, т.35, N 2, с. 130-136.
11. Troitsky A.V., Gaikovich K.P., Gromov V.D., Kadygrov E.N., Kosov A.S. Thermal sounding of the atmospheric boundary layer in the oxygen band center at 60 GHz.// IEEE Trans. Geosci. and Remote sensing, vol. 31, N 1, pp. 116-120, 1993.
12. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.C., Lensky V., Kadygrov E.N., Viasankin S.A. Remote sensing of boundary-layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: A comparison experiment. Proceedings IGARSS-97, 4-8 August 1997, Singapor, pp.2093-2096.
13. Westwater E.R., Kadygrov E., Irisov V.G., Lenskiy V.Y., Han Y. Multy-sensor measurements of boundary layer temperature profiles. Abstract 7-th ARM Team Meeting, March 3-7, 1997, San Autonio, USA, p. 41.
14. Гайкович К.П., Резник А.Н., Троицкий Р.В. Радиометрический метод определения подповерхностного профиля температуры и глубины промерзания грунта// Изв.вузов. Радиофизика, 1989, т.33, N 12, с. 1467-1474.
15. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983, 200 с.
16. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1981, 520 с.