

С.П. Образцов, Г.Г.Шукин

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ СВЧ-
РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

S.P. Obratsov, G.G. Shchukin

**MEASURING THE TEMPERATURE AND HUMIDITY
CHARACTERISTICS OF THE ATMOSPHERE
AND UNDERLYING SURFACE USING MICROWAVE-
RADIOMETRIC METHOD**

В данной работе представлены результаты разработок методических основ интерпретации данных спутниковых наблюдений СВЧ-радиометров с целью определения температурно-влажностных характеристик атмосферы и параметров состояния подстилающей поверхности, численных исследований их возможностей и точности определения перечисленных параметров.

The results of development of the techniques for interpretation of satellite microwave radiometric observations are presented. The method was used for determination of the temperature and humidity characteristics of the atmosphere and parameters of the underlying surface. Also, numerical investigations of its possibilities and accuracy of estimations of the parameters are performed.

Введение

Начиная с 2000-го года, у нас и за рубежом был запущен ряд ИСЗ с многоканальными СВЧ радиометрами на борту в области частот 6–190 ГГц, таких, как МТВЗА-ГЯ (Метеор-3М), МТВЗА-ОК (СИЧ-1М), AMSU (NOAA 15, 16, 17), предназначенных для дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности с целью определения вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы, водозапаса облачности, идентификации наличия и оценки интенсивности осадков, определения температуры поверхности, степени волнения для морской поверхности, биомассы растительности и влажности суши. В данной работе представлены результаты разработок методических основ интерпретации данных наблюдений этих радиометров, численных исследований их возможностей и точности определения температурно-влажностных характеристик состояния атмосферы и подстилающей поверхности.

1. Физико-математические основы комплекса программ численного моделирования и интерпретации данных наблюдений СВЧ-радиометров

Подробно физико-математические основы для разработки комплекса программ численного моделирования и интерпретации данных СВЧ-радиометров

в области 6–190 ГГц и описание самого комплекса представлены в работах [Образцов, 2002, 2004]. Поэтому кратко остановимся лишь на основных положениях, дополнив описание результатами расчетов, которые не вошли в предыдущие исследования.

В физико-математическую модель дистанционного зондирования атмосферы и поверхности, являющейся основой программ интерпретации измерений МКВ радиометров, входят:

– радиационная модель атмосферы, состоящая из коэффициентов поглощения атмосферных газов, оптических характеристик облачности и осадков, излучательных способностей различных типов подстилающей поверхности;

– численный алгоритм и программа расчета уходящего микроволнового (МКВ) излучения (решение прямой задачи) и его вариационных производных по различным параметрам атмосферы и поверхности с учетом эффектов поляризации и многократного рассеяния излучения в облаках и осадках;

– методика, алгоритм и программа решения нелинейной обратной задачи методом статистической регуляризации для комплексного восстановления различных параметров атмосферы;

– априорная информация для искомым решений.

Для численных исследований процессов трансформации уходящего радиотеплового излучения системы подстилающая поверхность–атмосфера с учетом эффектов поляризации и многократного рассеяния необходимо, помимо решения уравнения переноса излучения, последовательное выполнение следующих этапов:

– определение коэффициентов поглощения атмосферных газов (водяного пара и кислорода);

– задание оптических характеристик облачности и осадков;

– моделирование оптических свойств различных типов поверхности.

В разработанной версии программного комплекса (ПК) используются две методики расчета коэффициентов поглощения микроволнового излучения кислородом. Первая, широко используемая до начала 90-х годов, предложена авторами [Жевакин, 1965; Liebe, 1977; Meeks, 1963] и хорошо описывает поглощение кислородом в высокочастотном диапазоне микроволнового спектра. Вторая методика [Liebe, 1992] уточняет поглощение для области 0,5 см длины поглощения кислорода.

Поскольку возможность использования алгоритма [Liebe, 1992] ограничена авторами по спектру до 67 ГГц (для частот более 90–100 ГГц методика дает отрицательные значения коэффициента поглощения), в данной версии программного комплекса (ПК) используются обе методики расчета: для каналов с частотами менее 60 ГГц методика [Liebe, 1992], для остальных – по данным [Жевакин, 1965; Liebe, 1977; Meeks, 1963], что оправдано тем, что для каналов МТВЗА с частотами более 67 ГГц поглощение кислорода не оказывает заметного влияния.

Перейдя к рассмотрению поглощения водяным паром, также можно выделить два исторически сложившихся алгоритма – инженерную методику [Зражевский, 1976] и алгоритм [Борин, 1979], сравнение которых приведено в работе [Степаненко, 1987]. Поскольку обе методики являются приближенными, и ни одна из них не имеет решающего преимущества в смысле точности расчета коэффициента поглощения в зависимости от участка спектра и физических условий, сейчас в ПК используется первая из упомянутых методик.

Рассматриваемая версия ПК работает с моделями жидкокапельных облаков, методика расчета оптических характеристик которых достаточно хорошо развита [Степаненко, 1987]. Для дождевых облаков нижнего яруса (St, Cu, Sc) размеры облачных частиц не превышают нескольких десятков микрон. Поэтому для рассматриваемого участка спектра справедливо релеевское приближение, и проблема определения оптических характеристик сводится к определению показателя преломления облачных частиц и получению полидисперсных оптических характеристик облаков на основе интегрирования по размерам облачных частиц с учетом функции их распределения по размерам.

Для дождевых облаков и жидких осадков релеевское приближение неприменимо, поэтому были созданы программы расчета оптических характеристик сферических частиц согласно теории Ми, их интегрирования по размерам для получения полидисперсных характеристик и аппроксимации аналитическими функциями их зависимости от длины волны, температуры и интенсивности осадков. Необходимость создания этих программ обусловлена тем, что, как правило, предлагаемые в литературе аппроксимации для расчета оптических характеристик осадков применимы лишь в более узком спектральном интервале, чем область измерений рассматриваемых радиометров 6–190 ГГц. В качестве функций распределения капель облаков и осадков по размерам была выбрана широко используемая модель Маршалла–Пальмера [Marshall, 1948].

Проводимая на заключительном этапе этих расчетов аппроксимация зависимости коэффициентов от перечисленных выше характеристик полиномами 2-й, 3-й степени позволяет получать удобные для использования в расчетах соотношения, обеспечивающие относительную среднеквадратичную погрешность аппроксимации не более 1–2 %.

Подстилающая поверхность характеризуется большим разнообразием типов и значительной изменчивостью параметров ее состояния. Однако, учитывая особенности интерпретации данных спутникового эксперимента – возможность корректной обработки только однородных на больших площадях (десятки километров) по структуре и свойствам участков поверхности, – можно на данном этапе ограничиться набором следующих основных типов: водная поверхность, открытые песчано-глинистые почвы или почвы с травяным покровом (степи, сельскохозяйственные угодья), лесные массивы, а также снежно-ледовые покровы.

