

УДК 551.501.795,551.510.52

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРА RPG-HATPRO

© 2015 г. В. С. Косцов

Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет

198504 Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1

E-mail: vlad@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 19.05.2014 г., после доработки 29.07.2014 г.

Представлен алгоритм одновременного определения профилей температуры и влажности тропосферы, а также водозапаса облаков по наземным измерениям микроволнового излучения, особенностью которого является комплексное использование различных типов измерений и различных видов априорной информации об искомым параметрах. Обсуждаются особенности применения комплексного алгоритма при обработке данных микроволнового радиометра RPG-HATPRO в ходе экспериментов по дистанционному зондированию атмосферы, выполненных на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета. Проанализированы результаты сопоставления профилей температуры и влажности, полученных наземным микроволновым дистанционным методом, с данными радиозондов. Показано, что комплексный алгоритм сравним по точности с классическим методом статистической регуляризации при определении профиля температуры, но при определении профиля влажности демонстрирует меньшие погрешности по сравнению с методом статистической регуляризации.

Ключевые слова: атмосфера, микроволновое зондирование, тропосфера, температура, влажность, атмосферная оптика.

DOI: 10.7868/S000235151502008X

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в области технологий привел в настоящее время к коммерческому производству компактной высокоточной наземной микроволновой аппаратуры для дистанционного зондирования атмосферы в автоматическом режиме. В качестве примера зарубежных фирм-изготовителей можно привести Radiometer Physics GmbH [1] и Radiometrics [2]. В Российской Федерации разработан и сертифицирован автоматизированный температурный профилемер МТП-5 для зондирования пограничного слоя [3] и создан многоканальный микроволновый радиометрический комплекс “Микрорадком” (патентованное название), обеспечивающий измерение профилей температуры в тропосфере, а также интегрального содержания водяного пара и интегрального содержания жидкой воды в облаках в непрерывном автоматическом режиме [4]. Создана международная сеть, объединяющая исследователей, работающих с наземной микроволновой аппаратурой для дистанционного зондирования атмосферы [5]. Одной из актуальных задач является создание

оптимальной стандартной процедуры обработки наземных микроволновых измерений с целью ее использования для получения однородных рядов данных на создаваемой наблюдательной сети микроволновых радиометров [6].

В 2012 г. на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) началась эксплуатация микроволнового радиометра RPG-HATPRO (Radiometer Physics GmbH – Humidity And Temperature PROfiler) производства немецкой компании Radiometer Physics GmbH [1]. Радиометр имеет 7 каналов в области полосы поглощения кислорода 0.5 см и 7 каналов в области линии поглощения водяного пара 1.35 см и предназначен для определения профилей температуры и влажности в тропосфере, а также водозапаса облаков в автоматическом непрерывном режиме. Определение профилей температуры, влажности и значений водозапаса облаков в СПбГУ осуществляется с момента ввода прибора в эксплуатацию с помощью программного обеспечения, предоставляемого изготовителем аппаратуры HATPRO и основанного

на методе квадратичной регрессии. Сопоставление результатов определения профилей температуры в тропосфере при помощи этого программного обеспечения с данными радиозондирования на станции Воейково (50 км от точки проведения эксперимента) показало неудовлетворительную точность определения профилей температуры по данным радиометра [7]. В связи с этим в настоящее время разрабатываются два метода обработки – регрессионный и так называемый “физический”, основанный на линеаризации уравнения переноса микроволнового излучения и построении обратного оператора. (Подчеркнем, что в создаваемом регрессионном методе, в отличие от регрессионного метода разработчика аппаратуры, решающий оператор строится непосредственно по результатам измерений, соответствующих данным радиозондов, а не по результатам модельных расчетов.)

В настоящей работе:

– дана физико-математическая формулировка задачи одновременного определения параметров облачной атмосферы, основанная на обращении линеаризованного уравнения переноса излучения (принципиальной особенностью является привлечение дополнительных измерений и априорной информации различных типов);

– описана процедура настройки алгоритма комплексной обработки данных аппаратурного комплекса на базе наземного микроволнового профилемера НАТПРО;

– представлены оценки точности и вертикального разрешения при определении профилей температуры и влажности по данным аппаратуры НАТПРО;

– показаны результаты сравнения профилей температуры и влажности, полученных наземным МКВ методом, с данными радиозондирования;

– анализируются точности комплексного алгоритма и классического метода статистической регуляризации.

В настоящей работе рассматриваются данные, полученные при измерениях нисходящего микроволнового излучения только в зенитном направлении, без углового сканирования. При таком подходе не требуется использовать приближение горизонтальной однородности атмосферы, которое во многих реальных атмосферных ситуациях может не выполняться.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Значения яркостной температуры T_y , регистрируемые в спектральных каналах радиометра НАТПРО, определяются уравнением переноса микроволнового излучения, которое может быть записано в виде следующего нелинейного функционала F :

$$T_y(\nu) = F_\nu [T(z), p(z), q(z), w(z)], \quad (1)$$

где ν – центральная частота канала, z – высота, $T(z), p(z), q(z), w(z)$ – вертикальные профили температуры, давления, абсолютной влажности и влажности облаков соответственно (эти параметры являются искомыми).

В конечномерном векторно-матричном представлении совокупный вектор вариаций искомых параметров относительно их средних значений, записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{x}^+ = & \\ = & (\delta T(z_1), \delta T(z_2), \dots, \delta T(z_L), \delta p(z_1), \\ & \delta p(z_2), \dots, \delta p(z_L), \\ & \delta q(z_1), \delta q(z_2), \dots, \delta q(z_L), \delta w(z_1), \\ & \delta w(z_2), \dots, \delta w(z_L)), \end{aligned} \quad (2)$$

где z – высотные уровни, пронумерованные от 1 до L , δ обозначает вариацию, “+” обозначает транспонирование. Если в алгоритм решения обратной задачи необходимо включить, помимо микроволновых (МКВ) измерений, информацию различного типа о параметрах состояния атмосферы (априорную статистическую, результаты независимых измерений, физические связи между параметрами, физические ограничения на получаемые значения), то эту информацию удобно формально представить в виде набора независимых “виртуальных” измерений. В этом случае рассматриваемая задача формулируется в виде следующей системы векторно-матричных уравнений:

$$\begin{cases} \delta \mathbf{r}_1 = \mathbf{C}_1 \delta \mathbf{x} \\ \delta \mathbf{r}_2 = \mathbf{C}_2 \delta \mathbf{x} \\ \dots\dots\dots \\ \delta \mathbf{r}_N = \mathbf{C}_N \delta \mathbf{x}. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь первое уравнение представляет собой векторно-матричный аналог линеаризованного уравнения переноса МКВ-излучения, а последующие $N-1$ векторно-матричных уравнений описывают в линеаризованной форме дополнительные измерения атмосферных параметров или дополнительные условия, накладываемые на них, в виде виртуальных измерений. Вектор $\delta \mathbf{r}_1$ – это вектор вариаций яркостной температуры по отноше-

