

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 551.465;551.521

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ
СВЧ-ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ
ПРИ РАЗВИТИИ ТРОПИЧЕСКИХ УРАГАНОВ

© 2020 г. А. Г. Гранков^{а,*}, А. А. Мильшин^а, Е. П. Новичихин^а, Н. К. Шелобанова^а

^аФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

*E-mail: agrankov@inbox.ru

Поступила в редакцию 12.08.2019 г.

После доработки 20.04.2020 г.

Принята к публикации 25.04.2020 г.

Приведены примеры использования данных спутниковых радиометрических СВЧ-измерений для анализа влагосодержания атмосферы при развитии тропических ураганов на начальных стадиях и распространении от районов зарождения, реакции системы океан–атмосфера на их приближение. Показана роль водяного пара атмосферы как количественного индикатора этих процессов.

DOI: 10.31857/S003384942009003X

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря наличию сильной спектральной линии 1.35 см (22.235 ГГц) резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы ее общее влагосодержание (ОВА) относится к числу параметров, жестко связанных с измеряемой с ИСЗ интенсивностью собственного СВЧ-излучения (яркостной температурой) системы океан–атмосфера (СОА).

Эффективность использования данного участка СВЧ-диапазона для оценки динамики ОВА и ее связи с тепловыми и излучательными СВЧ-характеристиками СОА подтверждена результатами совместного анализа данных метеорологических и аэрологических измерений в циклонических зонах Северной Атлантики, полученными в ходе судовых экспериментов НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90 и данных синхронных измерений радиометра SSM/I спутника DMSP F08 [1, 2]. Выявлена чувствительность ОВА и яркостной температуры СОА на длине волны 1.35 см к появлению и развитию среднеширотных атлантических циклонов и четкая взаимосвязь с их важными энергетическими характеристиками – вертикальными турбулентными потоками явного и скрытого (латентного) тепла на поверхности океана и теплосодержанием (энтальпией) атмосферного пограничного слоя.

В последние годы появился ряд публикаций, свидетельствующих об актуализации темы использования спутниковых радиометрических СВЧ-методов для анализа роли атмосферного водяного пара

в генезисе и развитии циклонов в тропических широтах океана – тропических ураганов (ТУ) [3–7]. Так, в [3, 4] исследована связь спутниковых СВЧ-радиометрических оценок ОВА с тропическим циклогенезом в акваториях Мирового океана, в [5] рассмотрена роль тропосферных адвективных потоков скрытого тепла, сосредоточенного в водяном паре, в интенсификации ТУ, в [6, 7] показана возможность оценивания скорости переноса водяного пара и локализации источников тепловой энергии с помощью радиометрических СВЧ-методов.

В данной работе рассмотрены возможности использования данных спутниковых измерений яркостной температуры СОА в спектральной области поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы для оценки динамики ОВА в зонах активности ТУ. Приведены примеры, показывающие роль водяного пара атмосферы как количественного индикатора развития тропических образований на начальных стадиях (тропическая депрессия, тропический шторм), пространственно-временной динамики распространения ураганов в океане и их трансформации, а также реакции СОА на приближение ТУ. Полученные результаты могут служить основой для построения простых методов, позволяющих проводить экспресс-анализ динамики ТУ, не требующих привлечения трудоемких вычислительных процедур и больших массивов спутниковых данных.

В работе получила дальнейшее развитие тематика исследований, начатых в ИРЭ РАН в 2008 г. в рамках гранта МНТЦ 03827 “Разработка техно-

логий диагностики зарождения тропических ураганов в океане на основе методов дистанционно-зондирования”.

Источниками информации об излучательных СВЧ-характеристиках поверхности океана и атмосферы в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн здесь служат данные многолетних измерений семиканальным четырехчастотным радиометром SSM/I (Scanning Sensor Microwave Imager [8]) метеорологических спутников DMSP и 12-канальным шестичастотным радиометром AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer [9]) океанографического спутника EOS Aqua, обеспечивающими полный обзор Земли за трое суток, а неполный – за одни сутки.