За основу алгоритма численного моделирования оптических свойств водной поверхности были приняты эмпирические соотношения авторов [Pandey, 1982; Шутко, 1986], позволяющие получать значения коэффициентов отражения и излучения в зависимости от солености воды и скорости приводного ветра. Эмпирические соотношения расчета оптических характеристик песчаных и глинистых почв в зависимости от температуры и влажности были получены на основе экспериментальных данных работ [Шутко, 1986; Лещанский, 1971]. Для учета влияния растительного покрова использована приближенная методика представления его в качестве некоего поглощающего, пропорционально общей биомассе растительности, слоя. Для расчетов радиационных характеристик покровов типа снег–лед в зависимости от температуры, толщины снежного покрова и его плотности, солености льда были использованы алгоритмы, предложенные в работах [Мелентьев, 1991; Белич, 1983, Гордейчик, 1988; Богородский, 1978].

Для корректного моделирования прямой задачи – вычисления уходящего МКВ излучения с учетом поляризации – использовалось векторное уравнение переноса излучения:

$$\frac{d\vec{S}(\vec{\omega}, x, y, z)}{dl} = -\hat{C}(\vec{\omega}, x, y, z)\vec{S}(\vec{\omega}, x, y, z) + \int_{\Omega'} \hat{B}(\vec{\omega}, \vec{\omega}', x, y, z)\vec{S}(\vec{\omega}', x, y, z)d\Omega' + \vec{G}(\vec{\omega}, x, y, z),$$

где производная в точке x, y, z по расстоянию l берется вдоль направления распространения излучения $\vec{\omega}$, а интегрирование ведется по полному телесному углу 4π ; $\hat{C}(\vec{\omega}, x, y, z)$ и $\hat{B}(\vec{\omega}, \vec{\omega}', x, y, z)$ – полные матрицы ослабления излучения вдоль направления $\vec{\omega}$ и рассеяния из направления $\vec{\omega}'$ в направление $\vec{\omega}$ соответственно.

Из четырех компонент вектор-параметра Стокса в данной задаче нас интересуют только две первые – вертикально и горизонтально поляризованные составляющие. Поэтому вполне правомерны упрощения, проведенные с учетом особенностей переноса МКВ излучения в работе [Степаненко, 1987]: авторы [Кутуза, 1984; Матросов, 1984] продемонстрировали слабую зависимость поля радиотеплового излучения от вида индикатрисы рассеяния, что для горизонтально однородной атмосферы в предположении азимутально симметричной шероховатости и диффузности поверхности позволяет преобразовать исходное векторное уравнение к виду:

$$\eta \frac{dT_{\text{яв}}(\eta, z)}{dz} = -\alpha_o(z)T_{\text{яв}}(\eta, z) + \frac{3}{8}\alpha_p(z) \int_{-1}^1 \left\{ (2(1-\eta^2)(1-\eta'^2) + \eta^2\eta'^2) T_{\text{яв}}(\eta', z) + \eta^2 T_{\text{яв}}(\eta', z) \right\} d\eta' + \alpha_n(z)T(z),$$

$$\eta \frac{dT_{\text{яh}}(\eta, z)}{dz} = -\alpha_o(z)T_{\text{яh}}(\eta, z) + \frac{3}{8}\alpha_p(z) \int_{-1}^1 \{\eta'^2 T_{\text{яh}}(\eta', z) + T_{\text{яv}}(\eta', z)\} d\eta' + \alpha_n(z)T(z),$$

где $\eta = \cos \theta$, $\eta' = \cos \theta'$; α_o , α_p , α_n – коэффициенты ослабления, рассеяния и поглощения; $T_{\text{яv}}$, $T_{\text{яh}}$ – радиояркостные температуры вертикально и горизонтально поляризованных компонент излучения.

При программной реализации решения системы уравнений (1) был использован итерационный метод последовательных приближений, обеспечивающий погрешность расчетов не более 0,1 %.

2. Методика решения обратной задачи и проведения оценок точности ее решения

Для решения обратной задачи и проведения оценок точности был выбран метод статистической регуляризации [Кондратьев, 1970], в котором решение прямой задачи, определяемой системой нелинейных уравнений (1), предлагается заменить решением линейной системы вида:

$$\delta \vec{y} = \hat{A} \delta \vec{x} + \vec{\varepsilon}, \tag{2}$$

где $\delta \vec{y} = \vec{y} - \vec{y}_o$ – вектор вариаций радиояркостных температур для каналов МТВЗА; $\delta \vec{x} = \vec{x} - \vec{x}_o$ – вариации профилей метеорологических параметров (последовательно записанных вертикальных профилей температуры, влажности воздуха и водности облачности, температуры и других параметров состояния поверхности); \vec{x} – искомые профили, соответствующие данным наблюдений \vec{y} ; \vec{y}_o – решение согласно (1) прямой задачи для некоей опорной модели атмосферы \vec{x}_o ; $\hat{A} = \hat{A}(\vec{x}_o)$ – линеаризованный оператор прямой задачи для вариаций, также рассчитывается согласно (1), его столбцы, отнесенные к единице высоты (1 км), называют весовыми функциями; $\vec{\varepsilon}$ – вектор погрешностей измерений. Если приближение (2) правомерно (например, опорная модель близка к искомой), метод статистической регуляризации дает решение в виде

$$\delta \vec{x} = (\hat{A}^+ \hat{I}^{-1} \hat{A} + \hat{K}^{-1})^{-1} \hat{A}^+ \hat{I}^{-1} \delta \vec{y}, \tag{3}$$

где \hat{I} – матрица погрешностей измерений; \hat{K} – ковариационная матрица метеорологических параметров; символ «+» означает транспонирование.

Матрица ошибок

$$\hat{F} = (\hat{A}^+ \hat{I}^{-1} \hat{A} + \hat{K}^{-1})^{-1} \tag{4}$$

позволяет численно исследовать ошибки восстановления – ее диагональные элементы представляют собой значения дисперсии остаточной неопределенности восстанавливаемого вектора \vec{x} . Для наглядного представления этих

данных удобно использовать параметр, характеризующий информативность дистанционных измерений:

$$k_i = \frac{\sqrt{K_{ii}} - \sqrt{F_{ii}}}{\sqrt{K_{ii}}} 100 \%, \quad (5)$$

где K_{ii} и F_{ii} – диагональные элементы матриц $\hat{\mathbf{K}}$ и $\hat{\mathbf{F}}$ в (4). Этот параметр характеризует относительное уменьшение априорной неопределенности восстанавливаемых величин и может рассматриваться как критерий эффективности восстановления (далее «эффективность восстановления»).

Для использования описанного подхода к анализу ошибок восстановления атмосферных параметров необходимо задать априорную информацию в виде средних значений и ковариационных матриц.

