
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНИЙ 22.2, 183 И 325 ГГц
ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ
ВОДЯНОГО ПАРА В ТРОПИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРЕ**

© 2013 г. А. Г. Сёмин¹, А. В. Кузьмин^{2*}, Ю. Б. Хапин², Е. А. Шарков²

¹ Пензенский государственный педагогический университет им. В.Г. Белинского, Пенза

² Институт космических исследований Российской академии наук, Москва,

* E-mail: kuzmin@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 29.05.2012 г.

В работе рассматривается возможность восстановления детальных профилей водяного пара в тропической атмосфере по данным спутниковых измерений радиотеплового микроволнового излучения. В прямой задаче анализируется возможность восстановления профиля водяного пара на 8–10 высотных уровнях до высоты 10 км с использованием резонансных линий поглощения 183 и 325 ГГц, а также использование линии 22.2 ГГц. В работе приводятся спектры интегрального поглощения в атмосфере, спектры радиоярких температур атмосферы и системы атмосфера–океан в диапазоне 5–220 ГГц. Решение этой задачи, несомненно, будет принципиально важным шагом в изучении физических условий генезиса и эволюции тропических циклонов.

Ключевые слова: восстановление профиля водяного пара в атмосфере, микроволновая радиометрия, радиояркая температура

DOI: 10.7868/S0205961413010053

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных факторов, определяющих процессы, происходящие в системе атмосфера–океан, является атмосферный водяной пар. Получение оперативной информации о детальных трехмерных полях влажности методами дистанционного зондирования (ДЗ) Земли из космоса позволит решить ряд актуальных научных и практических задач. В частности, дает возможность изучения физических условий генезиса и эволюции тропических циклонов (ТЦ), предсказания возникновения катастрофических циклонов.

ТЦ представляет собой явление природы планетарного масштаба, и естественно считать, что его генезис также обусловлен гидродинамической крупномасштабной неустойчивостью. Однако обычная система уравнений гидродинамики для сухой атмосферы не описывает никакой крупномасштабной неустойчивости. В свою очередь конвективная неустойчивость не является крупномасштабной и не может отвечать за возникновение и развитие такой структуры, как ТЦ. Таким образом, поиск физического механизма, адекватно описывающего возникновение крупномасштабной неустойчивости типа ТЦ, является одной из важнейшей физических задач (Sharkov, 1998, 2000; Rutkevich, Шарков, 2004; Шарков,

2010). Все существующие модели генезиса ТЦ сходятся на том, что его энергетическим источником является выделение скрытой теплоты конденсации и сублимации атмосферной влаги. Основные модели имеют варианты как “сухого”, так и “влажного” вихрей, различающихся только своими энергетическими характеристиками, и роль фазовых превращений влаги в атмосфере для этих моделей не выходит за рамки вспомогательного элемента. В работах (Rutkevich, 2002; Rutkevich, Шарков, 2004) предложена принципиально новая термогидродинамическая модель крупномасштабной неустойчивости в атмосфере с насыщенным водяным паром, которая может существенно изменить взгляды на формирование дистанционных микроволновых систем, предназначенных для исследования условий генезиса атмосферных катастроф. На основе модельных представлений, экспериментальных данных микроволновых комплексов и при учете насыщенности всего высотного столба атмосферы водяным паром показана принципиальная возможность существования немонотонного (в противоположность ситуации “сухой” атмосферы) распределения скорости звука по высоте (сжимаемая атмосфера) с явно выраженным минимумом величины скорости звука. Последнее и определяет необходимые условия генерации вихревых структур

тур. Именно эти условия, которые сводятся к выявлению своего рода инверсии высотного профиля звука, ставят на повестку дня требования к принципиально новым методам ДЗ предкризисных и кризисных ситуаций в земной атмосфере. В первую очередь это относится к дистанционному определению пространственно-временных характеристик детального высотного профиля содержания водяного пара и температуры внутри облачных систем (конвективного и неконвективного характера) на значительных пространственных океанических акваториях. Существующие методики обработки ИК-данных – например, в режиме “расщепленные” окна (Uspensky, Scherbina, 1996), – не позволяют достичь необходимой точности восстановления профиля водяного пара. Подобные исследования возможно выполнить только при помощи пассивных микроволновых дистанционных космических систем нового поколения (Кузьмин и др., 2005).