нию к средним значениям, рассчитанным на основе средних профилей атмосферных параметров, C_1 — линейризованный интегральный оператор “прямой” задачи переноса МКВ-излучения, образованный из значений весовых функций с соответствующими квадратурными коэффициентами. Векторы δr_2 , δr_3 и т.д. — это векторы вариаций результатов “виртуальных” измерений по отношению к их средним значениям, C_2 , C_3 и т.д. — линейризованные операторы, описывающие виртуальные измерения. Такой подход к решению обратной задачи (комплексный, с привлечением дополнительных условий различного рода в виде виртуальных измерений) успешно использовался при интерпретации спутниковых измерений уходящего излучения в экспериментах с аппаратурой CRISTA [8] и наземных измерений микроволновым озонметром в области линии поглощения озона 110 ГГц [9, 10]. Формально можно объединить результаты всех измерений (в том числе виртуальных) в единый вектор и соответственно использовать одну объединенную матрицу линейризованных операторов измерений, однако для удобства анализа вкладов измерений и априорной информации различного типа мы не используем такого рода объединение.

Решение системы уравнений (3), получаемое методом наименьших квадратов в итерационном процессе, записывается в виде:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_m + \left(\sum_{i=1}^N \mathbf{C}_{ik}^+ \mathbf{E}_i^{-1} \mathbf{C}_{ik} \right)^{-1} \times \left[\sum_{i=1}^N \mathbf{C}_{ik}^+ \mathbf{E}_i^{-1} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{ik} + \mathbf{C}_{ik} (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_m)) \right], \quad (4)$$

где k — номер итерации, i — идентификатор типа измерений (в том числе виртуальных), “ m ” обозначает среднее значение параметра, \mathbf{E}_i — матрицы ошибок измерений (в том числе виртуальных), \mathbf{r}_{ik} обозначают результаты применения нелинейризованных операторов измерений к значениям решения, полученным на k -м шаге итерационного процесса, \mathbf{C}_{ik} — линейризованные операторы, рассчитанные с использованием значений решения, полученных на k -м шаге. Оценки погрешностей определения искомых параметров на различных высотах дают диагональные элементы матрицы:

$$\mathbf{F} = \left(\sum_{i=1}^N \mathbf{C}_i^+ \mathbf{E}_i^{-1} \mathbf{C}_i \right)^{-1}. \quad (5)$$

К настоящему времени широкое распространение получила методика оценок информационного содержания измерений при решении обрат-

ных задач дистанционного зондирования, основанная на анализе так называемых усредняющих ядер [11]. В рассматриваемой постановке задачи выражение для матрицы усредняющих ядер (усредняющего оператора) выглядит следующим образом:

$$\mathbf{A}_{(a_1, a_2, \dots)} = \left(\sum_{i=1}^N \mathbf{C}_i^+ \mathbf{E}_i^{-1} \mathbf{C}_i \right)^{-1} \left(\sum_{i=(a_1, a_2, \dots)} \mathbf{C}_i^+ \mathbf{E}_i^{-1} \mathbf{C}_i \right), \quad (6)$$

где набор индексов (a_1, a_2, \dots) , по которым идет суммирование во второй скобке, соответствует типам измерений (в том числе виртуальных), для совокупности которых рассчитывается матрица усредняющих ядер. При определении высотных профилей физической смысл усредняющего оператора заключается в том, что каждый из его столбцов показывает, как сглаживается локальная вариация параметра на соответствующем высотном уровне в результате применения обратного оператора, включающего измерения типов (a_1, a_2, \dots) . Поскольку сформулированная нами задача является многопараметрической и вектор искомых параметров является составным, усредняющий оператор будет иметь блочную структуру. Ниже мы будем рассматривать диагональные блоки усредняющего оператора как отдельные матрицы, которые соответствуют каждому из искомых параметров (температура, давление, абсолютная влажность, водность облаков). Для этих блоков можно рассчитать:

— количество “степеней свободы сигнала” DOFS (“degrees of freedom for signal” в англоязычной литературе) как след матрицы, соответствующей блоку;

— величину вертикального разрешения при определении значения параметра на заданной высоте z_i как диапазон высот $z_i \pm \Delta z$, для которого сумма соответствующих диагональных элементов матричного блока приближенно равна единице.

Подробные примеры подобных расчетов при анализе информативности различных задач дистанционного зондирования атмосферы можно найти в работах [12–14].

Широко используемый классический метод статистической регуляризации при решении некорректных обратных задач (известный в англоязычной литературе как “optimal estimation method”) можно представить в виде частного случая представленной выше физико-математической формулировки, при этом общее количество типов измерений равно двум (МКВ-измерения и априорная статистическая информация как виртуальные измерения), линейризованный оператор виртуальных измерений равен единичному ($C_2 = \mathbf{I}$), а соответствующая матрица ошибок

Таблица 1. Характеристики измерений (в том числе виртуальных), включенных в рассмотрение при решении обратной задачи

Номер	Тип	Измеряемая величина	Погрешности (даны значения СКО)
<i>Фактические измерения</i>			
1	Микроволновые	Яркостная температура	0.1 К для “влажностных” спектральных каналов, 0.2 К для “температурных” каналов
2	Данные приземных метеодатчиков	Температура, давление, относительная влажность	1.0 К, 1 мб и 5% для температуры, давления и относительной влажности соответственно.
<i>Виртуальные измерения</i>			
3	Изменчивость параметров	Температура, давление, абсолютная влажность, водность облаков	25 К, 3%, 1000%, 100% для T, p, q, w соответственно
4	Гладкость профилей	Производные температуры и абсолютной влажности по высоте	6 К/км и 70%/км для dT/dz и $dq/dz(100/q)$
5	Изменчивость относительной влажности	Относительная влажность	50% (при среднем значении относительной влажности 50%)
6	Гидростатическое равновесие	Значение давления	0.01%–0.2% (от значений, соответствующих гидростатическому равновесию)

представляет собой ковариационную матрицу искоемых параметров.

ОСОБЕННОСТИ НАСТРОЙКИ АЛГОРИТМА

Настройка алгоритма осуществлялась в несколько этапов:

1. Были построены модели физического состояния атмосферы для численных экспериментов. Эти модели включали как профили параметров с постоянным высотным градиентом, так и профили с инверсиями. Моделировались облачные и безоблачные ситуации.