В нашем случае искомый вектор метеопараметров атмосферы – это вертикальные профили температуры, влажности и водности облачности. Для построения соответствующих среднестатистических профилей и ковариационных матриц \mathbf{K} температуры и влажности был использован архив данных радиозондирования в п. Воейково за 1959–1971 гг. [Васищева, 1976], детализированных по месяцам и типам облачности, а также некоторые стандартные модели. Данные об облачности были взяты из монографии [Мазин, 1989].

На основе описанного алгоритма прямого расчета (1) были реализованы также алгоритмы расчета вариационных производных интенсивности уходящего излучения по различным параметрам атмосферы и подстилающей поверхности [весовых функций для линеаризованного оператора вариаций уравнения переноса излучения (2)] и алгоритмы оценки информативности измерений излучения и точности восстановления параметров состояния атмосферы и подстилающей поверхности на основе анализа матриц ошибок (4).

3. Результаты численных исследований

В табл. 1 приведены данные о центральных частотах рассматриваемых СВЧ-радиометров.

Таблица 1

Рабочие частоты (ГГц) СВЧ-радиометров МТВЗА-ОК (СИЧ-1М), МТВЗА-ГЯ (Метеор-3М) и AMSU (NOAA)

| № п/п | МТВЗА-ОК (СИЧ-1М) | МТВЗА-ГЯ (Метеор-3М) | AMSU (NOAA) |
|-------|-------------------|----------------------|--------------|
| 1 | 6,9 | 10,6 | 23,8 |
| 2 | 10,6 | 18,7 | 31,4 |
| 3 | 18,7 | 23,8 | 50,3 |
| 4 | 23,8 | 31,5 | 52,8 |
| 5 | 31,5 | 36,7 | 53,596±0,115 |
| 6 | 36,7 | 42 | 54,4 |
| 7 | 42 | 48 | 54,94 |
| 8 | 48 | 52,8 | 55,5 |
| 9 | 52,8 | 53,3 | 57,290344 |

| | | | |
|----|------------------------|----------|-------------------------|
| 10 | 53,3 | 53,8 | 57,290344±0,217 |
| 11 | 53,8 | 54,64 | 57,290344±0,3222±0,048 |
| 12 | 54,64 | 55,63 | 57,290344±0,3222±0,022 |
| 13 | 55,63 | 91,65 | 57,290344±0,3222±0,010 |
| 14 | 57,290344±0,3222±0,1 | 183,31±7 | 57,290344±0,3222±0,0045 |
| 15 | 57,290344±0,3222±0,05 | 183,31±3 | 89,0 |
| 16 | 57,290344±0,3222±0,025 | 183,31±1 | 89,0 |
| 17 | 57,290344±0,3222±0,01 | – | 150,0 |
| 18 | 57,290344±0,3222±0,005 | – | 183,31±1 |
| 19 | 91,65 | – | 183,31±3 |
| 20 | 183,31±7 | – | 183,31±7 |
| 21 | 183,31±3 | – | – |
| 22 | 183,31±1 | – | – |

Каналы 1–8, 19 радиометра МТВЗА-ОК и 1-7, 13 радиометра МТВЗА-ГЯ функционируют на вертикальной и горизонтальной поляризации, каналы всех радиометров около 57 ГГц, только на горизонтальной поляризации, остальные – только на вертикальной поляризации. Каналы 16–20 радиометра AMSU отличаются от каналов 1–15 втрое более высоким угловым (пространственным) разрешением и втрое большей частотой сканирования. Отличие радиометров МТВЗА от AMSU состоит в способе сканирования – МТВЗА сканирует по поверхности конуса так, что угол наблюдения всегда должен быть равен 50°, а AMSU – в плоскости, перпендикулярной направлению полета, поэтому угол наблюдения меняется от 0° для подспутниковой точки до 50°.

Учтя разнообразие возможных типов поверхности и состояния атмосферы для правомерности использования линейного приближения (2), необходимо рассмотреть возможность разработки методик предварительной обработки данных наблюдений с целью определения типа поверхности, фиксации наличия облачности и осадков для подбора среднестатистической модели в (2), наиболее близкой к реальной. В табл. 2 приведены результаты расчетов яркостных температур уходящего микроволнового излучения для трех каналов наблюдений (10,6, 48 и 91,65 ГГц) МТВЗА в «окнах прозрачности» атмосферы над сушей и морем в ясную, облачную и дождливую погоду.

Таблица 2

Яркостные температуры (К) для ряда каналов наблюдений МТВЗА-ОК (В – вертикальная поляризация, Г – горизонтальная)

| Канал набл., ГГц | Тип поверхности | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-----------------|-------|---------------------|-------|----------------|-------|---------------|-------|---------------------|-------|----------------|-------|
| | суша, ясно | | суша, облачность | | суша, дождь | | море, ясно | | море, облачность | | море, дождь | |
| | В | Г | В | Г | В | Г | В | Г | В | Г | В | Г |
| 10,6 | 278,5 | 237,9 | 273,4 | 235,1 | 274,0 | 237,6 | 165,4 | 92,1 | 166,7 | 97,4 | 172,5 | 106,6 |
| 48,0 | 280,4 | 263,2 | 273,3 | 263,5 | 274,2 | 270,7 | 232,8 | 188,7 | 247,6 | 222,3 | 264,8 | 255,8 |
| 91,65 | 285,1 | 267,6 | 273,7 | 269,0 | 273,7 | 272,8 | 247,0 | 194,5 | 264,1 | 249,8 | 271,8 | 269,1 |

Анализ данных таблицы показывает, что тип поверхности по данным наблюдений МТВЗА лучше определять по данным наблюдений в длинноволновых каналах, где влияние атмосферы минимально. Облачность и осадки заметно уменьшают деполяризацию МКВ излучения, причем тем существеннее, чем короче длина волны. В целом полученные результаты подтверждают возможность успешного решения поставленной задачи для радиометров МТВЗА, особенно по мере накопления реальных данных и изучения региональных особенностей формирования уходящего излучения.

Для радиометров AMSU ситуация иная – наличие только двух каналов в «окнах прозрачности» атмосферы 31,4 и 89 ГГц и отсутствие данных о поляризации приводит к тому, что параметры состояния поверхности и идентификацию наличия облачности необходимо проводить по данным наблюдений 5-канального радиометра AVHRR ИК и видимого диапазонов спектра и 20-канального радиометра HIRS ИК диапазона.

Как показали проведенные предварительно численные исследования прямой задачи расчета уходящего микроволнового излучения, необходимость учета многократного рассеяния обусловлена тем, что при наличии осадков его влияние может приводить к изменению радиояростной температуры уходящего излучения на величины до нескольких градусов, особенно в области низкочастотных каналов 6–37 ГГц, где, например, при интенсивности дождя 10 мм/ч и при чувствительности радиометра 0,3–0,5 К учет рассеяния дает поправку примерно от 1 К для канала 36,5 ГГц до 2 К для канала 19 ГГц, около 0,5 К для канала 42 ГГц и менее 0,1–0,2 К для остальных по сравнению с наилучшим, простым видом приближенного расчета, когда учитывается только чистое поглощение.