Нами использованы современные архивы данных спутниковых измерений над Мировым океаном:

– NSIDC (National Snow & Ice Data Center) – значения яркостной температуры и результаты тематической обработки данных измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua;

– RSS (Remote Sensing Systems) – результаты тематической обработки данных измерений радиометров SSM/I и SSMIS спутников DMSP, радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua;

– HURSAT (данные National Climatic Data Center) – значения яркостной температуры, измеренные радиометрами SSM/I спутников DMSP в циклонически активных областях океана.

Данные измерений представлены в виде сеточных значений для квадратов $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ с сеточным разрешением. Привлечены архивные материалы для ряда наиболее сильных в истории наблюдений ураганов, достигших наивысших, 4-й и 5-й категорий по шкале Саффира–Симпсона, что позволило получить отчетливые представления о динамике и взаимосвязи метеорологических и СВЧ-излучательных характеристик на различных стадиях развития ТУ.

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

При наблюдении с ИСЗ для расчета излучательных характеристик СОА используется плоскостная модель излучения, согласно которой яркостная температура (ЯТ) T^a при наблюдении в надир с высоты H складывается из трех компонентов [10]:

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

где

$$T_1^a = T_n^a \exp(-\tau)$$

– ЯТ излучения поверхности океана, ослабленного атмосферой (величина T_n^a пропорциональна коэффициенту излучения водной поверхности k и ее термодинамической температуре T_n ($T_n^a = kT_n$)),

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

– ЯТ восходящего излучения атмосферы;

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

– ЯТ нисходящего излучения атмосферы, переотраженного водной поверхностью; $T_a(h)$ – термодинамическая температура атмосферы на уровне h ;

$\tau(h) = \int_0^h \gamma(h') dh'$ – интегральное поглощение излучения в атмосфере, определяемое погонным поглощением γ_Σ и толщиной слоя h' отсчитываемого от поверхности океана ($h' = 0$); 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 .

Коэффициент излучения k и коэффициент отражения R зависят от термодинамической температуры его поверхности и от степени ее шероховатости и интенсивности пенообразования, которые связаны со скоростью приводного ветра. Яркостная температура прямой и отраженной компонент атмосферы на сантиметровых и миллиметровых волнах определяется поглощением радиоволн в водяном паре и молекулярном кислороде атмосферы, которое зависит от температуры и влажности воздуха и характеристик их вертикального распределения, а также от водозапаса облаков и интенсивности осадков [10]. В дальнейшем модель (1) получила развитие в работе [11], где благодаря значительному объему накопленных натуральных данных об излучательных характеристиках СОА в различных гидрометеорологических условиях была обоснована возможность ее использования в широком диапазоне изменения скорости приводного ветра, водозапаса облаков и интенсивности осадков.

Водяной пар, в котором сосредоточена значительная часть тепловой энергии атмосферы, играет важную роль в ее тепловом взаимодействии с поверхностью океана как физическая субстанция, а его общее влагосодержание, тесно связанное с яркостной температурой СОА в спектральной линии 1.35 см и ее окрестности, чувствительно к тепловым процессам в так называемых энергоактивных зонах океана (штормовых зонах, фронталь-