В работе рассматривается возможность восстановления детальных профилей водяного пара в тропической атмосфере по данным спутниковых измерений радиотеплового микроволнового излучения. В прямой задаче анализируется возможность восстановления профиля водяного пара на восемь–десяти высотных уровнях до высоты 10 км с использованием резонансных линий поглощения 183 и 325 ГГц, а также с использованием линии 22.2 ГГц. В работе приводятся спектры интегрального поглощения в атмосфере, спектры радиояркостных температур атмосферы и системы атмосфера–океан в диапазоне 5–220 ГГц. Решение этой задачи, несомненно, будет принципиально важным шагом в изучении физических условий генезиса и эволюции ГЦ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕСОВЫХ ФУНКЦИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА

Для получения детальных вертикальных профилей влажности рассмотрим возможность использования резонансных линий молекулярного водяного пара 22.2, 183.3 и 325.1 ГГц.

Радиояркостная температура атмосферы при восходящем и нисходящем излучении на частоте ν в мм-диапазоне длин волн под углом падения θ определяется следующими выражениями:

$$T_{au} = \int_0^{\infty} T(h) \gamma_{\nu}(h) \exp \left[- \int_h^{\infty} \gamma_{\nu}(h') \sec \theta dh' \right] \sec \theta dh,$$

$$T_{ad} = \int_0^{\infty} T(h) \gamma_{\nu}(h) \exp \left[- \int_0^h \gamma_{\nu}(h') \sec \theta dh' \right] \sec \theta dh,$$

где $T(h)$ – вертикальный профиль температуры; $\gamma_{\nu}(h)$ – погонный коэффициент поглощения на высоте h .

Радиояркостная температура системы атмосфера–океан, регистрируемая антенной радиометра на орбите ИСЗ, определяется следующим выражением:

$$T_{bv}(\theta) = [1 - R_v(\theta)] T_S \exp(-\tau_{0v} \sec \theta) + T_{au} + R_v(\theta) T_{ad} \exp(-\tau_{0v} \sec \theta),$$

где $R_v(\theta)$ – энергетический коэффициент отражения поверхности; T_S – температура поверхности; τ_{0v} – зенитное интегральное поглощение радиоволн. При расчете радиояркостной температуры учитывались три составляющие. Первая составляющая – это излучение подстилающей поверхности, ослабленное атмосферой; вторая – яркостная температура восходящего излучения атмосферы; третья – нисходящее излучение атмосферы, отраженное поверхностью и ослабленное атмосферой. При проведении модельных расчетов реликтовое излучение не учитывалось.

Интегральное поглощение в атмосфере под углом θ определяется выражением

$$\tau_{\nu}(\theta) = \int_0^{\infty} \gamma_{\nu}(h) \sec \theta dh = \tau_{0\nu} \sec \theta.$$

При расчетах учитывалось поглощение в молекулярном кислороде, молекулярном водяном паре и облачности. Поглощение радиоволн в см- и мм-диапазоне длин волн в атмосферном кислороде подробно рассмотрено в работах (Жевакин, Наумов, 1965; Жевакин, 1986), поглощение радиоволн в атмосферном водяном паре в этом диапазоне приводится в работах (Жевакин, Наумов, 1964; Зражевский, 1976). Модельные расчеты интегрального поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 5–220 ГГц в молекулярном кислороде проводились по методике, приведенной в работе (Жевакин, 1986), расчеты поглощения в атмосферном водяном паре – по методикам (Зражевский, 1976).