В дальнейшем были проведены серии расчетов весовых функций для линейаризованного оператора вариаций уравнения переноса излучения (2) и выполнены оценки информативности измерений уходящего излучения и точности восстановления параметров состояния атмосферы и подстилающей поверхности на основе анализа матриц ошибок (4). Весовые функции характеризуют чувствительность уходящего излучения в различных каналах измерений к вариациям параметров атмосферы на различных уровнях.

На рис. 1 представлен пример расчета весовых функций, описывающих влияние вариаций температуры атмосферы на уходящее радиотепловое излучение для каналов наблюдения МТВЗА-ОК в области 5-миллиметровой полосы поглощения кислорода. Расчеты проводились для условий летней, ясной погоды (август, интегральное содержание водяного пара $Q = 18,6 \text{ кг/м}^2$, песчаная, поросшая травой почва). Можно видеть, что возможности комплекса МТВЗА-ОК позволяют проводить зондирование вертикального распределения температуры в атмосфере до высот 45–50 км, что является следствием наличия блока каналов измерений в центре полосы поглощения кислорода около 57 ГГц.

Для прозрачных каналов измерений радиометра максимумы весовых функций по температуре находятся на подстилающей поверхности. В каналах с достаточно сильным поглощением водяного пара максимумы находятся в нижней и средней тропосфере. Абсолютные значения весовых функций по температуре для прозрачных каналов невелики и не превышают $0,04\text{--}0,05 \text{ K}/(\text{K} \cdot \text{км})$.

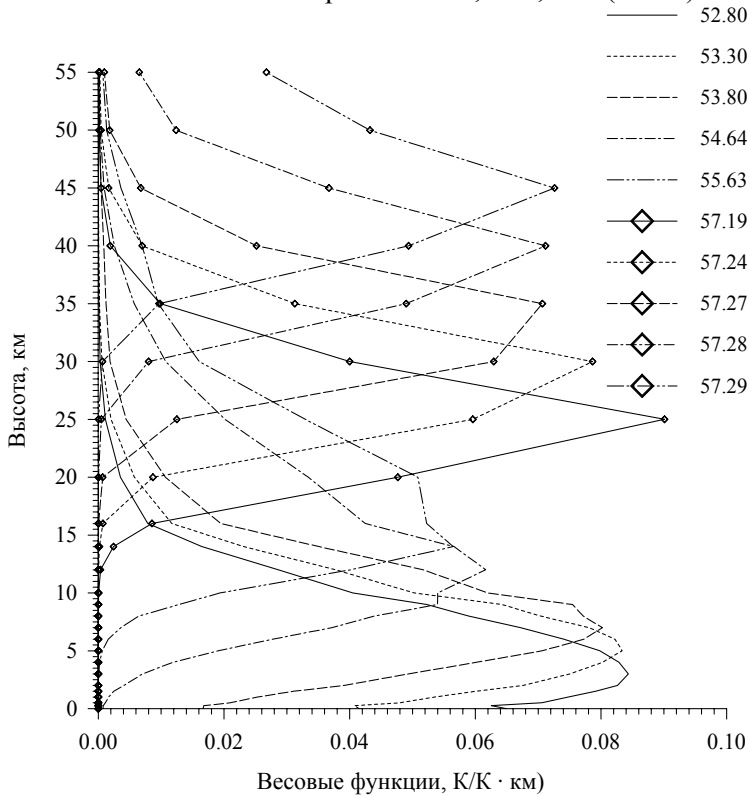


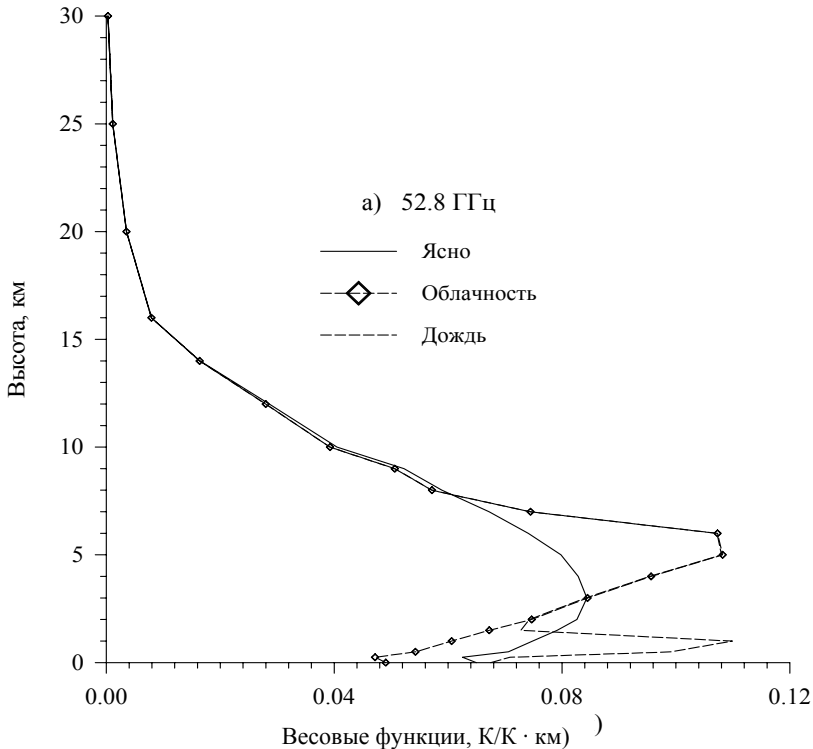
Рис. 1. Весовые функции по температуре в полосе кислорода для МТВЗА-ОК ИСЗ «СИЧ-1М». Ясно, суша.

В линии водяного пара вблизи 180 ГГц эти весовые функции могут достигать значений $0,1\text{--}0,2 \text{ K}/(\text{K} \cdot \text{км})$, что говорит о достаточно высокой чувствительности радиояркой температуры в этих каналах к вариациям температуры в тропосфере. Это свидетельствует о том, что задача качественного восстановления вертикального профиля влажности атмосферы в существенной степени зависит от погрешностей определения вертикального профиля температуры в тропосфере.

На рис. 2 а, б показана трансформация весовых функций по температуре в случае наличия облачности и осадков (облачность $1,24 \text{ кг}/\text{м}^2$ в слое 1–6 км и дождь интенсивностью 10 мм/ч в нижнем километровом слое, $Q = 24,7 \text{ кг}/\text{м}^2$). Наличие облаков и тем более осадков в атмосфере существенно видоизменяет

весовые функции по температуре, даже для канала 52,8 ГГц в полосе поглощения кислорода. Это свидетельствует о том, что при интерпретации реальных измерений СВЧ-радиометра целесообразно решать комплексную обратную задачу относительно вертикальных профилей температуры и влажности, а также характеристик облачности и осадков или применять специальные методики селекции наличия облаков и осадков.