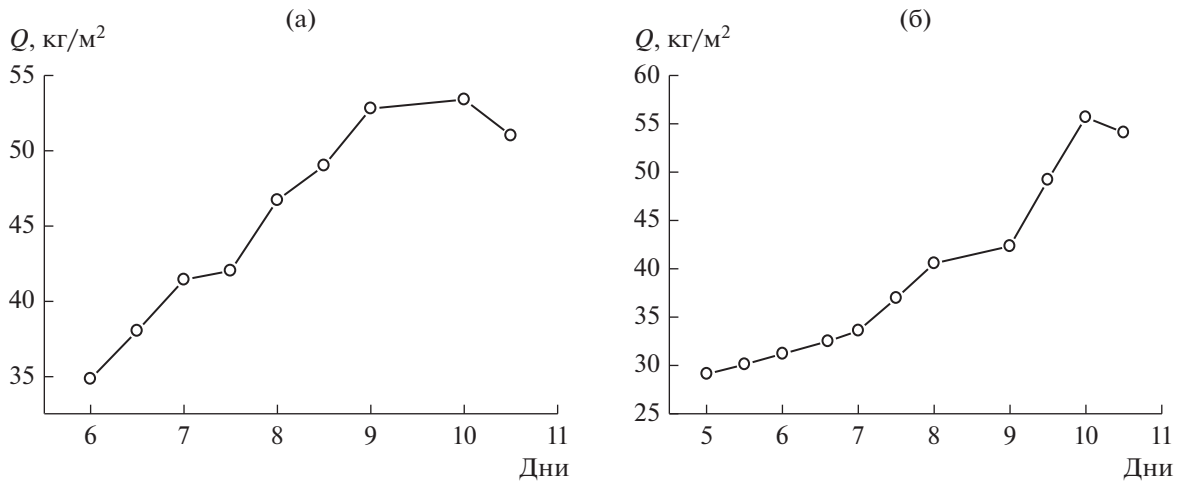


Рис. 1. Рост величины ОВА при развитии урагана Charley по данным радиометра AMSR-E (август 2004 г.): а – на стадии тропической депрессии (в точке траектории урагана 12.2° с.ш., 63.2° з.д.); б – на стадии морского шторма (в точке 15.6° с.ш., 71.8° з.д.).

ных зонах, зонах смешения теплых и холодных течений), в том числе и его циклонических областях [1, 2, 12].

В дальнейшем в центре нашего внимания будет находиться изменчивость именно этой характеристики атмосферы на различных стадиях зарождения, распространения и трансформации тропических образований (от тропической депрессии до тропического шторма и урагана).

2. РАЗВИТИЕ ТРОПИЧЕСКИХ УРАГАНОВ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ

Исходным материалом для данного раздела послужили синоптические истории возникновения и развития ТУ Charley и Katrina [13, 14].

Ураган Charley зародился в августе 2004 г. в Атлантике, набрал силу в Карибском море и Мексиканском заливе и впоследствии обрушился на полуостров Флорида [13].

Выполнен анализ временной изменчивости общего влагосодержания атмосферы на начальных стадиях развития урагана Charley. Были проанализированы ежесуточные, усредненные по квадратам $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ данные об ОВА (архив NSIDC), полученные с помощью радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua. На их основе были построены зависимости величины ОВА от времени для различных точек траектории урагана Charley в Карибском море на стадиях тропической депрессии и морского шторма (рис. 1). Как видно из рисунка, развитие урагана Charley на каждой стадии сопровождается нарастанием общего содержания водяного пара.

Сами значения ЯТ, измеряемые со спутников в спектральной 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. 2 представлен пример прямого использования спутниковых измерений в спектральной области резонансного поглощения собственного излучения СОА в водяном паре атмосферы для обнаружения на ранней стадии (тропическая депрессия) ТУ Katrina в районе Багамских островов 21.5°...25° с.ш., 73.5°...76° з.д. в августе 2005 г. Представленные результаты получены на основе данных глобального обзора Мирового океана радиометрами SSM/I спутников DMSP F13, F14, F15 на длине волны 1.35 см (архив HURSAT).

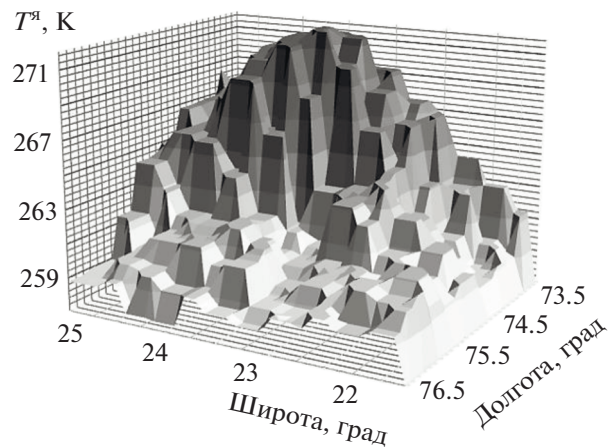


Рис. 2. Яркостная температура СОА, измеренная каналом радиометра SSM/I (22.235 ГГц, вертикальная поляризация) в области зарождения урагана Katrina 23 августа 2005 г.