Расчет весовых функций электромагнитного излучения атмосферы в окрестностях линий резонанса проводился методом численного интегрирования. Атмосфера до высоты 25 км разбивается на слои высотой $\Delta h = 50$ м, где рассчитывается погонное поглощение в середине каждого слоя. Радиояркостная температура i -го атмосферного слоя с учетом ослабления излучения вышележащими слоями может быть представлена в виде

$$T_{ai} = T(h_i) [1 - \exp(-\gamma(h_i) \Delta h \sec \theta)] \sum_{k=i+1}^n \gamma(h_k) \Delta h \sec \theta,$$

где $T(h_i)$ – температура i -го слоя; $\gamma(h_i)$ – погонное атмосферное поглощение в середине слоя; $n = 500$ – число слоев. Яркостная температура каждого слоя нормируется к температуре слоя с максимальной радиояркостной температурой.

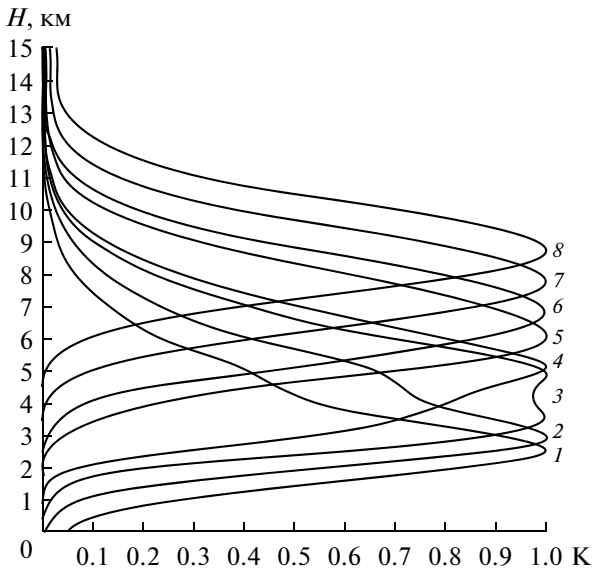


Рис. 1. Весовые функции восходящего излучения атмосферы в линии резонанса водяного пара 183.31 ГГц. Тропическая атмосфера. $T = 300$ К; $R = 19$ г/м³; $W = 41.4$ кг/м². 1 – Частота 183.31 ± 12.0 ГГц, максимум 2.50 км; 2 – частота 183.31 ± 8.0 ГГц, максимум 4.17 км; 3 – частота 183.31 ± 5.95 ГГц, максимум – 5.1 км; 4 – частота 183.31 ± 4.8 ГГц, максимум – 5.1 км; 5 – частота 183.31 ± 2.7 ГГц, максимум 6.0 км; 6 – частота 183.31 ± 2.1 ГГц, максимум 6.9 км; 7 – частота 183.31 ± 1.2 ГГц, максимум 7.8 км; 8 – частота 183.31 ± 0.3 ГГц, максимум 8.7 км.

При расчете весовых функций была выбрана стандартная тропическая атмосфера, температура воздуха у поверхности – 300 К, влажность – 19.0 г/м³, давление – 1013 мб, интегральная влажность – 41.4 кг/м². Угол θ составляет 49.2° (высота орбиты 450 км, надирный угол – 45°). Предполагается двухполосный супергетеродинный режим приема радиометров, входные полосы симметричны относительно центров резонансных линий.

Результаты расчета весовых функций восходящего излучения атмосферы в линии 183.3 ГГц приведены на рис. 1. Центры полос приема выбирались таким образом, чтобы максимумы весовых функций достаточно равномерно располагались по высоте и охватывали максимальный диапазон высот. Здесь также учитывалась возможная ширина входной полосы приемного устройства. Расчеты показывают, что максимумы функций по высоте расположены достаточно равномерно от 2.5 до 8.7 км, число уровней может составлять 7–8. Снизить высоту максимума весовой функции ниже 2.5 км не позволяет ограничение на ширину входной полосы приемника. Увеличение высоты максимума функции более 8.7 км ограничивается возможностью приближения частоты полосы приема к центру резонансной линии.