На рис. 3 приведены для примера весовые функции относительно влажности атмосферы для различных каналов радиометра МТВЗА-ГЯ (Метеор-3М). Из приведенного рисунка следует, что весовые функции по влажности расположены в основном в тропосфере, не имеют ярко выраженных высотных максимумов, а в ряде каналов могут менять знак (в линии поглощения водяного пара вблизи 180 ГГц). Величины весовых функций таковы, что при изменении влажности атмосферы на 1 г/кг в километровом слое атмосферы вариации радиоярких температур не превышают 0,8 К. Вертикальный ход весовых функций по влажности (отсутствие четко выраженных локальных максимумов) свидетельствует о низком вертикальном разрешении при восстановлении вертикальной структуры влажности атмосферы. Особенности вертикального хода этих функций позволяют выделить три слоя: 0–3 км, 3–7 км и 7–14 км.



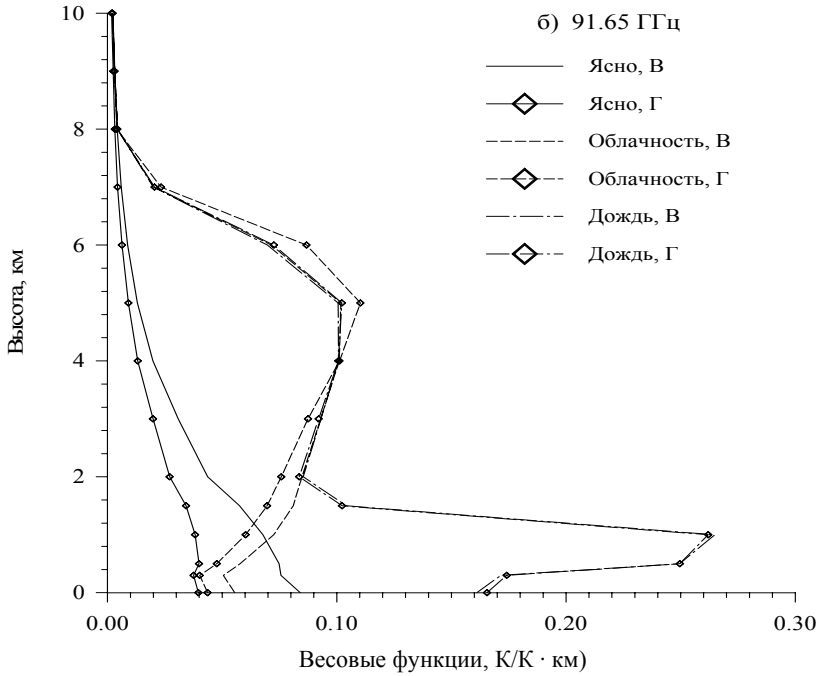


Рис. 2. Сравнение весовых функций по температуре для суши при ясной, облачной и дождливой погоде. В – вертикальная поляризация, Г – горизонтальная поляризация.

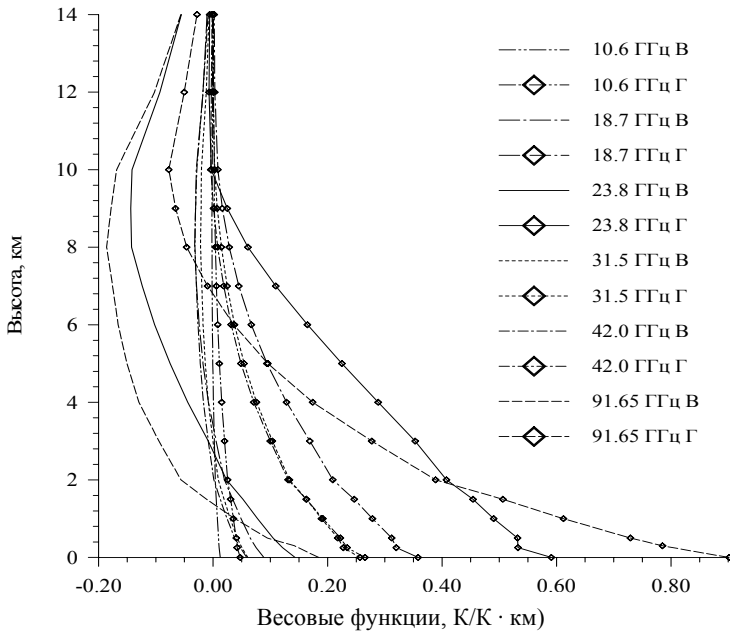


Рис. 3. Весовые функции по влажности воздуха для различных каналов. Ясно, суша (Г, В – горизонтальная и вертикальная поляризации).

На рис. 4 исследуется влияние наличия облаков и осадков на весовые функции по влажности для канала измерений при 91,65 ГГц. Из приведенных данных следует, что влияние облаков и осадков на весовые функции по влажности существенно.

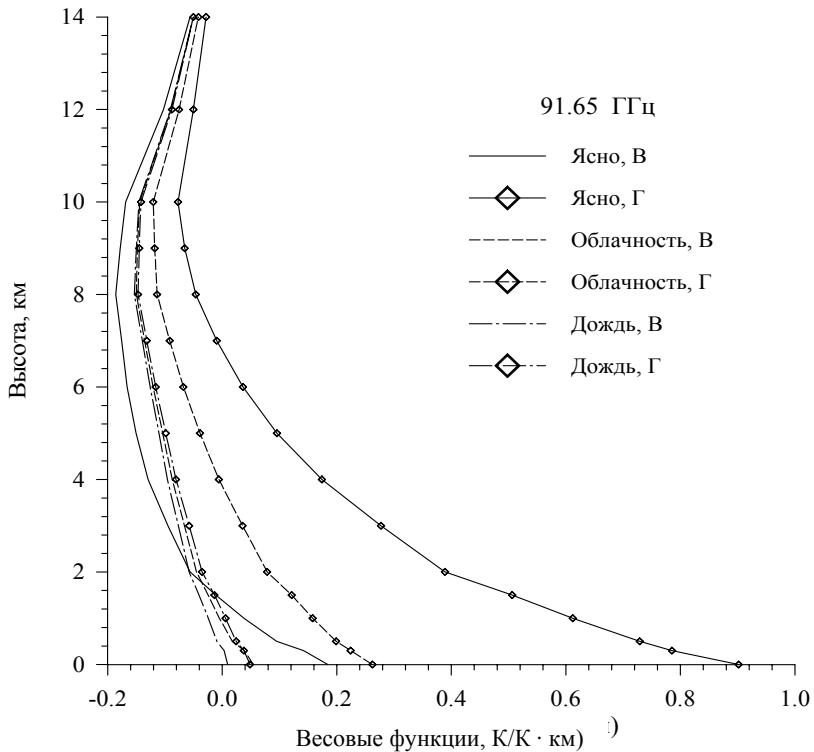


Рис. 4. Сравнение весовых функций по влажности для канала 91,65 ГГц при ясной, облачной и дождливой погоде (суша) (Г, В – горизонтальная и вертикальная поляризации).