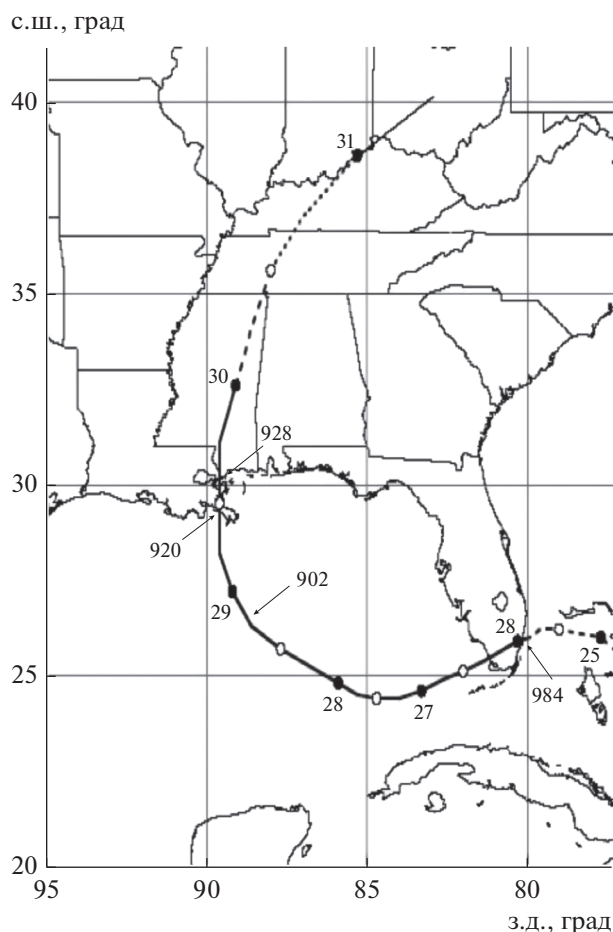


Рис. 3. Траектория распространения урагана Katrina от района его зарождения: цифры около темных точек – дни августа 2005 г. [14]. Светлые точки – полуденные часы суток. Цифры на стрелках – атмосферное давление в миллибарах.

Рисунок демонстрирует возможность пространственной локализации тропического образования Katrina на стадии тропической депрессии по данным измерений яркостной температуры COA на длине волны 1.35 см.

3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ТРОПИЧЕСКИХ УРАГАНОВ

Исследована связь динамики распространения и трансформации ТУ с пространственно-временной изменчивостью следующих характеристик COA:

– яркостная температура в спектральной области поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы на длинах волн 1.26 см (23.8 ГГц) и 1.6 см (18.7 ГГц) на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях (соответствуют каналам 23V, 23H и 18V, 18H радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua);

