

УДК 551.465+551.521

О СВЯЗИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ В ВОДЯНОМ ПАРЕ АТМОСФЕРЫ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТРОПИЧЕСКИХ УРАГАНОВ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ИХ РАЗВИТИЯ

А. Г. Гранков, А. А. Мильшин, Е. П. Новичихин, Н. К. Шелобанова*

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия

Анализируется временная и пространственная изменчивость измеряемой со спутников яркостной температуры над океаном в частотной области резонансного поглощения в водяном паре атмосферы и влажностных характеристик воздуха, а также их взаимосвязь в районах развития тропических ураганов и их распространения от районов зарождения. Приведены примеры, иллюстрирующие возможность прямого использования яркостной температуры системы океан—атмосфера в данной области диапазона сверхвысоких частот для локализации мест зарождения ураганов, маркировки координат их перемещения в океане и определения скорости распространения без привлечения данных метеорологических наблюдений.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ поведения характеристик атмосферы и океана в зонах активности тропических ураганов на стадиях их зарождения, развития и угасания является актуальной задачей; для этого создана, например, специальная сеть наблюдательных станций в акватории основного и регулярного источника таких ураганов для южного и восточного побережий США — Мексиканском заливе. Спутниковые сверхвысокочастотные (СВЧ) радиометрические методы являются важным инструментом для решения этой задачи благодаря возможностям надёжного определения влажностных характеристик атмосферы в тропических широтах, связанных с большим потенциалом скрытого (латентного) тепла воздуха и его трансформациями на различных стадиях возникновения таких ураганов: от тропической депрессии до тропического шторма и, собственно, урагана [1–6].

В статье рассмотрены возможности использования спутниковых СВЧ радиометрических измерений яркостной температуры (ЯТ) в спектральной области поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы, центрированной относительно резонансной линии 22,235 ГГц (1,35 см) для анализа влажностных характеристик атмосферы в зонах активности тропических ураганов на различных стадиях. Приведены примеры использования спутниковых измерений, иллюстрирующие значимую роль водяного пара атмосферы как количественного индикатора таких процессов, как развитие тропических ураганов на начальных стадиях (тропическая депрессия, тропический шторм), пространственно-временная динамика распространения ураганов в океане и их трансформация.

В работе получила дальнейшее развитие тематика исследований, начатых в ИРЭ РАН в 2008 году в рамках гранта Международного научно-технического центра 03827 «Разработка технологий диагностики зарождения тропических ураганов в океане на основе методов дистанционного зондирования» [1, 2].

* agrankov@inbox.ru

Нами использованы современные глобальные архивы данных об океане и атмосфере в виде спутниковых измерений над океаном, представленные как сеточные значения для квадратов $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ с суточным разрешением, включающие:

1) National Snow & Ice Data Center (NSIDC) — значения ЯТ над акваториями Мирового океана и результаты их тематической обработки;

2) Remote Sensing Systems (RSS) — значения ЯТ и результаты тематической обработки данных измерений радиометров Scanning Sensor Microwave Imager (SSM/I) [7] и Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) [8] спутников DMSP, радиометра Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) [9] спутника EOS Aqua;

3) National Climatic Data Center (NCDC) Hurricane Satellite (HURSAT) Microwave data set — значения ЯТ на частотах 19,350; 22,235; 37,000 и 85,500 ГГц в циклонических областях океана.

Источниками информации о СВЧ излучательных характеристиках поверхности океана и атмосферы в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн служат данные многолетних измерений 7-канальным 4-частотным радиометром SSM/I и SSMIS метеорологических спутников DMSP и 12-канальным 6-частотным радиометром AMSR-E океанографического спутника EOS Aqua, обеспечивающими глобальный обзор Земли за трое суток, а неполный — за сутки.

Привлечены архивные материалы преимущественно для наиболее сильных в истории наблюдений ураганов, достигших наивысших 4-й и 5-й категорий по шкале Саффира—Симпсона (Saffir—Simpson), что позволило получить отчётливые представления о динамике их метеорологических и СВЧ излучательных характеристик на различных стадиях развития.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЦИКЛОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПО СПУТНИКОВЫМ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

При наблюдении со спутника для расчёта СВЧ излучательных характеристик системы океан—атмосфера используется плоскостная модель, согласно которой яркостная температура при наблюдении в надир с высоты H складывается из трёх компонент [10]:

$$T^b = T_1^b + T_2^b + T_3^b, \quad (1)$$

где $T_1^b = T_s^b \exp(-\tau)$ — ЯТ излучения поверхности океана, ослабленного атмосферой, а величина T_s^b пропорциональна коэффициенту излучения водной поверхности κ и её термодинамической температуре T_s ($T_s^b = \kappa T_s$);

$$T_2^b = \int_0^H T_a(h) \exp[\tau(h) - \tau(H)] dh$$

— ЯТ восходящего излучения атмосферы;

$$T_3^b = \exp[-\tau(H)] R \int_0^H T_a(h) \exp[-\tau(h)] dh$$

— ЯТ нисходящего излучения атмосферы, переотражённого водной поверхностью; $T_a(z)$ — термодинамическая температура атмосферы на уровне z ;

$$\tau(h) = \int_0^h \gamma(h') dh'$$

— интегральное поглощение излучения в атмосфере, определяемое погонным поглощением γ и толщиной слоя z , отсчитываемого от поверхности океана ($z = 0$); R — коэффициент отражения нисходящего излучения атмосферы от водной поверхности.

Модель (1) легко распространяется на случай наблюдения поверхности океана под произвольным углом θ с помощью корректирующего множителя $\sec\theta$, учитывающего влияние оптической толщины атмосферы на интегральное поглощение τ .

Коэффициенты излучения κ и отражения R зависят от термодинамической температуры поверхности океана и от степени её шероховатости и интенсивности пенообразований, которые связаны со скоростью приводного ветра. Яркостная температура прямой и отражённой компонент излучения атмосферы на сантиметровых и миллиметровых волнах определяется поглощением радиоизлучения в водяном паре и молекулярном кислороде атмосферы, которое зависит от температуры и влажности воздуха и характеристик их вертикальных распределений, а также от водозапаса облаков и интенсивности осадков [10]. В дальнейшем модель (1) получила развитие в статье [11], где благодаря значительному объёму накопленных натурных данных об излучательных характеристиках системы океан—атмосфера в различных гидрометеорологических условиях была обоснована возможность её использования в широком диапазоне изменения скорости приводного ветра, водозапаса облаков и интенсивности осадков.