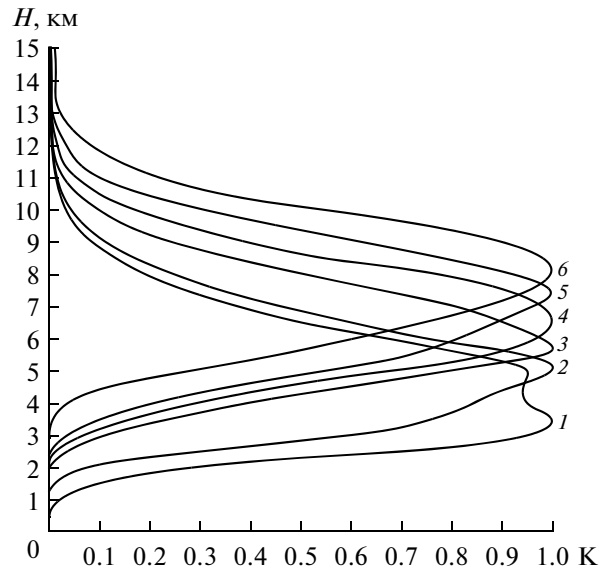


Рис. 2. Весовые функции восходящего излучения атмосферы в линии резонанса водяного пара 325.1 ГГц. Тропическая атмосфера. $T = 300$ К; $R = 19$ г/м³; $W = 41.4$ кг/м². 1 – Частота 325.1 ± 20.0 ГГц, максимум 2.50 км; 2 – частота 325.1 ± 8.0 ГГц, максимум 2.90 км; 3 – частота 325.1 ± 4.0 ГГц, максимум 4.17 км; 4 – частота 325.1 ± 3.1 ГГц, максимум 6.65 км; 5 – частота 325.1 ± 2.4 ГГц, максимум 7.35 км; 6 – частота 325.1 ± 1.0 ГГц, максимум 8.05 км.

Результаты расчета весовых функций восходящего излучения атмосферы в линии 325.1 ГГц приведены на рис. 2. Выбор частот приема осуществлялся по тем же критериям, что и для линии 183 ГГц. Однако диапазон изменения максимумов весовых функций здесь меньше и составляет 3.4–8.05 км при шести уровнях.

Для получения информации о профилях водяного пара на малых высотах проведены расчеты весовых функций восходящего излучения атмосферы вблизи линии резонанса 22.235 ГГц. Традиционно эта линия используется для определения интегральных параметров атмосферы (интегрального содержания водяного пара), поскольку основная масса водяного пара сосредоточена в приповерхностных слоях атмосферы. Результаты этих расчетов приведены на рис. 3. Здесь для частот в окрестности линии максимумы весовых функций приходятся на нулевую высоту, что дает возможность получить информацию о профилях влажности в приповерхностных слоях атмосферы.

Проведенные расчеты говорят о возможности использования резонансной линии водяного пара 183.31 ГГц для измерения вертикальных профилей влажности по семи–восми уровням до высот порядка 9 км. Разрешение на местности с учетом диаграмм направленности современных приемных антенн составляет порядка десятка ки-