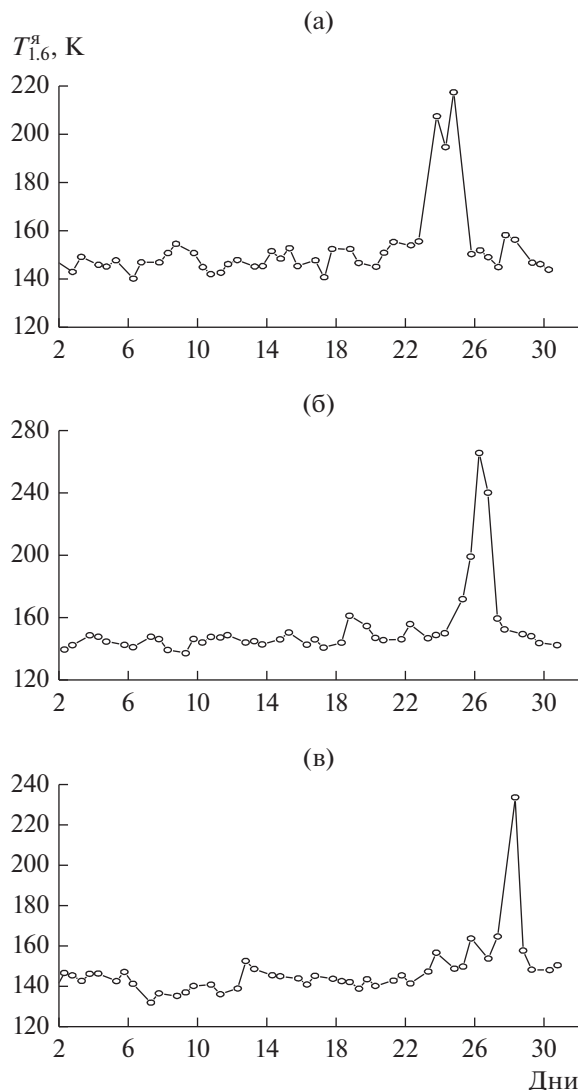


Рис. 4. Вариации ЯТ на длине волны 1.6 см на горизонтальной поляризации в различных точках урагана Katrina, измеренные в августе 2005 (архив NSIDC): а – 26° с.ш., 78° з.д., б – 25° с.ш., 83° з.д., в – 27° с.ш., 89° з.д. [15].

– общее содержание водяного пара в атмосфере (результаты обработки данных измерений радиометра AMSR-E).

Каналы радиометра AMSR-E 18V и 18H обладают высокой чувствительностью не только к влагосодержанию атмосферы, но и к скорости приводного ветра, величина которого кратно увеличивается в процессе формирования ураганов.

Выполнен анализ пространственно-временной изменчивости ЯТ, измеренной каналом 18H радиометра AMSR-E в Мексиканском заливе вдоль трассы распространения урагана Katrina от района его зарождения (Багамские острова) к южному побережью США (штат Луизиана) в период 24–30 августа 2005 г. (см. рис. 3), а его результаты представлены на рис. 4.

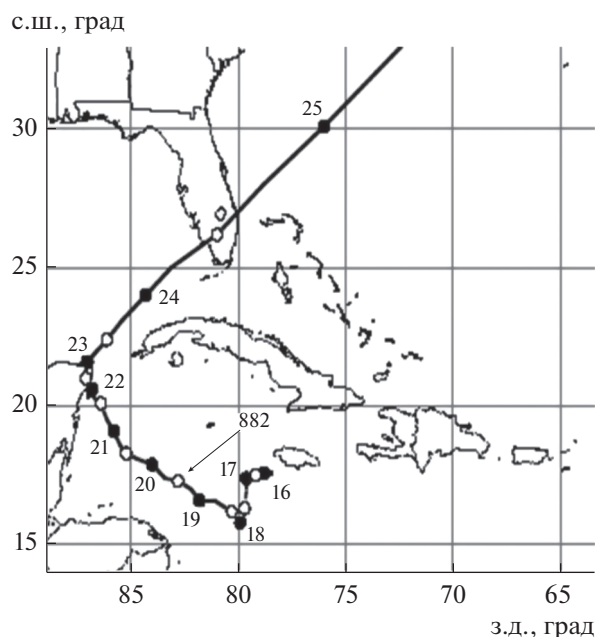


Рис. 5. Траектория распространения урагана Wilma от очага его зарождения: цифры около темных точек – дни октября 2005 г. [16]. Светлые точки – полуденные часы суток. Цифра на стрелке – атмосферное давление в миллибарах.

Появление урагана Katrina в той или иной области Мексиканского залива сопровождалось резким всплеском ЯТ на длине волны 1.6 см на горизонтальной поляризации (до 100...120 К 27–28 августа), природа которых объясняется нарастанием водяного пара в атмосфере в моменты времени прихода циклона, а также усилением скорости приводного ветра. На длине волны 1.26 см, где яркостные контрасты СОА меньше зависят от состояния поверхности океана и обусловлены преимущественно вариациями ОВА, пиковые значения ЯТ вдвое меньше.