2. ДИНАМИКА ВЛАЖНОСТНЫХ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УРАГАНОВ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ

Исходным материалом для данного раздела послужили синоптические истории возникновения и развития тропических ураганов 5-й категории «Чарли» (Charley), «Катрина» (Katrina) и «Рита» (Rita) [12–14].

Ураган «Чарли» зародился в августе 2004 года в Атлантике, набрал силу в Карибском море и Мексиканском заливе и впоследствии достигнул полуостровов Флорида [12].

На основе ежесуточных усреднённых по квадратам $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ данных об общем влагосодержании атмосферы из архива NSIDC, полученных по измерениям спутников EOS Aqua, построены его зависимости от времени для различных точек траектории урагана «Чарли» на ранних стадиях его развития в Карибском море — тропической депрессии и морского шторма (см. рис. 1). Из рис. 1 видно, что на каждой из этих стадий наблюдается сильное увеличение общего содержания водяного пара.

Значения яркостной температуры, измеряемые со спутников в частотной области поглощения излучения в водяном паре атмосферы, благодаря их тесной связи с влажностными характеристиками атмосферы также могут служить количественными характеристиками тропических образований на начальных стадиях. На рис. 2а и б показаны примеры прямого использования спутниковых измерений на длине волны 1,35 см для обнаружения (локализации) тропических образований на стадиях зарождения: «Катрина» (Katrina) в районе Багамских островов ($21,5^\circ \div 25,0^\circ$ с. ш., $73,5^\circ \div 76,0^\circ$ з. д. в августе 2005 года) [13] и «Рита» (Rita) в Карибском море ($20,5^\circ \div 23,5^\circ$ с. ш., $69,0^\circ \div 71,5^\circ$ з. д. в сентябре 2005 года) [14].

Представленные результаты получены на основе данных глобального обзора Мирового океана радиометрами SSM/I спутников DMSP F13, F14 и F15 (архив HURSAT).

Тропическое образование «Умберто», зародившееся в сентябре 2007 года в Мексиканском заливе в районе расположения буйковой станции NOAA 42019 ($27,9^\circ$ с. ш., $95,35^\circ$ з. д.), выделяется в ряду других благодаря рекордной скорости его интенсификации до стадии урагана, например увеличению скорости приводного ветра с 25 до 80 морских узлов в течение 24 ч (12–13 сентября 2007 года) [15].

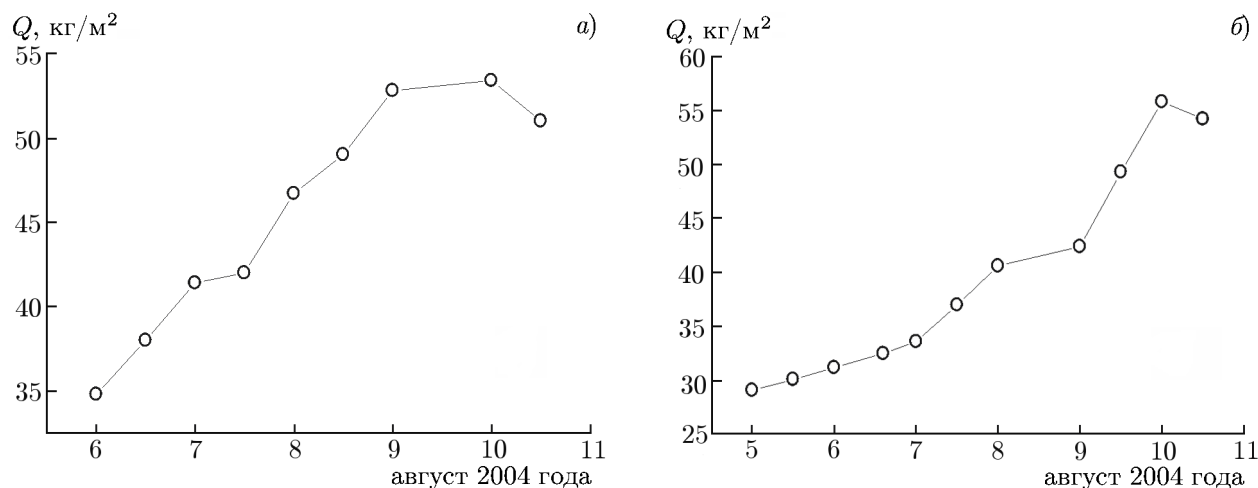


Рис. 1. Приращение общего содержания водяного пара в атмосфере Q при развитии урагана «Чарли» по данным радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua: *a* — на стадии тропической депрессии (в точке траектории урагана $12,2^\circ$ с. ш., $63,2^\circ$ з. д.); *б* — на стадии морского шторма (в точке $15,6^\circ$ с. ш., $71,8^\circ$ з. д.)