2. В ходе численных экспериментов по замкнутой схеме (исходная модель атмосферы – расчет яркостной температуры в каналах радиометра – решение обратной задачи – сравнение результатов с данными исходной модели) были подобраны параметры виртуальных измерений, обеспечивающие минимальные погрешности, устойчивость решения и стабильную сходимость итерационного процесса.

3. На основе сравнения расчетов яркостной температуры по данным радиозондов в условиях стабильной безоблачной атмосферы с результатами синхронных МКВ-измерений была проведена коррекция значений центральных частот спектральных каналов радиометра НАТPRO, установленного в СПбГУ.

Характеристики измерений, в том числе виртуальных, включенных в рассмотрение при решении обратной задачи температурно-влажностного зондирования, сведены в табл. 1. В качестве

фактических измерений, наряду с измерениями в 14 каналах радиометра НАТPRO, нами рассматривались измерения метеодатчиков (температура, давление, относительная влажность), совмещенных с радиометром. Значения погрешностей фактических измерений декларируются производителем аппаратуры. Остальные данные таблицы, касающиеся виртуальных измерений, требуют пояснений. Изменчивость температуры и абсолютной влажности задана в несколько раз превышающей статистические величины, корреляция между значениями на различных высотных уровнях отсутствует. Таким образом, смоделирована ситуация отсутствия априорной статистики. Задача определения профиля водности в облаках не ставилась, анализировалось только значение полного водозапаса облака, равное интегралу от профиля. Высотный диапазон для профиля водности был принят равным 0.5–7 км. Основным априорным ограничением являлось условие гладкости профилей. Производные по высоте профилей температуры и абсолютной влажности приняты равными производным средних профилей. Значения погрешностей соответствующих виртуальных измерений были выбраны по результатам численных экспериментов. Представляется естественным включение в набор виртуальных измерений и ограничений на изменчивость относительной влажности. Значения среднего и СКО были выбраны по результатам численных экспериментов, критерием выбора было отсутствие отрицательных значений относительной влажности и значений, превышающих 100%. Также является естественным и учет условия гидростатического

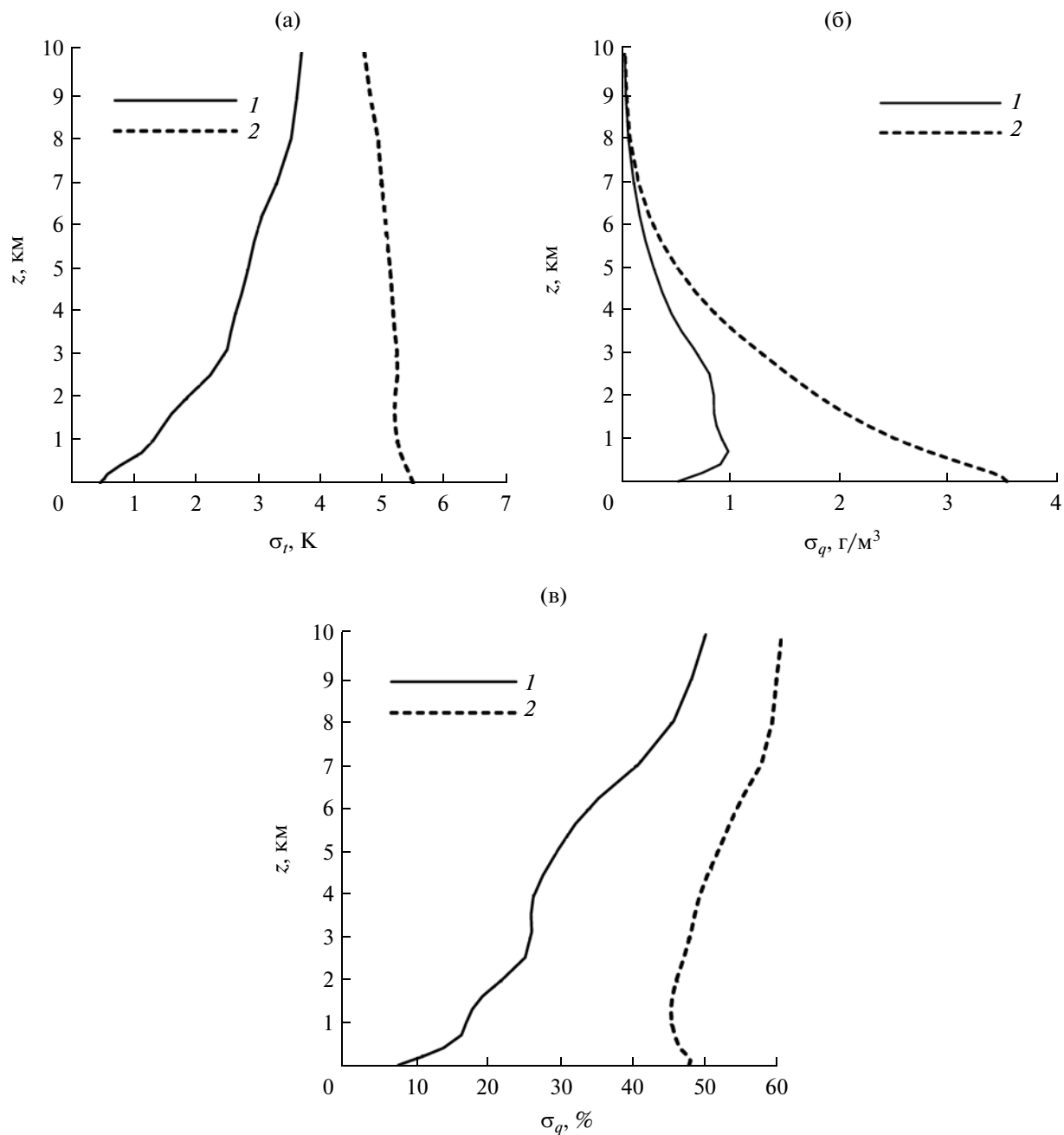


Рис. 1. Оценки погрешностей (кривые 1) определения профилей температуры (а), абсолютной влажности (б) и погрешностей абсолютной влажности, выраженных в процентах по отношению к использованному среднему профилю (в). Кривые 2 показывают значения априорной неопределенности.

равновесия. Формулу для оператора соответствующих виртуальных измерений можно найти в работе [10]. Физический смысл погрешностей этих виртуальных измерений — ожидаемая разность между значением давления на каком-либо высотном уровне, полученным в результате решения обратной задачи, и значением давления на этом уровне, рассчитанным в соответствии с уравнением гидростатики на основе давления и температуры на остальных высотных уровнях.

ТОЧНОСТЬ, ВЫСОТНЫЙ ДИАПАЗОН ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Погрешности определения профилей температуры и влажности, полученные из расчета матрицы ошибок \mathbf{F} (формула 5), показаны на рис. 1.