Были проанализированы также данные, полученные для ТУ Wilma, сформировавшегося в октябре 2005 г. над Карибским морем, развернувшегося у юго-восточного побережья Южной Америки в сторону Мексиканского залива, пересекшего полуостров Флорида, продолжившего свой путь в водах Северной Атлантики вдоль восточного побережья США и потерявшего силу у Новой Шотландии (рис. 5), а результаты представлены на рис. 6. В этом случае маркером распространения урагана Wilma является величина ОВА, определенная по данным AMSR-E спутника EOS Aqua (суточные значения, усредненные по квадратам $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, архив NSIDC).

Из рис. 6 видно, что появление урагана Wilma в той или иной области Мексиканского залива сопровождается всплеском ОВА: на 35...40 кг/м² (Карибское море, 18 октября 00 ч) (рис. 6а), на

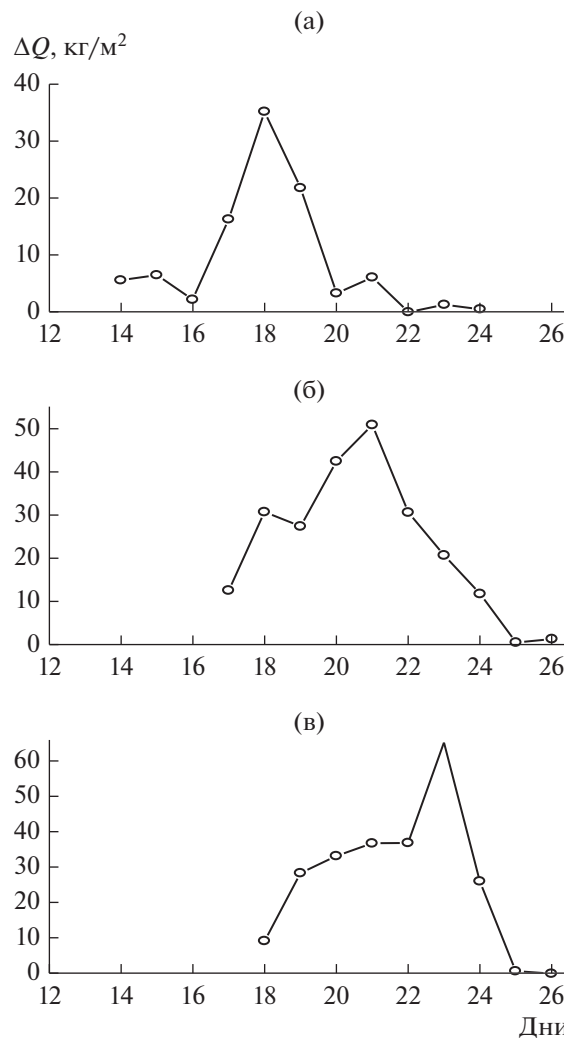


Рис. 6. Вариации ОВА по данным измерений радиометра AMSR-E в октябре 2005 г. (архив NSIDC) на трассе распространения урагана Wilma в Карибском море и Мексиканском заливе: а – 15.8° с.ш., 79.9° з.д., б – 19.1° с.ш., 85.8° з.д., в – 24° с.ш., 84.3° з.д.

45...50 кг/м² (Карибское море, 21 октября 00 ч) (рис. 6б), на 60...65 кг/м² (Мексиканский залив, 24 октября 00 ч) (рис. 6в).