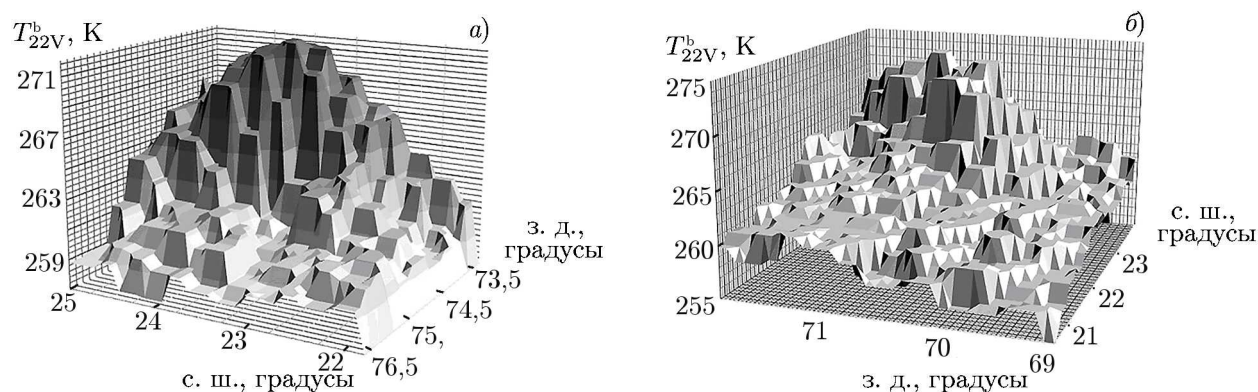
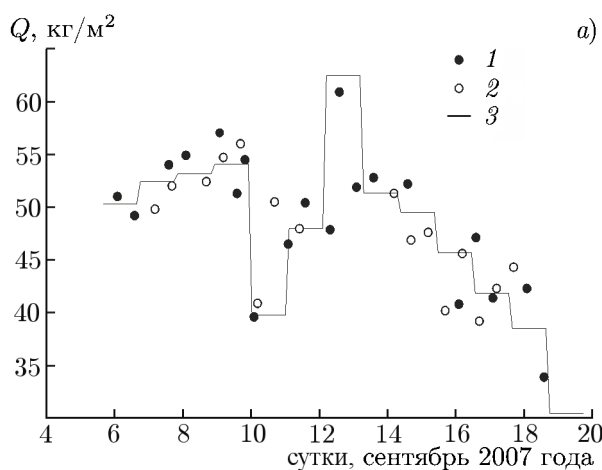


Рис. 2. Пространственное распределение яркостной температуры системы океан—атмосфера канала 22V (22,235 ГГц, вертикальная поляризация) радиометра SSM/I в области зарождения тропических ураганов «Катрина» (*a*) и «Рита» (*б*) на стадии тропической депрессии 23 августа и 18 сентября 2005 года соответственно

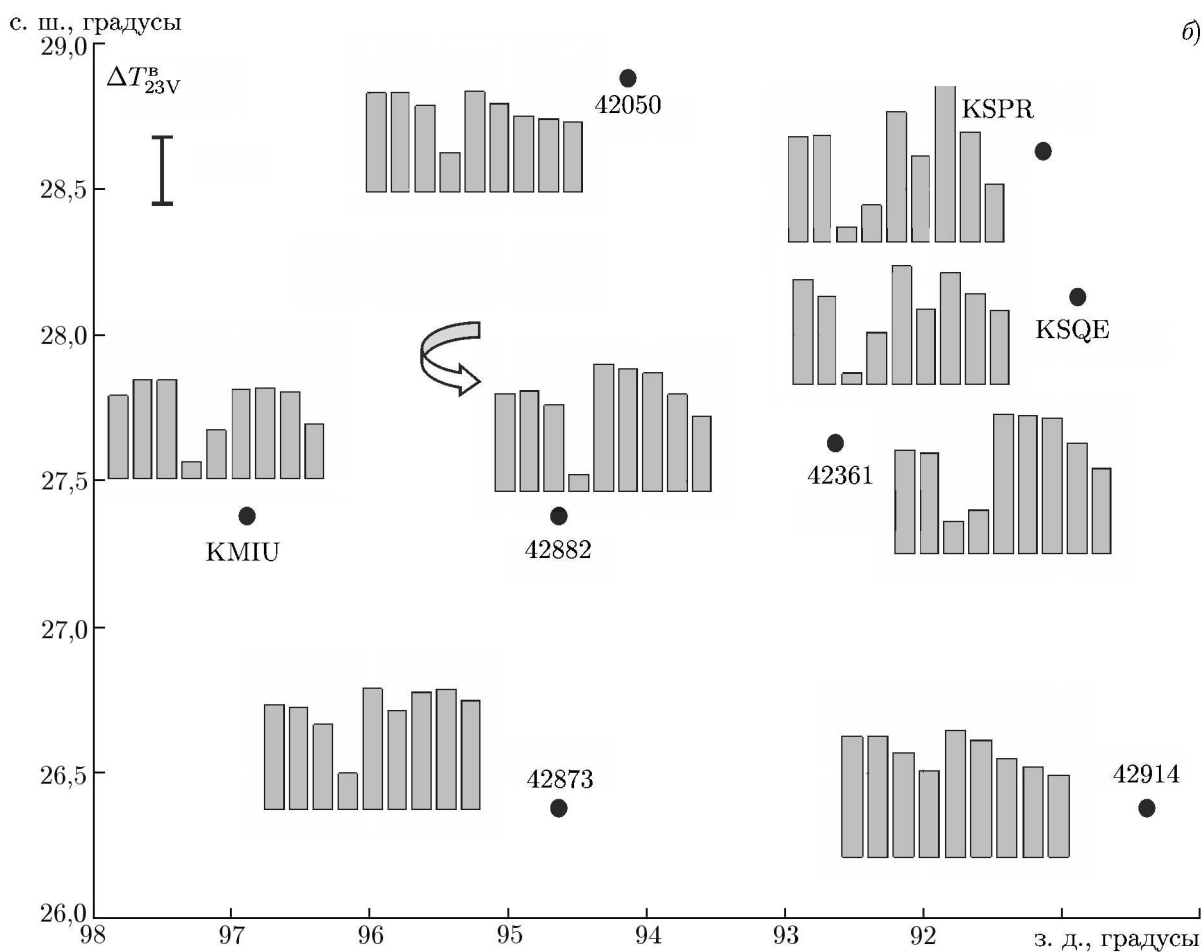
С помощью измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua и радиометра SSMIS спутника F17 DMSP получены оценки вариаций общего содержания водяного пара атмосферы в период, предшествующий зарождению тропического образования «Умберто», его развитию до стадии урагана и ухода из данной области Мексиканского залива (см. рис. 3*a*). Из рис. 3*a* следует, что развитие «Умберто» в период 12–13 сентября отмечается заметным всплеском общего содержания атмосферного водяного пара на фоне всей синоптической истории процесса.

Результаты измерений временной динамики яркостной температуры в частотной области поглощения радиоизлучения в водяном паре атмосферы для ряда буйковых станций наблюдательной сети NOAA, расположенных в окрестности станции 42019, указывают на возможность существования кооперативного эффекта в формировании тропического урагана «Умберто» (см. рис. 3*б*).