Значения априорной неопределенности параметров, для сравнения также представленные на рисунке, требуют дополнительных пояснений. При использовании традиционного метода ста-

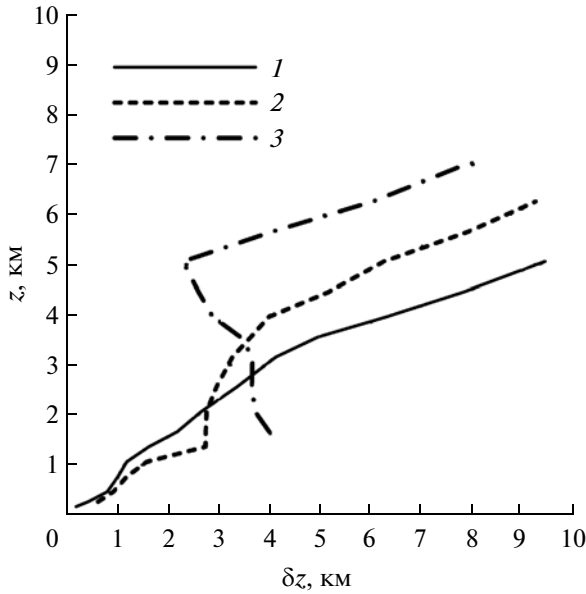


Рис. 2. Оценки вертикального разрешения δz при определении профилей температуры (1), абсолютной влажности (2) и влажности облаков (3).

тистической регуляризации в качестве априорной неопределенности принято брать величину среднеквадратического отклонения от среднего значения параметра на различных высотах, определяемую как корень квадратный из соответствующих диагональных элементов ковариационной матрицы. В рассматриваемом случае наличия нескольких априорных ограничений различного типа при оценке априорной неопределенности параметров следует рассматривать всю совокупность этих ограничений, а именно, рассматривать вместо статистической ковариационной матрицы матрицу ошибок, рассчитанную с учетом только виртуальных измерений, что и было сделано в настоящей работе. (Нетрудно видеть, что если ограничение одно, и это ограничение определяется априорной статистикой, то матрица ошибок виртуальных измерений совпадает с априорной ковариационной матрицей.)

Значения погрешности определения температуры составляют менее 2 К до высоты 2 км, от 2 до 3 К в диапазоне высот 2–6 км и 3–4 К выше 6 км. Локальный минимум погрешности определения

Таблица 2. Значения DOFS для МКВ измерений (приближенная оценка числа независимо определяемых параметров профиля)

Условия расчета (см. текст)	Температура	Абсолютная влажность	Водность облаков
A1	2.4	2.3	1.9
A2	4.1	3.9	1.3

влажности у поверхности объясняется наличием высокоточных измерений датчика влажности. Как следует из рис. 1в, относительная погрешность абсолютной влажности не превышает 20% до высоты 2 км и 30% до высоты 5.5 км.

На рис. 2 показаны значения вертикального разрешения при определении профилей. На основе представленных данных можно выделить отдельные высотные слои, средние значения параметров состояния атмосферы в которых определяются независимо. Рассмотрим в качестве примера температуру. На высоте 0.6 км $\delta z = 0.8$ км. Из этого следует, что можно определить слой, где средняя температура определяется независимо от других слоев как $0.6 \pm \delta z/2$, то есть 0.2–1.0 км. Следующий слой можно определить в диапазоне высот 1.0–5.0 км ($3.0 \pm 4/2$), поскольку на высоте 3 км разрешение равно 4 км. Для профиля влажности можно предложить аналогичное разделение тропосферы на слои. Что касается профиля водности, то можно выделить два слоя: 0–4.0 км (на высоте 2 км разрешение около 4 км) и 4.0–7.0 км (на высоте 5.5 км разрешение около 3 км). Это свидетельствует о том, что в микроволновых измерениях содержится не только информация об интегральном водозапасе облака, но и некоторое количество информации о вертикальном распределении водности.

Значения DOFS для МКВ-измерений (приближенные оценки числа независимо определяемых параметров профилей) даны в табл. 2. Условия расчета A1 соответствовали полному набору фактических и виртуальных измерений. Для всех физических величин число параметров, независимо определяемых из МКВ измерений, равно 2. Если принять во внимание измерения приземных датчиков, которые независимы от МКВ-измерений, то получим для температуры и влажности по 3 определяемых параметра, т.е. в 4-м верхнем слое результат определяется в основном виртуальными измерениями. Условия расчета A2 моделируют классическую схему “МКВ-измерения плюс априорная статистическая информация” (учтены только измерения типа 1 и 3 из табл. 1). Эти условия расчета показывают предельные информационные возможности МКВ-измерений, поскольку в нашем случае ограничения на профили, накладываемые виртуальными измерениями типа 3 (см. табл. 1), очень слабы. Как мы видим, потенциальные возможности рассматриваемых МКВ-измерений (без привлечения сторонней информации) – независимое определение четырех параметров профилей температуры и влажности и одного параметра для водности, т.е. интегрального водозапаса облаков. Подчеркнем, что в представленных результатах расчета для двух условий значений DOFS противоречия нет: включение в схему дополнительной информации в виде виртуальных измерений температуры и влажности уменьшает информационный вклад МКВ-измерений в опре-

Таблица 3. Сравнимые методы (алгоритмы) решения обратной задачи

Обозначение/название	Использованные фактические измерения	Использованные виртуальные измерения
КА/комплексный алгоритм	МКВ, приземные датчики	Тип 3–6 в соответствии с табл. 1
МСП/метод статистической регуляризации	МКВ, приземные датчики	Только тип 3 (см. табл. 1), но средние профили и ковариационные матрицы получены по данным радиозондирования
КА + МСП/комплексный алгоритм плюс статистическая регуляризация	МКВ, приземные датчики	Тип 3 – как в МСП, тип 4–6 в соответствии с табл. 1

деление температуры и влажности (DOFS для температуры и влажности уменьшается), однако в целом повышает точность их определения. Полученные оценки вертикального разрешения и DOFS близки к значениям, которые приводят другие авторы, в частности: величины DOFS для температуры и влажности около 4 и 2 соответственно [15], существенное ухудшение вертикального разрешения с высотой и низкие значения даже в пограничном слое (разрешение 300 метров на высоте 400 метров) [16].

ПРИМЕРЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для апробации описанного алгоритма в существенно различных атмосферных условиях (в холодной и сухой атмосфере и в теплой и влажной атмосфере) нами были выбраны МКВ измерения, проводившиеся в течение двух месяцев 2013 г.: в марте и сентябре. Для анализа точности определения профилей температуры и влажности были обработаны МКВ-измерения, проводившиеся синхронно с дневными запусками радиозондов на станции радиозондирования в поселке Воейково Ленинградской области. Ввиду значительной пространственно-временной изменчивости характеристик облачности валидация алгоритма в части определения водозапаса облаков является самостоятельной непростой задачей, поэтому она не проводилась в рамках данной работы. Тем не менее наблюдалось качественное согласие результатов определения водозапаса, полученных с помощью описанного комплексного алгоритма и с помощью регрессионного алгоритма разработчика аппаратуры (количественные расхождения варьировали от нескольких процентов до нескольких десятков процентов). При сравнении с радиозондовыми измерениями температуры и влажности на заданной высоте мы используем три характеристики: среднее рассогласование M , среднеквадратическое рассогласование S и стандартное отклонение от среднего рассогласования σ , которые характеризуют систематическую, полную и случайную погрешность (по аналогии с работой [7], в которой можно найти соответствующие

формулы). Зависимость этих характеристик от высоты показана на рис. 3. Для марта и сентября 2013 г. систематическая погрешность профилей температуры по абсолютной величине может достигать 3 К. Наиболее вероятной причиной существенных значений систематической погрешности является, по-видимому, остаточная неопределенность частот “температурных” каналов прибора после коррекции. Полная и случайная погрешность профилей температуры в сентябре несколько меньше, чем в марте.

Погрешности определения относительной влажности в сентябре существенно меньше, чем в марте. Среднее рассогласование в сентябре во всем высотном диапазоне по абсолютной величине не превышает 10%, за исключением узкой области ниже 0.6 км. В марте значения M для относительной влажности превышают по абсолютной величине 10%, начиная с высоты 2.5 км. Полная погрешность определения относительной влажности в сентябре в среднем составляет около 15% во всем диапазоне высот, в то время как в марте – около 20%. Однако случайная погрешность в марте в среднем равна 15%, что близко к сентябрьским значениям.

Сравним результаты, полученные описанным комплексным алгоритмом, с результатами, полученными с помощью классического метода статистической регуляризации. Необходимые для метода статистической регуляризации средние профили и ковариационные матрицы для температуры, давления и абсолютной влажности, а также соответствующие взаимные ковариационные матрицы были рассчитаны по данным всех радиозондов, запущенных на станции в поселке Воейково в марте и сентябре 2013 г. (всего 119 запусков). Результаты сравнения представлены на рис. 5 и 6 для марта и сентября 2013 г. соответственно в терминах характеристик рассогласования M и S (систематическая и полная погрешности). Помимо результатов, полученных для комплексного алгоритма (КА) и для метода статистической регуляризации (МСП), показаны также результаты при их совместном использовании (КА + МСП). Отличительные особенности этих методов представлены в табл. 3.

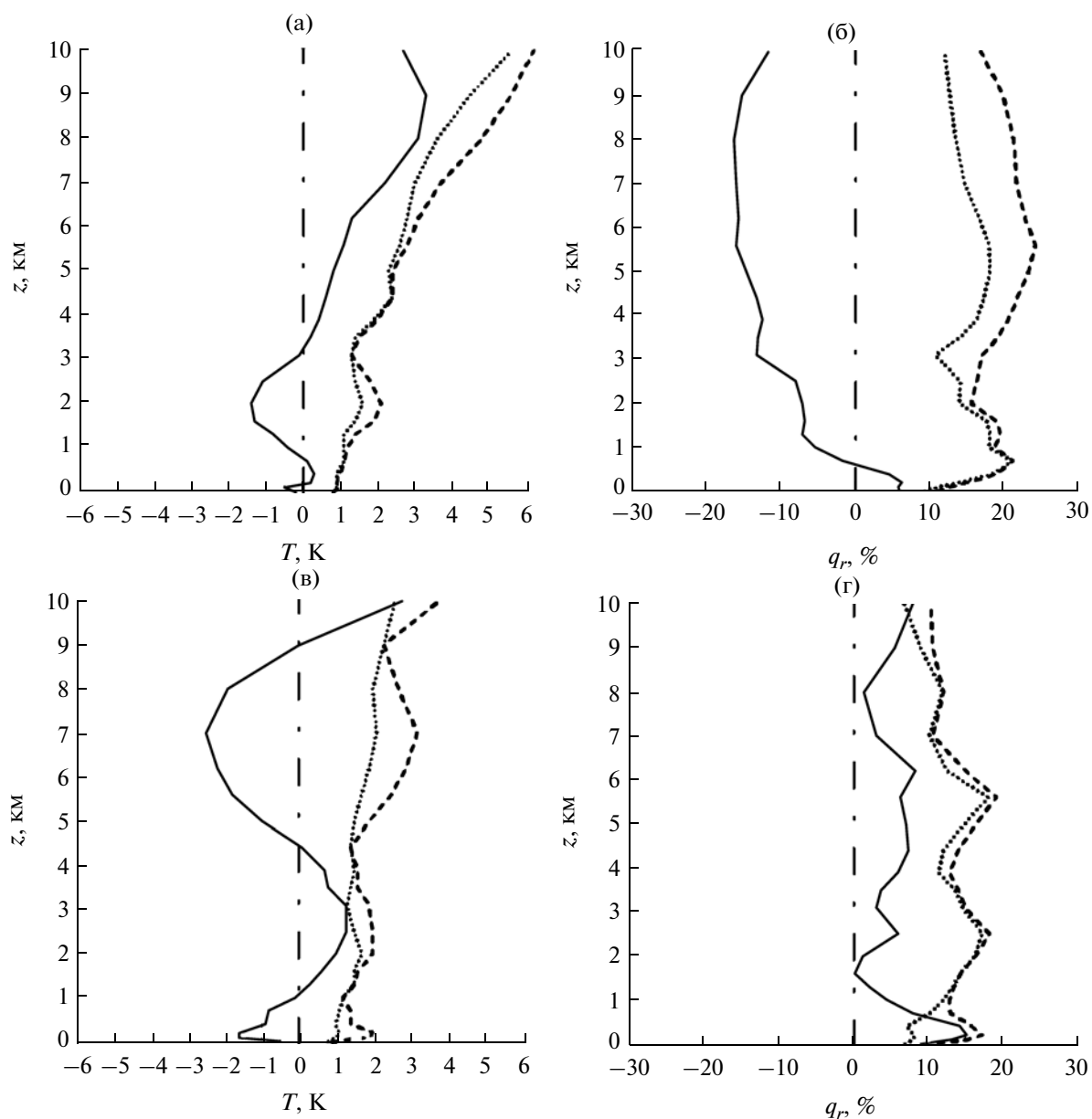


Рис. 3. Характеристики рассогласования МКВ и радиозондовых измерений профилей температуры T и относительной влажности q_r для марта (вверху) и сентября (внизу) 2013 г.: М (сплошная линия), S (штриховая линия) и σ (пунктир).