Приведенные на рис. 5 и 6 результаты позволяют качественно проиллюстрировать пространственно-временную динамику ОВА и получить приближенные оценки скорости переноса водяного пара вдоль траектории распространения ТУ. Из данных иллюстраций следует, например, что эта величина составляет для урагана Wilma в период 18–24 октября 2005 г. около 300 км/сут. Подобные оценки можно получить и на основе данных о временном положении пиков ЯТ в спектральной области поглощения собственного СВЧ-излучения СОА в водяном паре атмосферы. Например, из приведенных на рис. 3, 4 результа-

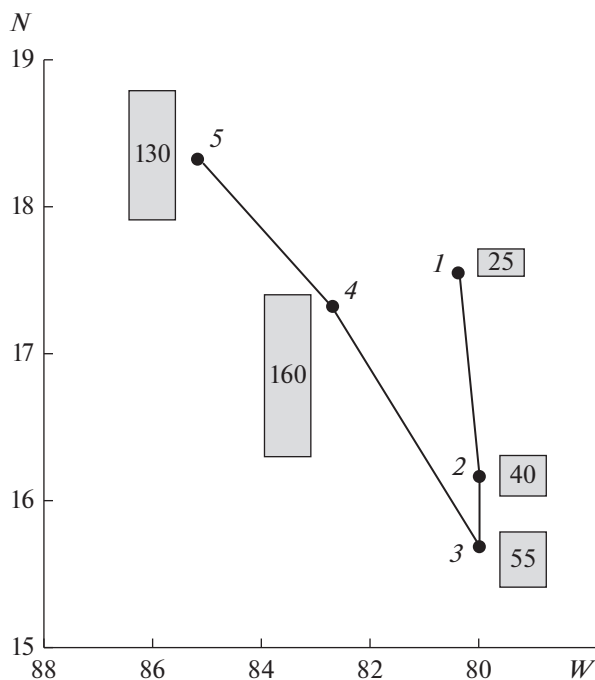


Рис. 7. Траектория и временная динамика распространения и трансформации урагана Wilma над Карибским морем в октябре 2005 г. на различных стадиях: тропическая депрессия (1); тропический шторм (2, 3), ураган (4, 5), в прямоугольниках обозначена скорость ветра в морских узлах [16].

тов следует, что скорость переноса водяного пара вдоль траектории урагана Katrina составляет около 350 км/сут в период 25–27 августа 2005 г. и около 650 км/сут 27–29 августа 2005 г. Более точные оценки скорости переноса атмосферного водяного пара требуют привлечения более обширных массивов спутниковых данных и реализуются с помощью специальных вычислительных процедур [6].

Данные о пространственно-временном распределении интенсивности собственного СВЧ-излучения COA в области резонансного поглощения излучения в водяном паре атмосферы позволяют судить не только о скорости нарастания интенсивности урагана Wilma вдоль трассы его распространения от района зарождения, но и о динамике расширения размеров охваченных им областей (рис. 7, 8). На рис. 8 иллюстрируется пространственно-временная изменчивость поля яркостной температуры COA, измеренной каналом 19V радиометра SSM/I в виде его поперечных (меридиональных) разрезов в области распространения тропического образования Wilma от очага зарождения и его трансформации из стадии тропической депрессии (15 октября 2005 г.) до урагана наивысшей силы (19–20 октября 2005 г.).

Из приведенных результатов видно, что переход тропического образования Wilma из одной