Наблюдается отклик ЯТ системы океан—атмосфера на длине волны 1,26 см на зарождение тропического урагана «Умберто» в областях Мексиканского залива, находящихся на значитель-



а) Рис. 3. (а) Вариации общего влагосодержания атмосферы Q в районе станции 42019 во время зарождения тропического урагана «Умберто», определённые по данным радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua (архив RSS; маркеры 1); радиометра SSMIS спутника F17 (архив RSS; маркеры 2); радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua (архив NSIDC; линия 3). (б) Вариации яркостной температуры системы океан—атмосфера по данным радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua на длине волны 1,26 см (на вертикальной поляризации) в период 7–15 сентября 2007 года в районах расположения ближайших к очагу зарождения урагана «Умберто» (отмечен стрелкой) станций NDBC



ном удалении (до нескольких сотен километров) от его очага, где отмечается одновременно резкое снижение ЯТ перед зарождением урагана (10–11 сентября) и последующее её возрастание (11–12 сентября). Это может служить предпосылкой для разработки методов прогнозирования местоположения очагов и времени возникновения тропических ураганов, основанных на локализации источников тепловой энергии в циклонических районах по данным спутниковых СВЧ радиометрических измерений [16].

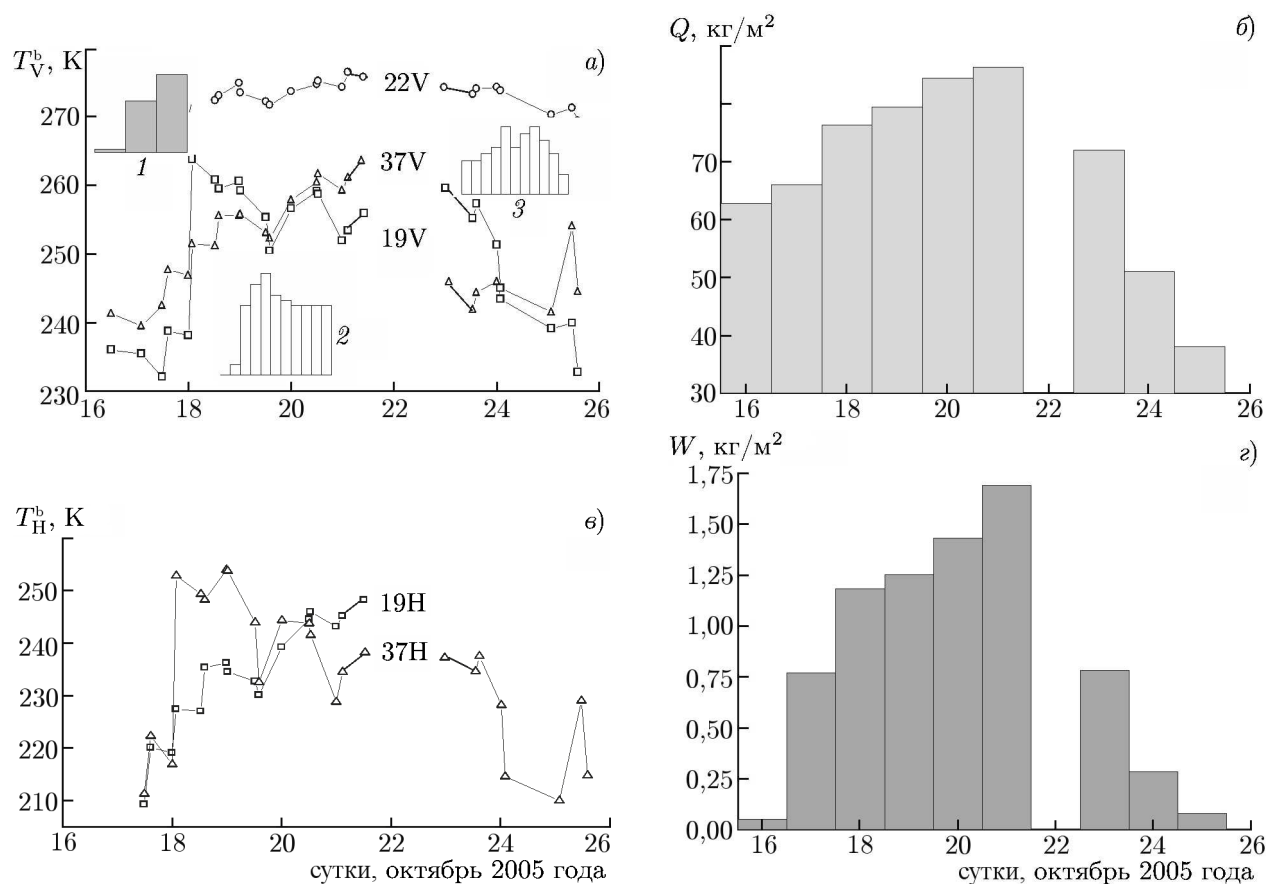


Рис. 4. Вариации яркостной температуры системы океан—атмосфера на вертикальной (а) и горизонтальной (е) поляризациях в каналах радиометров SSM/I 22V, 19V, 37V, 37H и 19H, среднесуточных значений общего содержания водяного пара в атмосфере (б) и водозапаса облаков (з) вдоль пути перемещения тропического образования «Вильма»

3. ТРАНСФОРМАЦИЯ ВЛАЖНОСТНЫХ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УРАГАНОВ ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ

Выполнен анализ трансформации влажностных и СВЧ излучательных характеристик в процессе развития и распространения тропического урагана 5-й категории «Вильма» (Wilma), сформировавшегося в октябре 2005 года над Карибским морем [17]:

1) яркостной температуры на длинах волн 1,35 см (22,235 ГГц), 1,55 см (19,35 ГГц), 0,81 см (37,0 ГГц) на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях (соответствуют каналам 22V, 19VH и 37VH радиометров SSM/I спутников DMSP F13, F14, F15; архив HURSAT);

2) общего содержания водяного пара в атмосфере (влажностного содержания атмосферы) и жидкокапельной влаги в облаках (водозапаса облаков) по данным измерений радиометра AMSR-E (архив NSIDC).