Наличие облаков и тем более осадков в существенной степени мешает восстановлению профиля влажности атмосферы в тропосфере.

Весовые функции по водности облаков приведены на рис. 5 для различных каналов радиометра МТВЗА-ГЯ.

Приведенный рисунок демонстрирует сложное поведение весовых функций по водности облаков как по спектру, так и по высоте. Эти весовые функции могут иметь различные знаки в различных каналах, т.е. может происходить увеличение или уменьшение уходящего микроволнового излучения при увеличении водности облаков, а также менять знак на разных высотах. Сама величина водности облаков существенно влияет на радиояркостную температуру.

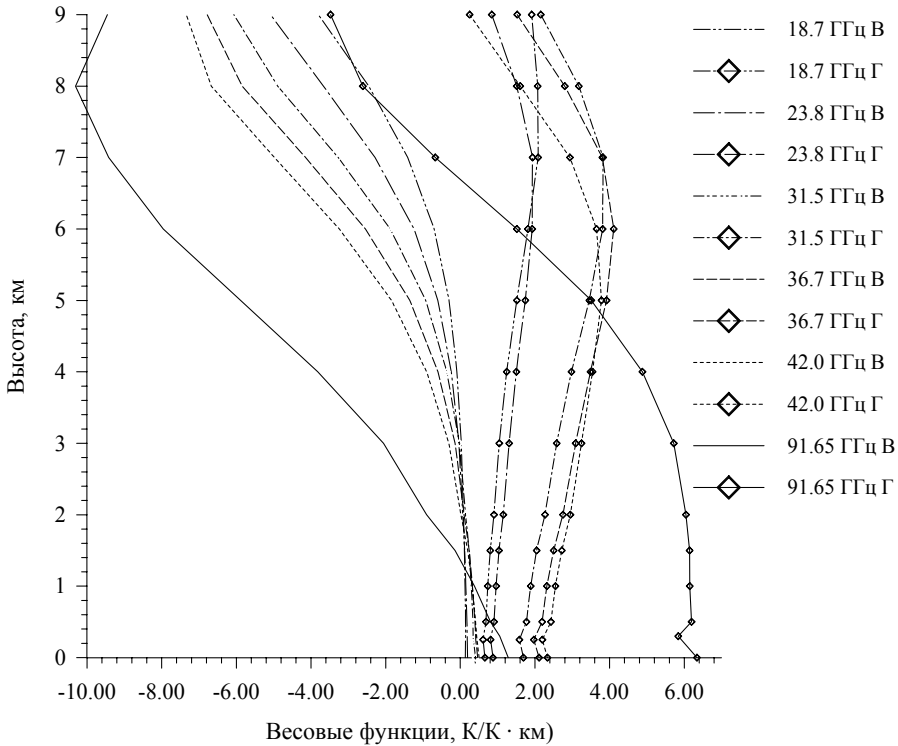


Рис. 5. Весовые функции по водности облака (суша) (Г, В – горизонтальная и вертикальная поляризации).

4. Численные оценки информативности данных СВЧ-радиометров

Дальнейший анализ перспектив использования данных наблюдений радиометра МТВЗА был выполнен на основе численного расчета матриц ошибок. Эти матрицы были рассчитаны при высотной дискретизации атмосферы на 25 уровнях от 0 до 55 км (с переменным по высоте шагом от 0,25 до 5 км).

Для рассматриваемых радиометров были проведены расчеты эффективности восстановления [согласно выражению (5), разд. 2] вертикальных распределений температуры, влажности, водности облаков, а также температуры и некоторых других параметров состояния подстилающей поверхности. На рис. 6–8 приведены результаты этих расчетов для радиометра МТВЗА-ОК для различных состояний атмосферы, типа подстилающей поверхности и точности измерений, а также проведено сравнение с эффективностями восстановления других радиометров.

На рис.6 приведены эффективности восстановления температуры по данным наблюдений МТВЗА-ОК над сушей и океаном для ясной погоды; облачности на высотах 1–6 км с водозапасом 1,2 кг/м²; облачности с дождем интенсивностью 10 мм/ч и для ясной погоды над сушей по данным наблюдений МТВЗА-ГЯ. Можно отметить, что погодные условия и тип поверхности

вливают на эффективность восстановления практически только в тропосфере, а наличие блока дополнительных каналов в полосе поглощения кислорода около 57 ГГц позволяет поднять потолок зондирования температуры с 20–25 до 45–50 км. Заметное увеличение эффективности имеет место при увеличении точности измерений.

Выражение (5) можно переписать в виде

$$\sigma_{\text{апостериори}} = \sigma_{\text{априори}} (1 - 0,01k_i), \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{апостериори}}$ и $\sigma_{\text{априори}}$ – апостериорные и априорные неопределенности восстанавливаемых величин; k_i – эффективность восстановления.

Выражение (6) позволяет получить оценки абсолютных значений погрешности восстановления. Так, значение эффективности восстановления 50 % означает, что ошибка восстановления должна быть вдвое меньше первоначальной неопределенности. По данным рис. 6 можно сделать вывод, что при значениях первоначальной неопределенности температуры около 5 К ошибка восстановления будет около 3,5 К для высот менее 20 км и около 2,5 К выше 20 км.

На рис. 7 и 8 даны эффективности восстановления влажности воздуха и водности облачности соответственно для тех же случаев, что и на рис. 6.