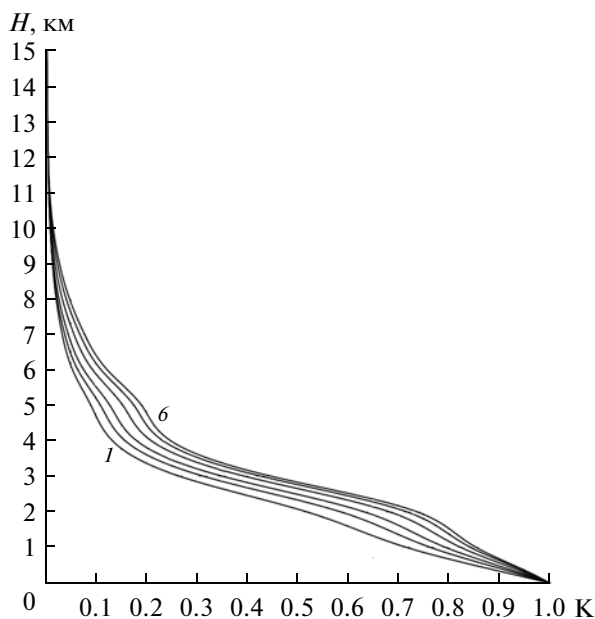


Рис. 3. Весовые функции восходящего излучения атмосферы в линии резонанса водяного пара 22.235 ГГц. Тропическая атмосфера. $T = 300$ К; $R = 19$ г/м³; $W = 41.4$ кг/м². 1 – частота 22.235 ± 3.0 ГГц, максимум 0 км; 2 – частота 22.235 ± 1.5 ГГц, максимум 0 км; 3 – частота 22.235 ± 1.0 ГГц, максимум 0 км; 4 – 22.235 ± 0.6 ГГц, максимум 0 км; 5 – частота 22.235 ± 0.4 ГГц, максимум 0 км; 6 – частота 22.235 ± 0.2 ГГц, максимум 0 км.

лометров. Таким образом, сравнение весовых функций в окрестности линии 183 и 325 ГГц позволяет сделать вывод, что для получения детальных трехмерных полей влажности в атмосфере использование линии 183 ГГц является более предпочтительным. В связи с этим в дальнейшем в работе линия 325 ГГц не рассматривается. Кроме того, информацию о распределении водяного пара на высотах менее 2.5 км можно получить, проведя измерения в окнах прозрачности или (и) в окрестности линии 22.235 ГГц.

СПЕКТРЫ РАДИОТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ АТМОСФЕРА–ОКЕАН

Для изучения процессов, происходящих в системе атмосфера–океан, необходимо знание большого числа различных характеристик этой системы. Прежде всего, это трехмерные температурные поля, представляющие как самостоятельный интерес, так и необходимые для измерения полей влажности. Сюда необходимо отнести данные по интегральной водности и температуре облачности, величине и направлению приповерхностного ветра. Знание этих характеристик необходимо для изучения системы атмосфера–океан, а также для учета взаимного влияния различных метеопараметров на точность проводимых измерений.

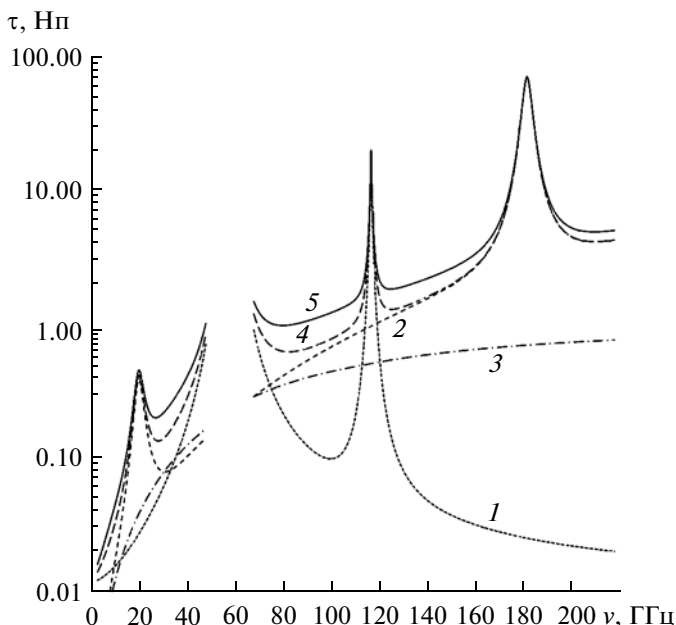


Рис. 4. Интегральное поглощение: 1 – в молекулярном кислороде; 2 – в молекулярном водяном паре; 3 – в облачном слое ($Q = 0.25$ кг/м², $T_Q = 273.3$ К). Суммарное интегральное поглощение: 4 – в безоблачной атмосфере; 5 – в облачной атмосфере. Стандартная тропическая атмосфера. $T = 300$ К; $R = 19$ г/м³; $W = 41.4$ кг/м².