На рис. 4 приведены вариации яркостной температуры системы океан—атмосфера, общего содержания водяного пара в атмосфере и водозапаса облаков в течение существования тропического образования «Вильма». Участки графиков на рис. 4а с наиболее сильными возмущениями яркостной температуры сопровождаются встроенными диаграммами 1, 2 и 3, иллюстрирующими скачки общего водозапаса облаков от 0,04 до 1,10 кг/м² 16–17 октября (1); скорости ветра от 65 до 160 морских узлов 19–21 октября (2); скорости ветра от 60 до 110 морских узлов 23–25 октября

(3). Значения скорости ветра взяты из синоптической истории урагана «Вильма» [17].

Пропуски измерений ЯТ за 16 и частично 17 октября для каналов 37Н и 19Н радиометра SSM/I, а также за 22 октября для канала 19Н обусловлены отсутствием данных в архиве HURSAT для указанных промежутков времени из-за влияния подсвета радиоизлучения Солнца и внешних радиопомех [18] вследствие высокой отражательной способности поверхности океана на горизонтальной поляризации. Кроме того, из рассмотрения исключены данные спутниковых измерений за 21–22 октября, когда орбиты спутников пересекали участок суши (побережье Мексики).

Из рис. 4 следует, что переход тропического образования «Вильма» из стадии тропической депрессии в стадию тропического шторма сопровождается монотонным ростом содержания водяного пара в атмосфере (рис. 4б) и резким скачком общего водозапаса облаков (рис. 4г). Наблюдается возрастание ЯТ во всех радиометрических каналах в период 17–21 октября по мере трансформации тропического образования «Вильма» из стадии тропической депрессии в стадию тропического шторма и урагана в Карибском море, затем — снижение ЯТ до прежних значений (22–25 октября) в Мексиканском заливе.

Диаграмма 1 на рис. 4а позволяет объяснить причину нарастания ЯТ на стадии тропической депрессии урагана резким усилением интегрального водозапаса облаков 16–17 октября. Из данных, приведённых на диаграммах 2 и 3, становится видимым фактор, обуславливающий провалы ЯТ в периоды пика урагана (19–20 октября) и его ослабления (23–24 октября), — усиление ветра, которое приводит к увеличению интенсивности волнения и пенообразований на поверхности океана и, как следствие, снижению её отражательной способности и уменьшению компоненты переотражённого излучения атмосферы.

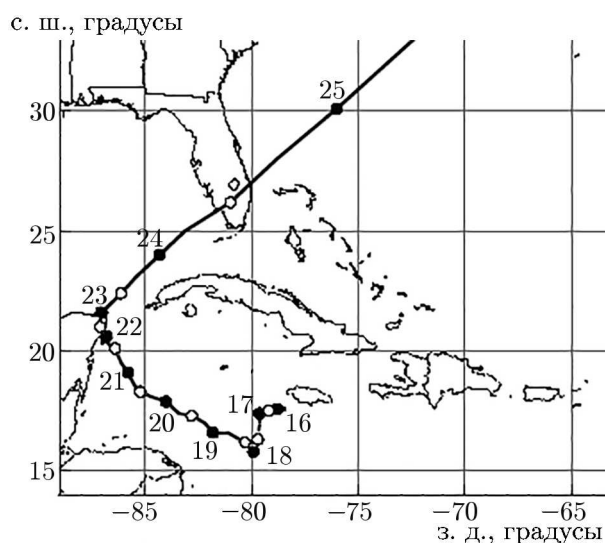


Рис. 5. Траектория распространения урагана «Вильма» от района зарождения; числа — сутки октября 2005 года [17]

Исследована связь динамики распространения тропических ураганов с пространственно-временной изменчивостью общего содержания водяного пара в атмосфере. Результаты демонстрируются на примере урагана «Вильма», сформировавшегося в октябре 2005 года над Карибским морем, развернувшегося у юго-восточного побережья Южной Америки в сторону Мексиканского залива, пересёкшего полуостров Флорида, продолжившего свой путь в водах Северной Атлантики вдоль восточного побережья США и потерявшего свою силу у Новой Шотландии (см. рис. 5). Маркером распространения урагана «Вильма» может служить величина общего содержания водяного пара в атмосфере вдоль его трассы, определённая по данным AMSR-E спутника EOS Aqua (суточные значения, усреднённые по квадратам $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ из архива NSIDC; см. рис. 6).

Из рис. 6 видно, что появление урагана «Вильма» в той или иной области Мексиканского залива сопровождается всплеском влагосодержания атмосферы: на $35 \div 40$ кг/м² в точке¹ а Карибского моря (18 октября, 00 ч), на $45 \div 50$ кг/м² в точке б Карибского моря (21 октября, 00 ч), на $60 \div 65$ кг/м² в точке в Мексиканского залива (24 октября, 00 ч).

Вследствие того, что пиковые значения влагосодержания атмосферы соответствуют времени

¹ Точки а, б и в соответствуют координатам, указанным в подписи к рис. 6а, б и в.