При определении профилей температуры в марте в диапазоне высот 5–10 км МСР обеспечивает меньшую погрешность. Прямо противоположная ситуация наблюдается для профилей относительной влажности в марте 2013 г. — МСР дает наихудшие результаты (рис. 4 справа вверху и внизу): среднее рассогласование МСР по абсолютной величине достигает 30% на высоте около 1 км и 60% на высоте 6–7 км. Во всем диапазоне высот КА и КА + МСР обеспечивают существенно меньшие полные погрешности определения относительной влажности. При этом КА + МСР

не дает заметного выигрыша в точности по сравнению с КА.

Для сентября 2013 г. (рис. 5), как и для марта, при определении профиля температуры некоторые преимущества имеют МСР и КА + МСР. Что касается определения профилей относительной влажности, то, в отличие от результатов для марта, МСР дает худшие результаты только в диапазоне высот 3–10 км. В области 0–3 км значения М и S для МСР меньше, чем для других методов. Однако эти различия незначительны. На высотах от 3 до 10 км наилучшие результаты определения

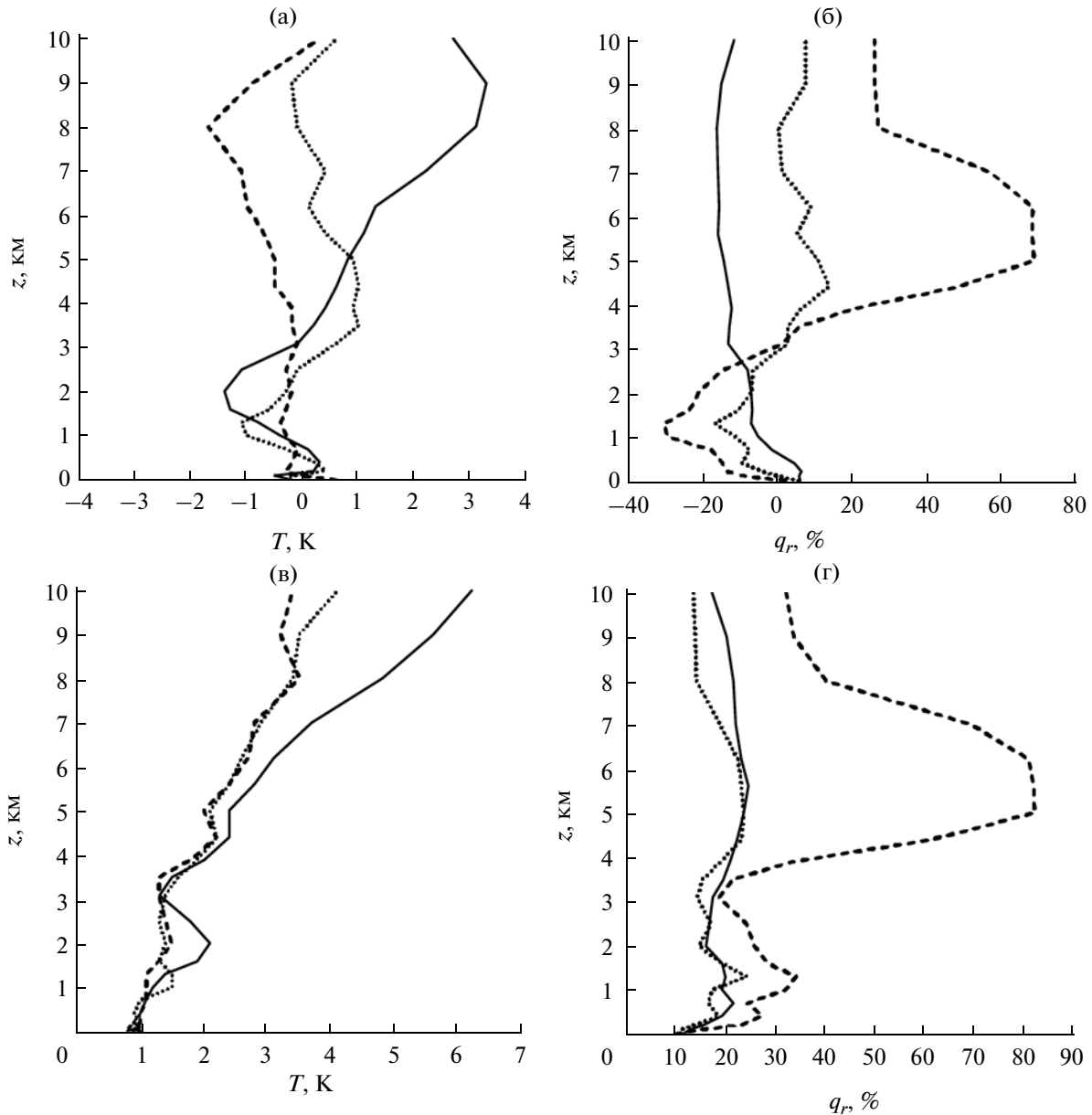


Рис. 4. Характеристики рассогласования МКВ и радиозондовых измерений профилей температуры T (а – величина М, в – величина S) и относительной влажности q_r (б – величина М, г – величина S) для марта 2013 г.: комплексный алгоритм (сплошная линия), метод статистической регуляризации (штриховая линия) и КА + МСР (пунктир).

профилей относительной влажности показывает КА. Важно отметить, что КА + МСР дает существенно большие значения рассогласования, чем КА, чего не наблюдалось в марте. Этим неочевидным результатам может быть дано следующее объяснение: содержание водяного пара в тропосфере характеризуется очень сильной изменчивостью (на порядок и более), при этом распределение вариаций отлично от нормального, что может приводить к большим погрешностям даже при

наличии адекватной априорной ковариационной матрицы.