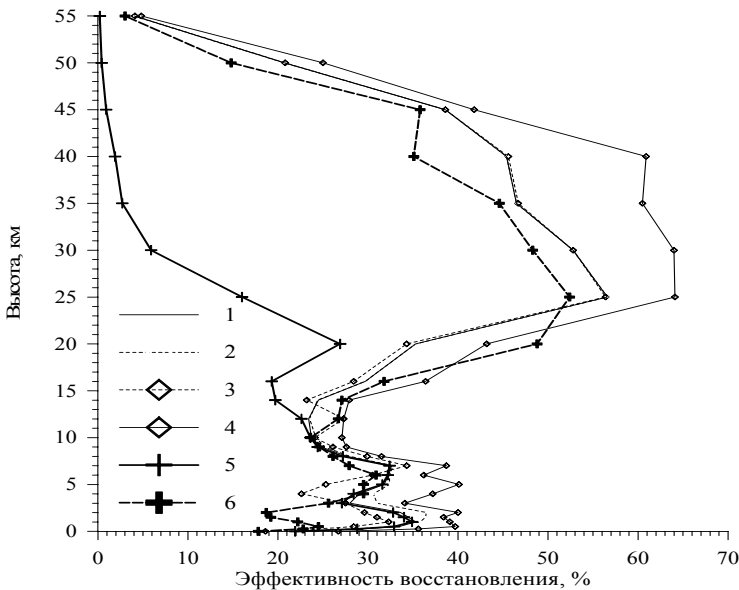


Рис. 6. Эффективность восстановления температуры по данным наблюдений МТВЗА-ОК (СИЧ-1М) (1–4) и по данным наблюдений МТВЗА-ГЯ (Метеор-3М) (5 – ясно над сушей) и AMSU (NOAA) (6 – ясно над сушей). Кривая 1 – ясно над сушей, 2 – облачность над сушей, 3 – ясно над океаном; 4 – точность 0,2 К.

Проанализировав рис. 6–8, можно отметить, что тип поверхности и наличие облачности заметно влияют на эффективность в пределах тропосферы, различия между двумя радиометрами МТВЗА проявляются заметно только за пределами тропосферы, радиометр AMSU имеет некоторое преимущество только на высотах 10–20 км и заметно уступает в тропосфере; потолок зондирования для водяного пара составляет 14–16 км (за пределами шкалы высот на рис. 7 эффективность резко стремится к нулю), для водности облаков – 8–10 км. Эффективность восстановления водности облаков для случая ясной погоды позволяет оценить точность выявления отсутствия облачности. Наибольший выигрыш в эффективности восстановления получается при повышении точности измерений.

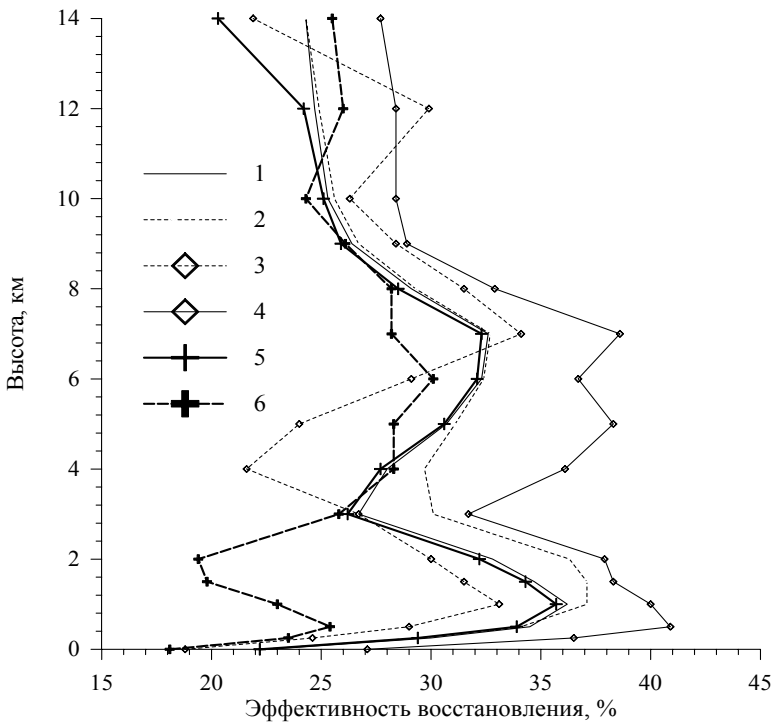


Рис. 7. Эффективность восстановления влажности по данным наблюдений МТВЗА-ОК (СИЧ-1М) (1-4) и по данным наблюдений МТВЗА-ГЯ (Метеор-3М) (5 – ясно над сушей) и AMSU (NOAA) (6 – ясно над сушей). Кривая 1 – ясно над сушей, 2 – облачность над сушей, 3 – ясно над океаном; 4 – точность 0,2 К.

Были исследованы также эффективности определения температуры поверхности, скорости приводного ветра и влажности почвы по данным МТВЗА-ОК, а также определения интегральных характеристик влагосодержания атмосферы – общего содержания водяного пара и водозапаса облачности. В табл. 3 представлены значения эффективности для тех же шести случаев, что и на рис. 6–8.

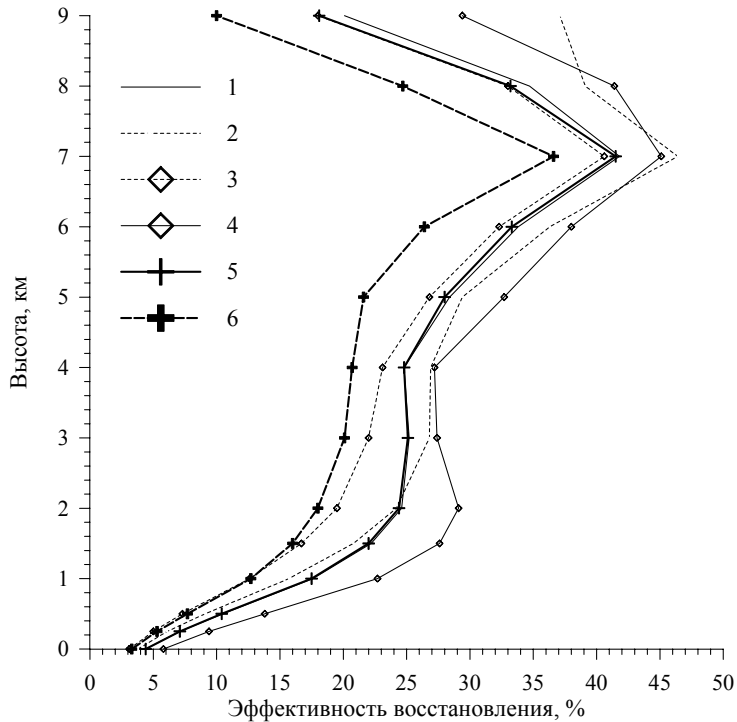


Рис. 8. Эффективность восстановления водности облаков по данным наблюдений МТВЗА-ОК (СИЧ-1М) (1-4) и по данным наблюдений МТВЗА-ГЯ (Метеор-3М) (5 – ясно над сушей) и AMSU (NOAA) (6 – ясно над сушей). Кривая 1 – ясно над сушей, 2 – облачность над сушей, 3 – ясно над океаном; 4 – ясно над сушей, точность 0,2 К.