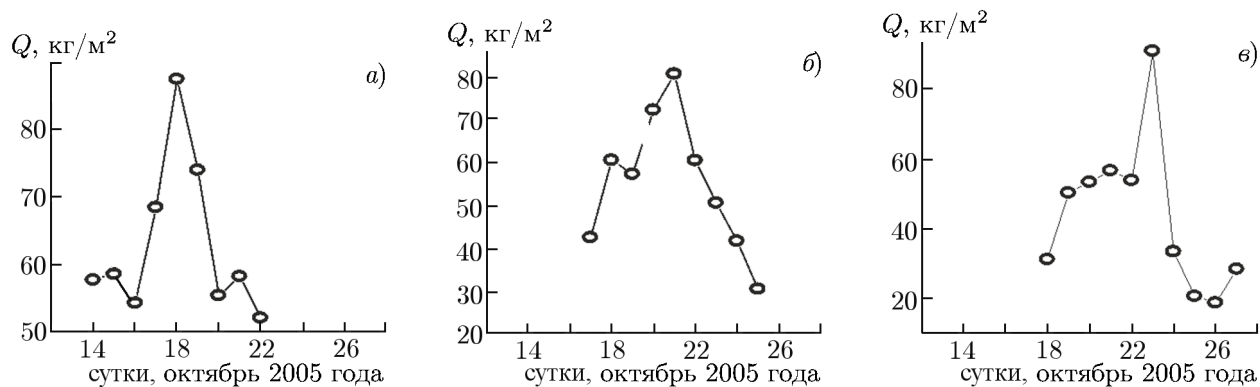


Рис. 6. Вариации общего влагосодержания водяного пара в атмосфере по данным измерений радиометра AMSR-E на трассе распространения урагана «Вильма» в Карибском море и Мексиканском заливе в точках: $15,8^\circ$ с. ш., $79,9^\circ$ з. д. (а); $19,1^\circ$ с. ш., $85,8^\circ$ з. д. (б); $24,0^\circ$ с. ш., $84,3^\circ$ з. д. (в)

прохождения урагана через ту или иную область океана, можно приближённо оценивать скорость переноса водяного пара вдоль траектории его распространения. Из рис. 5 следует, например, что эта величина составляет для урагана «Вильма» в период 18–24 октября 2005 года около 300 км/сут.

Данные о пространственно-временной изменчивости ЯТ системы океан—атмосфера в частотной области резонансного поглощения излучения в водяном паре атмосферы позволяют судить не только о скорости нарастания интенсивности урагана «Вильма» вдоль трассы его распространения от района зарождения, но и о динамике расширения размеров охваченных им территорий (рис. 7). Каналы 19V и 19H радиометра SSM/I этой области СВЧ диапазона обладают высокой чувствительностью не только к влагосодержанию атмосферы, но и к скорости приводного ветра, величина которого кратно увеличивается в процессе формирования ураганов.

Рисунок 7 демонстрирует пространственно-временную изменчивость ЯТ системы океан—атмосфера, измеренной каналом 19V радиометра SSM/I, в виде её поперечных (широтных) разрезов в области распространения тропического образования «Вильма» от очага зарождения до трансформации из стадии тропической депрессии (15 октября 2005 года) в ураган наивысшей силы (19–20 октября 2005 года).

Из приведённых результатов видно, что переход тропического образования «Вильма» из одной стадии в другую сопровождается ростом ЯТ T_{19V}^b от 20 до $50 \div 55$ К. В этот период наблюдается также расширение активности урагана по изменчивости ЯТ на различных разрезах от $1,0^\circ$ до $4,3^\circ$ (от 110 до 475 км), которые могут характеризовать горизонтальные размеры урагана.

4. РЕАКЦИЯ СИСТЕМЫ ОКЕАН—АТМОСФЕРА НА ПРИБЛИЖЕНИЕ ТРОПИЧЕСКИХ УРАГАНОВ

Изучение возмущений характеристик поверхности океана и атмосферы, обусловленных приближением ураганов, на наш взгляд, может быть полезным при поиске факторов, влияющих на зарождение циклонических областей. Рассмотрим результаты анализа изменчивости влагосодержания атмосферы и ЯТ системы океан—атмосфера по данным измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua (архив RSS) накануне прихода тропического урагана «Катрина» в районе станции SMKf1 (Sombrero Key) во Флоридском проливе Мексиканского залива ($24,38^\circ$ с. ш., $81,07^\circ$ з. д.).

Обнаружен эффект тепловой «накачки» атмосферы (т. е. аккумуляции скрытого тепла) в ат-

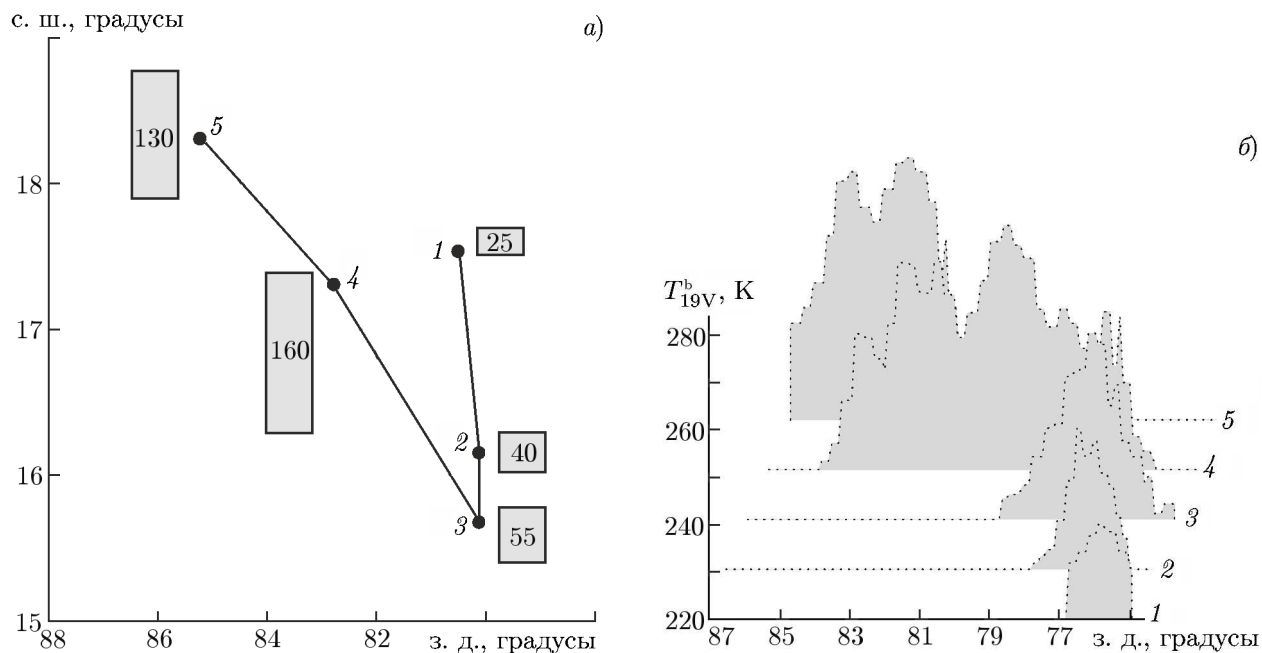


Рис. 7. (а) Траектория и временная динамика распространения и трансформации урагана «Вильма» над Карибским морем в октябре 2005 года на стадиях: тропической депрессии (1); тропического шторма (2, 3) и урагана (4, 5). Числа в прямоугольниках — скорость ветра в морских узлах [17]. (б) Пространственные разрезы ЯТ, измеренной спутниками DMSP F13, F14, F15 в канале 19V радиометра SSM/I вдоль траектории распространения и трансформации урагана «Вильма» на различных стадиях; 1 — 15 октября, 23:18; 2 — 17 октября, 14:29; 3 — 18 октября, 01:40; 4 — 19 октября, 12:14; 5 — 20 октября, 12:34