Для этих целей необходимо измерения проводить в широком диапазоне см- и мм-волн. Оценка возможностей использования этого диапазона для измерения метеопараметров может быть получена из спектров радиояркостной температуры системы атмосфера–океан.

Расчет радиояркостных температур атмосферы для восходящего и нисходящего излучения проводился численным интегрированием до высоты 25 км, высота слоя $\Delta h = 50$ м, число слоев $n = 500$:

$$T_{au} = \sum_{i=1}^n \left\{ T(h_i) [1 - \exp(-\gamma(h_i)\Delta h \sec \theta)] \sum_{k=i+1}^n \gamma(h_k)\Delta h \sec \theta \right\},$$

$$T_{ad} = \sum_{i=1}^n \left\{ T(h_i) [1 - \exp(-\gamma(h_i)\Delta h \sec \theta)] \sum_{k=1}^{i-1} \gamma(h_k)\Delta h \sec \theta \right\}.$$

При расчетах использовались та же стандартная тропическая атмосфера, что и при расчетах весовых функций, а также тропическая атмосфера с облачностью. Облачность моделировалась слоем высотой 3 (3–6) км с равномерным распределением водности с водозапасом 0.25 кг/м², тем-

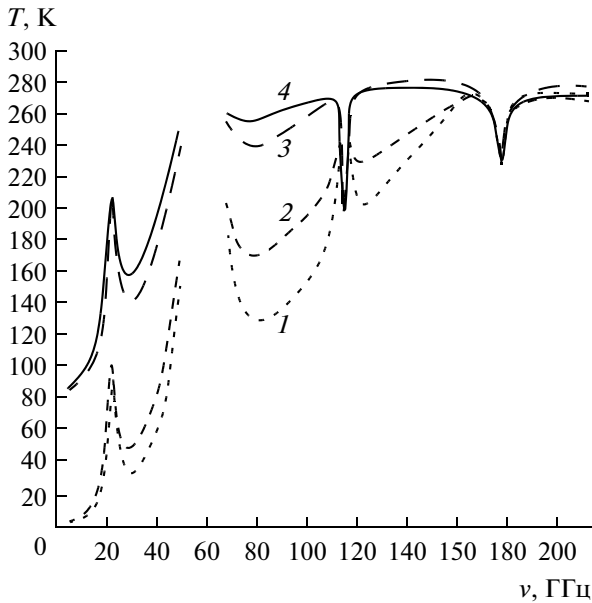


Рис. 5. Радиояркостная температура (горизонтально-поляризованное излучение): 1 – восходящего излучения безоблачной атмосферы; 2 – восходящего излучения облачной атмосферы ($Q = 0.25 \text{ кг/м}^2$, $T_0 = 273.3 \text{ К}$); 3 – системы атмосфера–океан (безоблачная атмосфера); 4 – системы атмосфера–океан (облачная атмосфера, $Q = 0.25 \text{ кг/м}^2$, $T_0 = 273.3 \text{ К}$). Стандартная тропическая атмосфера. $T = 300 \text{ К}$; $R = 19 \text{ г/м}^3$; $W = 41.4 \text{ кг/м}^2$.