В заключение данного раздела на рис. 6 приведем профили температуры и абсолютной влажности, полученные 19 марта 2013 г. различными методами (КА, МСР, КА + МСР). Эти результаты представляют интерес для анализа, поскольку радиозондовые данные показали наличие мощных инверсий как температуры, так и влажности. Для профиля температуры, полученного МСР, наблю-

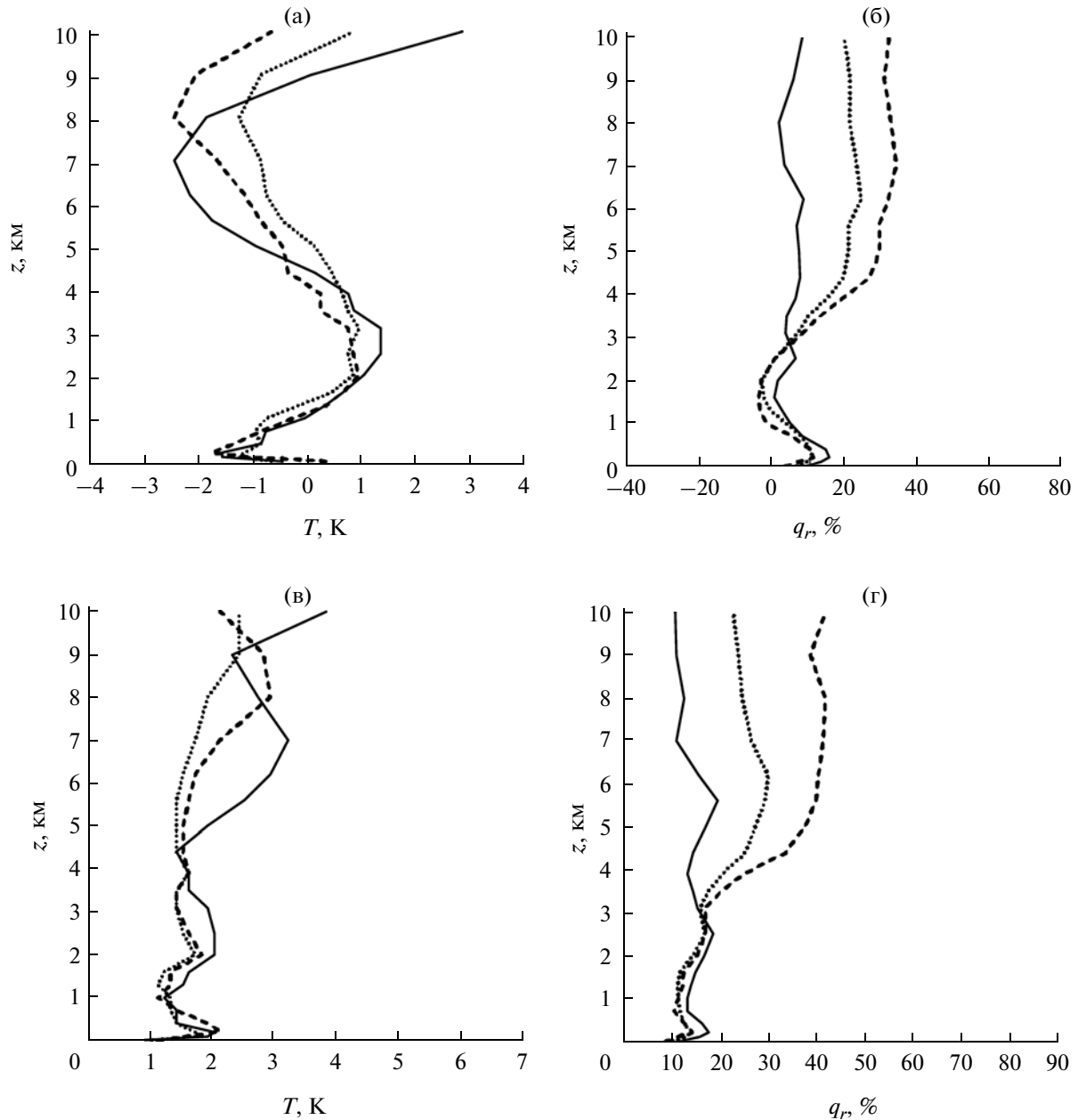


Рис. 5. Характеристики рассогласования МКВ и радиозондовых измерений профилей температуры T (а – величина М, в – величина S) и относительной влажности q_r (б – величина М, г – величина S) для сентября 2013 г.: комплексный алгоритм (сплошная линия), метод статистической регуляризации (штриховая линия) и КА + МСР (пунктир).

дается наилучшее согласие с радиозондовыми данными: воспроизводится инверсия на высоте 1–2 км, и рассогласование минимально вплоть до высоты 10 км. Результаты КА в области инверсии дают нулевой градиент температуры, и рассогласование с радиозондовыми данными существенно увеличивается выше 5 км. КА + МСР воспроизводит инверсию, однако не позволяет достичь точности МСР в средней и верхней тропосфере. В случае с профилем влажности ситуация противосто-

положная – лучше всего инверсию воспроизводит КА: высота максимума влажности согласуется в пределах нескольких сотен метров, ошибка максимального значения составляет 30%. Другие методы (МСР и КА + МСР) показывают наличие инверсии, однако ошибка определения высоты максимума инверсии составляет 1–2 км, ошибка значения в максимуме составляет 40–50%.

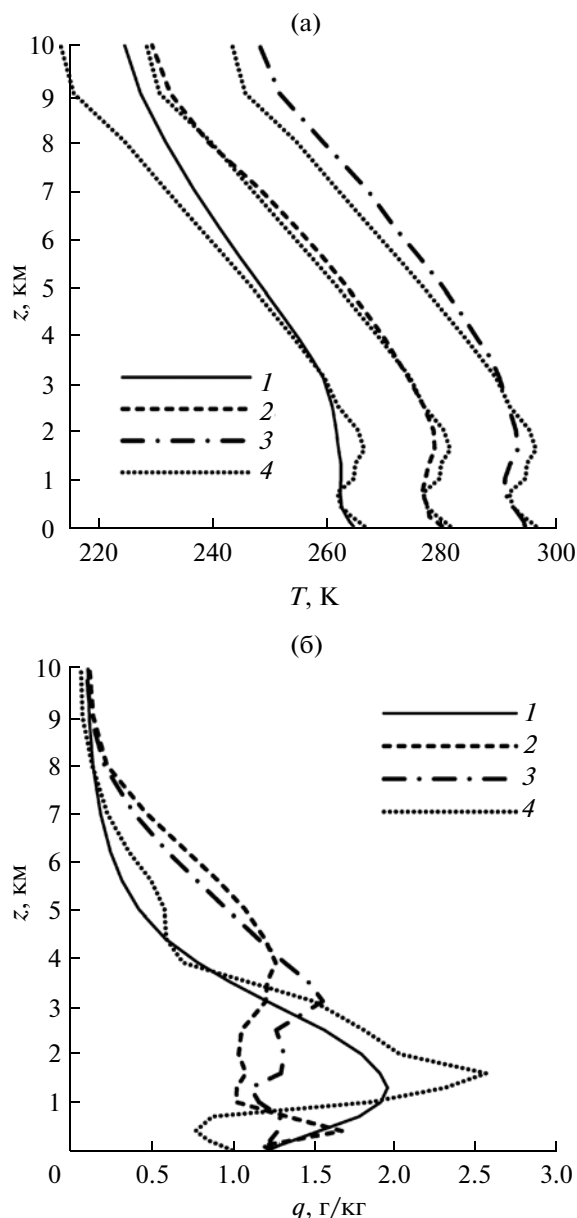


Рис. 6. Результаты определения профиля температуры (вверху) и профиля массовой концентрации водяного пара (внизу) по микроволновым данным 19 марта 2013 г. различными методами: КА (1), МСР (2), КА + МСР (3). Кривые 4 показывают результаты радиозондирования. Профили температуры, соответствующие МСР и КА+МСР, сдвинуты относительно профиля, соответствующего КА, на 15 К и 30 К для удобства восприятия рисунка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм одновременного определения профилей температуры и влажности тропосферы, а также водозаписа облаков по наземным измерениям микроволнового излучения. Особенностью алгоритма является комплексное использование различных видов измерений и априорной информации об искомым параметрах.