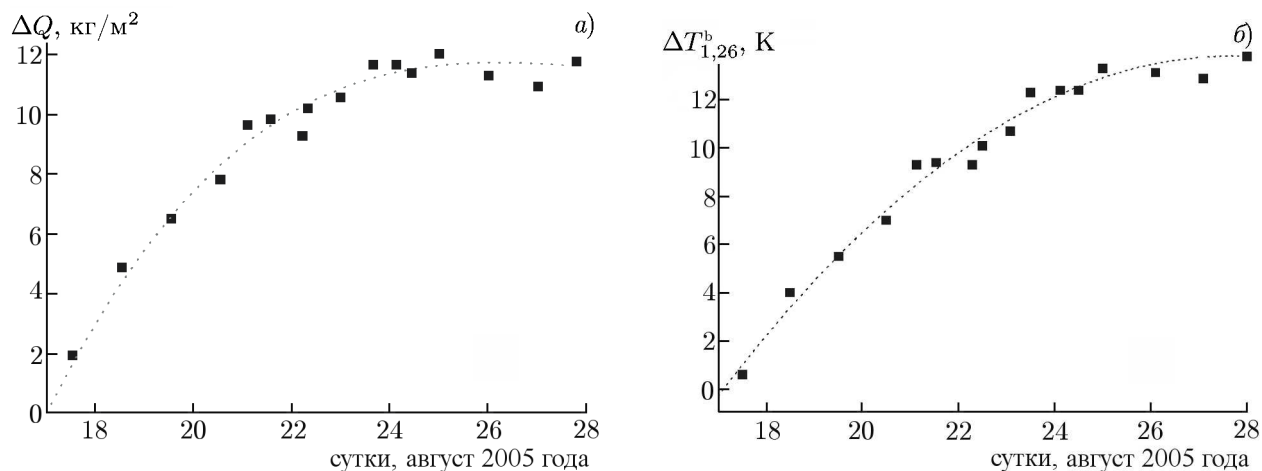


Рис. 8. (а) Вариации общего влагосодержания атмосферы (а) и ЯТ на длине волны 1,26 см (вертикальная поляризация; б) в период приближения урагана «Катрина» к станции SMKF1. Пунктирные линии — аппроксимации экспериментальных результатов полиномами 2-й степени

молекулярном водяном паре в период, предшествующий приближению урагана «Катрина» к станции SMKF1, который выражается в постоянном нарастании значений общего содержания водяного пара в атмосфере, а также ЯТ системы океан—атмосфера на длине волны 1,26 см на вертикальной поляризации (канал 23V радиометра AMSR-E; см. рис. 8).

Из рис. 7 следует, что в период, предшествующий приходу урагана «Катрина» в район станции

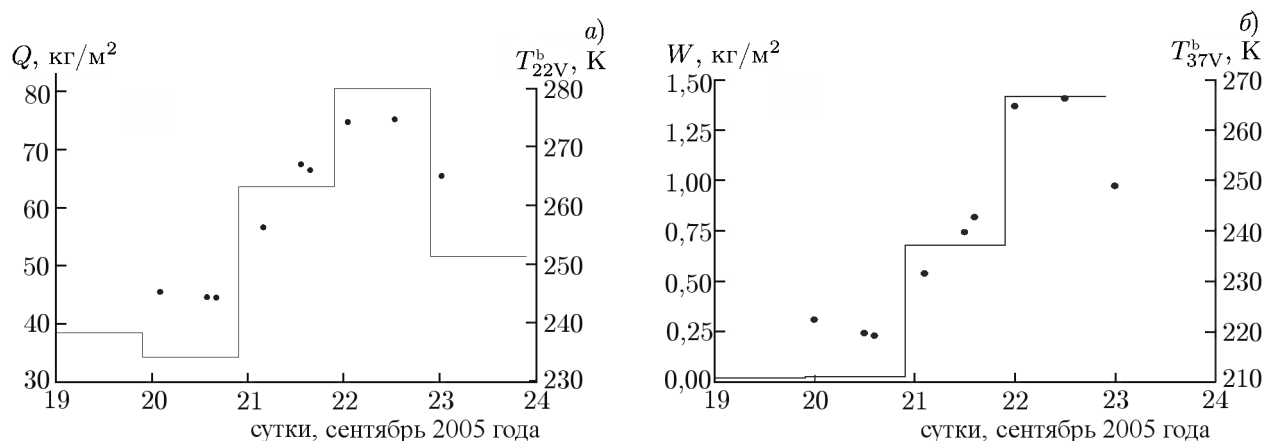


Рис. 9. (а) Реакция метеопараметров атмосферы и ЯТ системы океан—атмосфера на приближение урагана «Рита» в точке $24,8^\circ$ с. ш., $87,6^\circ$ з. д. его траектории в виде вариаций общего влагосодержания атмосферы Q и ЯТ T_{22V}^b на частоте 22,235 ГГц (а), интегрального водозапаса облаков W и ЯТ T_{37V}^b на частоте 37 ГГц (б)

SMKF1, наблюдается постепенное нарастание содержания водяного пара в атмосфере — параметра Q — на 11 кг/м^2 (рис. 8а) и ЯТ T^b системы океан—атмосфера на длине волны 1,26 см (рис. 8б) на 13 К.