Таблица 3

Значения эффективности восстановления (%) параметров состояния поверхности и интегральных характеристик влагосодержания (МТВЗА-ОК)

| Атмосфера | Суша | | | | |
|----------------------------|--------------------------|-------|-------------------|------|------|
| | Погрешность измерения, К | T_s | $\rho_{\text{п}}$ | Q | W |
| Ясно | 0,5 | 78,7 | 88,6 | 80,1 | 98,1 |
| Облачно | 0,5 | 73,0 | 86,8 | 41,9 | 90,8 |
| Ясно | 0,2 | 91,9 | 94,8 | 90,6 | 98,3 |
| МТВЗА-ГЯ | 0,5 | 60,8 | 75,3 | 66,0 | 97,6 |
| AMSU | 0,5 | 47,4 | 59,6 | 48,8 | 65,0 |
| Вода (морская поверхность) | | | | | |
| Атмосфера | Погрешность измерения, К | T_s | $V_{\text{в}}$ | Q | W |
| Ясно | 0,5 | 68,6 | 72,2 | 92,4 | 98,9 |

Примечание. Здесь T_s – температура поверхности, $\rho_{\text{п}}$ – влажность почвы, $V_{\text{в}}$ – скорость приводного ветра, Q – общее содержание водяного пара, W – водозапас облачности.

Проанализировав приведенные данные, можно отметить сравнительно высокие значения эффективности восстановления всех рассмотренных пара-

метров, кроме общего содержания водяного пара при наличии облачности и дождя, что приводит к снижению значений эффективности для всех параметров. Некоторое увеличение эффективности для Q в дождевых условиях может быть следствием процессов многократного рассеяния в нижнем слое атмосферы. Ухудшение эффективности для параметров состояния поверхности и одновременное повышение ее для общих содержаний жидкой и парообразной влаги в случае водной поверхности происходит вследствие уменьшения относительного вклада излучения поверхности в уходящее микроволновое излучение. Следует отметить также, что МТВЗА-ОК имеет более высокие значения эффективности восстановления всех четырех параметров по сравнению с МТВЗА-ГЯ и тем более по сравнению с AMSU.

Заключение

Разработана радиационная модель переноса теплового микроволнового излучения в системе облачная атмосфера–подстилающая поверхность с учетом процессов многократного рассеяния и поляризации. Созданы алгоритмы интерпретации данных спутниковых наблюдений многоканальных СВЧ радиометров с целью дистанционного зондирования температурно-влажностных характеристик состояния атмосферы и подстилающей поверхности.

Проведены численные исследования информативности и точности определения таких параметров, как вертикальные профили температуры, влажности, водности облаков, температуры и прочих параметров состояния поверхности, общего влагосодержания атмосферы и водозапаса облачности. Рассмотрены преимущества и недостатки трех СВЧ-радиометрических комплексов: МТВЗА-ГЯ (Метеор-3М), МТВЗА-ОК (СИЧ-1М), AMSU (NOAA 15, 16, 17).

В общем создан комплекс алгоритмов и программных средств для разработки программных комплексов оперативной обработки данных реальных спутниковых наблюдений этих радиометров.

Литература

1. *Белич Р.Б.* Расчет излучательной способности ледяного и снежного покровов в СВЧ-диапазоне. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 312 с. (Труды ГосНИЦИПР).
2. *Богородский В.В., Мартынова Е.А.* Собственное тепловое излучение снежно-ледяного покрова арктических морей. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 40 с.
3. *Борин В.Л., Наумов А.П.* О некоторых особенностях радиоизлучения атмосферы вблизи резонанса поглощения H_2O на $\lambda = 1,35$ см. // Радиотехника и электроника, 1979, 24, 1, с. 44–52.
4. *Васищева М.А., Шужин Г.Г.* Экспериментальные исследования водности облаков. Статистические модели атмосферы. / Обзор. ВНИИГМИ МЦД. – Обнинск, 1976. – 92 с.
5. *Гордейчик Д.Е., Шульгина Е.М.* Физические характеристики и диэлектрические модели снежного покрова в СВЧ-диапазоне. // Труды ГГО, 1988, вып. 518, с. 83–97.
6. *Жевакин С.А., Наумов А.П.* К расчету коэффициентов поглощения сантиметровых и миллиметровых радиоволн в атмосферном кислороде. // Радиотехника и электроника, 1965, 10, 6, с. 987–996.

7. Зражевский А.Ю. Методика расчета поглощения в атмосферных парах воды в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. // Радиотехника и электроника, 1976, 21, 5, с. 951–957.
8. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – 410с.
9. Кутуза Б.Г., Петренко Б.З., Смирнов М.Т. Радиояркостьная температура системы атмосфера–океан при наличии дождя и возможности оценки его интенсивности. В кн.: Радиометеорология. Труды VI Всесоюз. совещания. – Л.: Гидрометеоздат, 1984, с. 247–251.
10. Лещанский Ю.И., Лебедева Г.Н., Шумилин В.Д. Электрические параметры песчаного и глинистого грунта в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн. // Изв. вузов. Радиофизика, 1971, 14, 4, с. 561–569.
11. Мазин И.П., Хргиан А.Х. Облака и облачная атмосфера. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 647 с.
12. Матросов С.Ю., Рабинович Ю.И. Перенос радиотеплового излучения в атмосфере, содержащей рассеивающий слой осадков. / В кн.: Радиометеорология. Труды VI Всесоюз. совещания. – Л.: Гидрометеоздат, 1984, с. 223–226.
13. Мелентьев В.В., Александров В.Ю. Модельные расчеты СВЧ-излучательных свойств пресноводного льда и мерзлых грунтов. // Труды ААНИИ, 1991, т. 421, с. 138–146.
14. Образцов С.П., Шукин Г.Г. Теоретические исследования информативности данных наблюдений СВЧ-радиометрического комплекса МТВЗА ИСЗ "Метеор-3М". // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 2002, вып. 4 (552), с. 3–13.
15. Образцов С.П., Шукин Г.Г. Восстановление параметров атмосферы и подстилающей поверхности по данным спутниковых наблюдений в видимом, ИК- и СВЧ-диапазонах электромагнитного спектра длин волн. // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 2004, вып. 5 (553), с. 65–98.
16. Степаненко В.Д., Шукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 283 с.
17. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. – М.: Наука, 1986. – 190 с.
18. Liebe H.J., Gimmestad G., Hopponen J. Atmospheric microwave spectrum experiment versus theory. // IEEE trans. 1977, AP–25, 3, 327–336.
19. Liebe H.Z., Rosenkranz P.W., Hufford G.A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer., 1992, 48, 629–645.
20. Marshall J.S., Palmer W.M. The distribution of raindrops with size. // J. Meteorol., 1948, 5, 165–168.
21. Meeks M.L., Lilley A.E. The microwave spectrum of oxygen in the Earth's atmosphere. // J. Geophys. Res., 1963, 68, 6, 1683–1704.
22. Pandey P.C., Kakar R.K. An empirical microwave emissivity model for a foam covered sea. // IEEE J. of Oceanic Engineering, OE–7, 1982, 3, 135–140.