Представлены результаты экспериментов по дистанционному зондированию атмосферы с помощью радиометра RPG-НАТPRO проведенных на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета (рассматривались измерения, производимые только в зенитном направлении, без углового сканирования). Проведены сопоставления профилей температуры и влажности, полученных наземным микроволновым дистанционным методом, с данными радиозондов для двух периодов: март 2013 г. и сентябрь 2013 г. Среднеквадратическое рассогласование МКВ и радиозондовых значений температуры не превышало 3 К до высоты 6–7 км. Среднеквадратическое рассогласование МКВ и радиозондовых значений относительной влажности составляло около 15% для сентября и около 20% для марта во всем рассматриваемом диапазоне высот 0–10 км. Показано, что комплексный алгоритм сравним по точности с методом статистической регуляризации при определении профиля температуры, но при определении профиля влажности демонстрирует меньшие погрешности по сравнению с методом статистической регуляризации.

Экспериментальные исследования проведены на аппаратуре Ресурсного центра “Геомодель” Санкт-Петербургского государственного университета [17] при финансовой поддержке гранта РФФИ 12-05-00445а и проекта СПбГУ 11.37.28.2011. Обработка и анализ данных выполнены за счет финансирования по гранту Российского научного фонда № 14-17-00096. Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Radiometer Physics GmbH. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.radiometer-physics.de/rpg/html/Home.html> свободный. Загл. с экрана.
2. Remote Sensing for the Environmental Sciences. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://radiometrics.com/> свободный. Загл. с экрана.
3. *Кадыгров Е.Н.* Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя – метод, аппаратура, результаты измерений // *Оптика атмосферы и океана*. 2009. Т. 22. № 7. С. 697–704.
4. *Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Миллер Е.А. и др.* Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // *Оптика атмосферы и океана*. 2013. Т. 26. № 6. С. 459–465.
5. MWRnet – An International Network of Ground-based Microwave Radiometers. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://cetemps.aquila.infn.it/mwrnet/> свободный. Загл. с экрана.
6. *Rose T., Crewell S., Loehnert U., Simmer C.* A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of the cloudy atmosphere // *Atmos. Res.* 2005. V. 75. № 3. P. 183–200.

7. *Зайцев Н.А., Тимофеев Ю.М., Косцов В.С.* Сравнения радиозондовых и наземных дистанционных МКВ измерений профилей температуры в тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 5. С. 392–398.
8. *Косцов В.С., Тимофеев Ю.М.* Озон в мезосфере по данным спутникового эксперимента CRISTA-1: 1. Метод определения вертикальных профилей и анализ его точности. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 201–214.
9. *Косцов В.С., Поберовский А.В., Осипов С.И., Тимофеев Ю.М.* Комплексная методика интерпретации наземных микроволновых спектральных измерений в задаче определения вертикального профиля содержания озона // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 4. С. 354–360.
10. *Kostsov V.* General approach to the formulation and solution of the multi-parameter inverse problems of atmospheric remote sensing // AIP Conference Proceedings. 2013. V. 1531. P. 240–243. doi:http://dx.doi.org/10.1063/1.4804751
11. *Rodgers C.D.* Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice. Series on atmospheric, oceanic and planetary physics. V. 2. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2000. 238 p.
12. *Vigouroux C., De Maziere M., Demoulin P. et al.* Evaluation of tropospheric and stratospheric ozone trends over Western Europe from ground-based FTIR network observations. // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8. P. 6865–6886.
13. *Lindenmaier R., Batchelor R.L., Strong K. et al.* An evaluation of infrared microwindows for ozone retrievals using the Eureka Bruker 125HR Fourier transform spectrometer // J. Quant. Spectr. Radiative Transfer. 2010. V. 111. № 4. P. 569–585.
14. *Schneider M., Hase F., Blumenstock T. et al.* Quality assessment of O₃ profiles measured by a state-of-the-art ground-based FTIR observing system // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8. P. 5579–5588.
15. *Loehnert U., Maier O.* Operational profiling of temperature using ground-based microwave radiometry at Payerne: prospects and challenges // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5. P. 1121–1134. doi:10.5194/amt-5-1121-2012.
16. *Westwater Ed, Han Y., Irisov V. et al.* Remote Sensing of Boundary-Layer Temperature Profiles by a Scanning 5-mm Microwave Radiometer and RASS: Comparison Experiment. // J. Atmos. Oceanic Technology. 1999. V. 16. № 7. P. 805–818.
17. РЦ СПбГУ “Геомодель”. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://geomodel.spbu.ru/> свободный. Загл. с экрана.

Retrieving Cloudy Atmosphere Parameters on the Basis of RPG-HATPRO Radiometer Data

V. S. Kostsov

*Faculty of Physics, St. Petersburg State University, ul. Ul'yanovskaya 1, Petrodvorets, St. Petersburg, 198504 Russia
e-mail: vlad@troll.phys.spbu.ru*

Received May 19, 2014; in final form, July 29, 2014

Abstract—An algorithm for simultaneously determining both tropospheric temperature and humidity profiles and cloud liquid water content from ground-based measurements of microwave radiation is presented. A special feature of this algorithm is that it combines different types of measurements and different a priori information on the desired parameters. The features of its use in processing RPG-HATPRO radiometer data obtained in the course of atmospheric remote sensing experiments carried out by specialists from the Faculty of Physics of St. Petersburg State University are discussed. The results of a comparison of both temperature and humidity profiles obtained using a ground-based microwave remote sensing method with those obtained from radiosonde data are analyzed. It is shown that this combined algorithm is comparable (in accuracy) to the classical method of statistical regularization in determining temperature profiles; however, this algorithm demonstrates better accuracy (when compared to the method of statistical regularization) in determining humidity profiles.

Keywords: atmosphere, microwave sounding, land surface, troposphere, temperature, humidity, atmospheric optics.