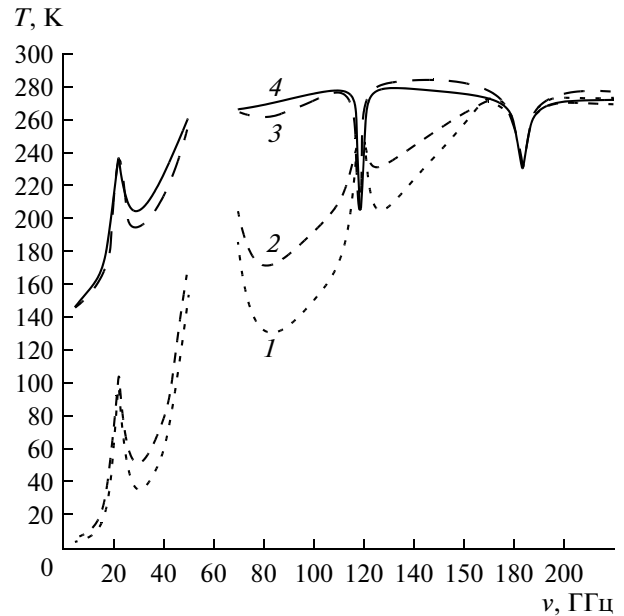


Рис. 6. Радиояркостная температура (вертикально-поляризованное излучение): 1 – восходящего излучения безоблачной атмосферы; 2 – восходящего излучения облачной атмосферы ($Q = 0.25 \text{ кг/м}^2$, $T_0 = 273.3 \text{ К}$); 3 – системы атмосфера–океан (безоблачная атмосфера); 4 – системы атмосфера–океан (облачная атмосфера, $Q = 0.25 \text{ кг/м}^2$, $T_0 = 273.3 \text{ К}$). Стандартная тропическая атмосфера. $T = 300 \text{ К}$; $R = 19 \text{ г/м}^3$; $W = 41.4 \text{ кг/м}^2$.

пература срединного слоя 273.3 К. Температура поверхности океана 300 К, соленость – 40‰, частотный диапазон 5–220 ГГц.

Результаты расчетов спектров интегрального поглощения в молекулярном кислороде, в молекулярном водяном паре, в облачном слое, суммарное интегральное поглощение в безоблачной атмосфере и суммарное интегральное поглощение в облачной атмосфере приведены на рис. 4. Максимальное поглощение водяным паром на частоте 22.235 ГГц составляет 0.393 Нп, а в линии 183.31 ГГц превышает 71 Нп. Поглощение в молекулярном кислороде на частоте 118.75 ГГц составляет 18.8 Нп. Столь большое поглощение вблизи резонансных линий обусловило выбор радиояркостной температуры атмосферного слоя при численных расчетах, пропорциональной $1 - \exp(-\gamma(h_i)\Delta h \sec \theta)$. Интегральное поглощение в безоблачной атмосфере в окне прозрачности 33–37 ГГц составляет 0.144–0.182 Нп; в окне 80–90 ГГц – 0.648–0.677 Нп; в окне 130–150 ГГц – 1.327–1.914 Нп. Поглощение в облачности в соответствующих окнах составляет 0.081–0.099 Нп; 0.343–0.393 Нп и 0.556–0.621 Нп. Это дает значительный вклад в общее интегральное поглощение атмосферы при водозапасе облачного слоя 0.25 кг/м^2 , с увеличением водозапа-

са соответственно возрастает вклад в поглощение облачности.

Результаты расчетов спектров радиояркостных температур восходящего излучения безоблачной и облачной атмосфер, спектров радиояркостных температур системы атмосфера–океан при безоблачной и облачной атмосфере приведены на рис. 5 и 6. На рис. 5 приведены результаты расчетов для горизонтально поляризованного излучения, на рис. 6 – для вертикально поляризованного излучения. Анализ спектров радиояркостных температур излучения системы атмосфера–океан показывает, что для корректного измерения и учета параметров облачности предпочтительно использовать горизонтально поляризованную компоненту излучения. Здесь превышение температуры системы с облачной атмосферой над системой с безоблачной атмосферой в окне прозрачности 33–37 ГГц составляет около 21.5 К, а в окне 80–90 ГГц – 16.8 К, что в 1.64 и 2.43 раза больше, чем для вертикально поляризованного излучения. Измерения в окне 130–150 ГГц мало пригодны для измерения параметров облачности, поскольку изменения составляют 2.5–4 К, и появление облачности приводит к уменьшению радиояркостной температуры системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для восстановления детальных высотных профилей влажности по восьми–десяти уровням до высот 9 км в тропической атмосфере средствами пассивной радиометрии с орбиты ИСЗ предпочтительными являются резонансная линия водяного пара 183.31 ГГц и измерения в окнах прозрачности 80–90, 130–150 ГГц или (и) в окрестностях линии 22.2 ГГц. Для измерения и учета параметров облачности измерения целесообразно проводить в окрестностях линии водяного пара 22.235 ГГц и в окнах прозрачности 33–37 ГГц и 80–90 ГГц. При измерениях радиояркостной температуры системы атмосфера-океан следует использовать горизонтально поляризованную компоненту излучения.

Исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ (проекты № 090501019, 110500493).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 187 с.
- Жевакин С.А.* Полуэмпирическая теория поглощения радиоволн молекулярным кислородом атмосферы. Новые результаты // 2-я Всесоюзная школа-симпозиум по распространению мм- и см-волн в атмосфере. Фрунзе: Илим, 1986. С. 16.
- Жевакин С.А., Наумов А.П.* К расчету коэффициента поглощения в атмосферном кислороде // Радиотехника и электроника. 1965. Т. 10. № 6. С. 987–995.
- Зражевский А.Ю.* Методика расчета поглощения в атмосферных парах воды в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21. № 5. С. 951–957.
- Кузьмин А.В., Поспелов М.Н., Ханин Ю.Б., Шарков Е.А.* Микроволновый сканирующий радиометр-поляриметр нового поколения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 1. С. 238–243.
- Руткевич П.Б., Шарков Е.А.* Физический механизм генезиса вихревых возмущений в сжимаемой и насыщенной водяным паром атмосфере: Препринт ИКИ РАН. М.: ИКИ РАН, 2004. Пр-2102. 11 с.
- Шарков Е.А.* Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
- Clatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A. et al.* Optical properties of the atmosphere. 3rd ed. // Air Force Cambridge Res. Lab. Rep. 1972. P. 108.
- Rutkevich P.B.* Convective and rotational instability in moist air // Physica A. 2002. V. 315. № 1–2. P. 215–221.
- Sharkov E.A.* Remote sensing of tropical regions. Chichester, N.Y., Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: John Wiley & Sons/PRAXIS, 1998. 310 p.
- Sharkov E.A.* Global tropical cyclogenesis. L., Berlin, N.Y., Paris, Singapore, Tokyo: Springer/PRAXIS, 2000. 370 p.
- Sharkov E.A.* Passive microwave remote sensing of the Earth: physical foundations. Berlin, N.Y., L., Paris, Tokyo: Springer/PRAXIS, 2003. 612 p.
- Uspensky A.B., Scherbina G.I.* Derivation of perceptible water from Meteor and NOAA infrared window measurements // Adv. Space Res. 1996. V. 18. № 7. P. 17–20.

Use of Resonance Lines 22.2, 183 and 325 GHz for Retrieval the Detailed Vertical Profiles Water Vapor in Tropical Atmosphere

A. G. Semin¹, A. V. Kuzmin², Yu. B. Khapin², E. A. Sharkov²

¹ State Pedagogical University, Penza

² Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

Paper is considered possibility of the retrieval the detailed profiles water vapor in tropical atmosphere as of satellite measurements radiothermal microwave radiation. Direct problem is analyzed possibility of the retrieval the profile water vapor on 8–10 high-altitude levels before height 10 km with use resonance line absorptions 183 and 325 GHz, as well as use to lines 22.2 GHz. The spectrums of the integral atmosphere absorption, spectrums radio brightness temperature of atmosphere and system atmosphere-ocean within the range of 5–220 GHz are considered. The decision of this problem, certainly, will be important step in study of the physical conditions of the genesis and evolutions tropical cyclones.

Keywords: retrieval water vapor at atmosphere, microwave radiometry, radio brightness temperature