Замеченный эффект подтверждается другим примером, иллюстрирующим реакцию общего влагосодержания атмосферы, интегрального водозапаса облаков и ЯТ системы океан—атмосфера на приближение урагана 5-й категории «Рита» к области Мексиканского залива в сентябре 2005 года, где он достиг наивысшей силы — максимальных значений данных параметров (см. рис. 9). Здесь использованы данные архива HURSAT — значения ЯТ, измеренные радиометрами SSM/I спутников DMSP F13, F14 и F15, а также оценки общего влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков по данным измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua из архива NSIDC. В течение двух суток, предшествующих прохождению урагана «Рита» через данную область Мексиканского залива, здесь наблюдается сильный рост общего содержания водяного пара в атмосфере и водозапаса облаков и, ожидаемо, ЯТ в участках СВЧ диапазона, соответствующих её максимальной чувствительности к вариациям данных параметров.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Яркая температура в частотной области поглощения собственного СВЧ излучения в водяном паре атмосферы несёт информацию о влажностных характеристиках атмосферы в зонах активности тропических ураганов на различных стадиях их возникновения, развития и распространения.

Спутниковый мониторинг пространственно-временной изменчивости общего содержания водяного пара в атмосфере в районах активности тропических ураганов позволяет анализировать интенсивность их нарастания на начальных стадиях. Водяной пар атмосферы может служить маркером для определения траектории ураганов и границ их распространения на близлежащие акватории океана.

Показана возможность оценивания скорости переноса водяного пара (и, следовательно, теплового «заряда» атмосферы в виде скрытого тепла) вдоль траектории распространения ураганов по картине пространственно-временной динамики общего влагосодержания атмосферы либо яркостной температуры системы океан—атмосфера в частотной области резонансного поглощения

собственного СВЧ излучения системы в водяном паре атмосферы.

Замечен эффект тепловой «накачки» атмосферы (т. е. аккумуляции скрытого тепла в атмосферном водяном паре) в спокойных (невозмущённых) областях океана при приближении к ним ураганов, который выражается в постоянном нарастании общего влагосодержания атмосферы, а также яркостной температуры. Учёт данного эффекта может оказаться полезным при разработке методов прогнозирования темпов и сроков приближения тропических ураганов к той или иной области океана (побережья), где их появление регулярно и ожидаемо.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гранков А. Г., Мильшин А. А., Новичихин Е. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 10. С. 711–725.
2. Гранков А. Г., Мильшин А. А., Новичихин Е. П. Радиоизлучение системы океан—атмосфера в её энергоактивных зонах. Рига : Lambert Academic Publishing, 2016. 314 с.
3. Гранков А. Г., Мильшин А. А. // Земля и Вселенная. 2019. № 1. С. 48–61. <https://doi.org/10.7868/S0044394819010043>
4. Шарков Е. А., Шрамков Я. Н., Покровская И. В. // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 73–82.
5. Ермаков Д. М., Шарков Е. А., Чернушич А. П. // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 4. С. 3–15. <https://doi.org/10.7868/s0205961414040046>
6. Ермаков Д. М., Чернушич А. П., Шарков Е. А., Покровская И. В. // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 47–56.
7. Hollinger P. H., Peirce J. L., Poe G. A. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1990. V. 28, No. 5. P. 781–790. <https://doi.org/10.1109/36.58964>
8. Kunee D. B., Poe G. A., Boucher D. J., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2008. V. 46, No. 4. P. 863–883. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.917980>
9. Kawanishi T., Sezai T., Ito Y., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. V. 41, No. 2. P. 184–194. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.808331>
10. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М. : Наука, 1974. 188 с.
11. Wentz F. J. // J. Geophys. Res. 1983. V. 88, No. C3. P. 1892–1908. <https://doi.org/10.1029/JC088iC03p01892>
12. Pasch R. J., Brown D. P., Blake E. S. Tropical Cyclone Report: Hurricane Charley, 9–14 August 2004. Miami : National Hurricane Center, 2004. 23 p.
13. Knabb R. D., Rhome J. R., Brown D. P. Tropical Cyclone Report: Hurricane Katrina, 23–30 August 2005. Miami : National Hurricane Center, 2005. 43 p.
14. Knabb R. D., Brown D. P., Rhome J. R. Tropical Cyclone Report: Hurricane Rita, 18–26 September 2005. Miami : National Hurricane Center, 2006. 33 p.
15. Blake E. S. Tropical Cyclone Report: Hurricane Humberto, 12–14 September 2007. Miami : National Hurricane Center, 2007. 16 p.
16. Гранков А. Г. // Докл. РНТОРЭС им. А. С. Попова. Серия: Инженерная экология. Вып. 13. 5–7 декабря 2017 г., Москва. С. 47–51.
17. Pasch R. J., Blake E. S., Cobb III H. D., Roberts D. P. Tropical Cyclone Report: Hurricane Wilma, 15–25 October 2005. Miami : National Hurricane Center, 2006. 27 p.

18. RSS Technical Document 07032014SSMI. RSS SSM/I Version-7 Brightness Temperature Data Set, netCDF File Format Specification / Remote Sensing Systems. 2014. 7 p. remss.com

Поступила в редакцию 12 сентября 2019 г.; принята в печать 17 марта 2020 г.

**ON THE RELATION BETWEEN RADIO EMISSION IN THE FREQUENCY
REGION OF ABSORPTION IN ATMOSPHERIC WATER VAPOR
AND THE CHARACTERISTICS OF TROPICAL HURRICANES
AT VARIOUS STAGES OF THEIR DEVELOPMENT**

A. G. Grankov, A. A. Milshin, E. P. Novichikhin, and N. K. Shelobanova

We analyze the temporal and spatial variability of the satellite-measured brightness temperature above the ocean in the frequency range of resonance absorption in the atmospheric water vapor and the humidity characteristics of air and their interrelation in the regions of the development of tropical hurricanes and their propagation away from the initiation areas. The examples illustrating the possibility of direct usage of the brightness temperature of the ocean-atmosphere system in this region of the microwave range for localizing the hurricane-initiation areas, marking the coordinates of their travel in the ocean, and determining the propagation velocity without employing the meteorological-observation data are given.