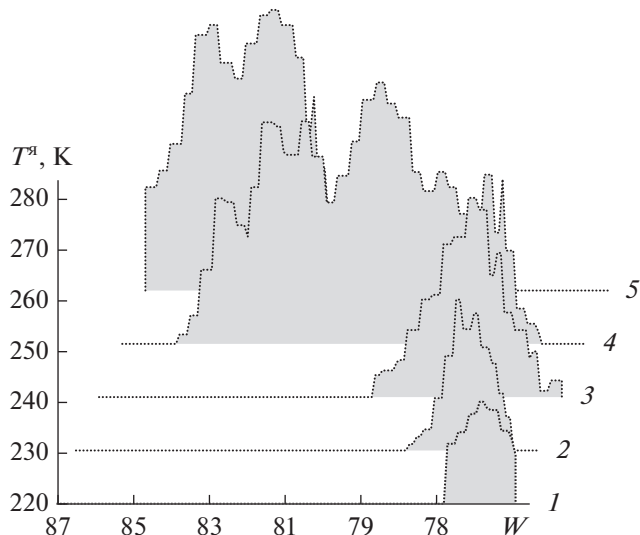


Рис. 8. Пространственные разрезы ЯТ в меридиональном поясе 80°–87° з.д., измеренной спутниками DMSP в канале радиометра SSM/I (19.35 ГГц, вертикальная поляризация) (архив HURSAT) вдоль трассы распространения и трансформации урагана Wilma на различных стадиях: 1 – 15 окт., 23 ч 18 мин; 2 – 17 окт., 14 ч 29 мин, 3 – 18 окт., 1 ч 40 мин, 4 – 19 окт., 12 ч 14 мин, 5 – 20 окт., 12 ч 34 мин.

стадии в другую сопровождается ростом яркостной температуры T_{18V}^a от 20 до 50...55 К.

В этот период наблюдается также увеличение горизонтальных размеров урагана (судя по яркостным разрезам) от 1 до 4.3 град (от 110 до 475 км).

4. РЕАКЦИЯ СИСТЕМЫ ОКЕАН–АТМОСФЕРА НА ПРИБЛИЖЕНИЕ ТРОПИЧЕСКИХ УРАГАНОВ

Изучение возмущений характеристик поверхности океана и атмосферы, обусловленных приближением ураганов может полезным, на наш взгляд, при поиске факторов, влияющих на зарождение циклонических областей.

Здесь рассмотрим результаты анализа изменчивости влагосодержания атмосферы и яркостной температуры COA по данным измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua (архивы RSS) накануне прихода ТУ Katrina в районе станции SMKf1 (Sombrero Key) во Флоридском проливе Мексиканского залива (24.38° с.ш., 81.07° з.д.).

Наблюдается эффект аккумуляции водяного пара в атмосфере в период времени, предшествующий приближению урагана Katrina к станции SMKf1, который выражается в постоянном нарастании значений ОВА, а также яркостной температуры COA на длине волны 1.26 см на вертикальной поляризации (канал 18V радиометра AMSR-E) (рис. 9). Аналогичный эффект отмеча-

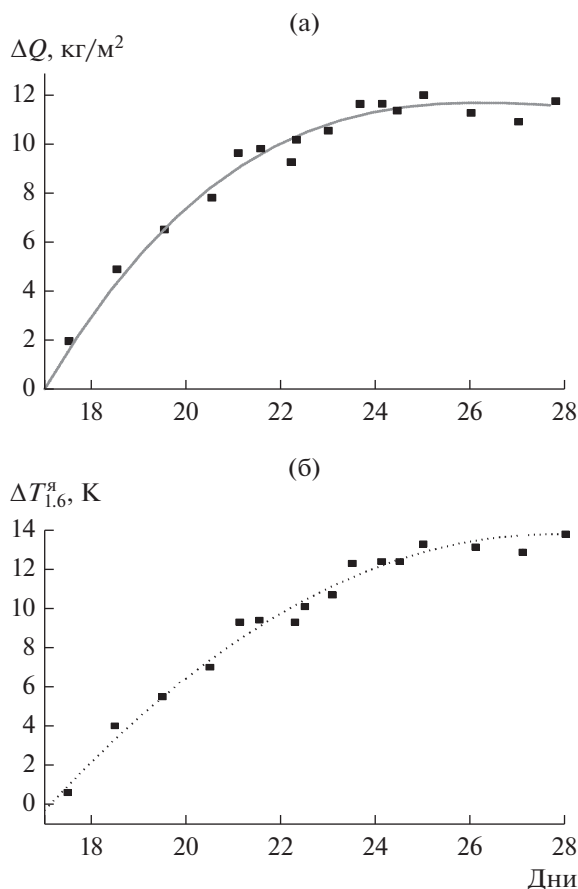


Рис. 9. Приращения общего влагосодержания атмосферы (а) и яркостной температуры СОА на длине волны 1.26 см (вертикальная поляризация) (б) в период приближения урагана Katrina к станции SMKF1; пунктирные линии – аппроксимации оригинальных результатов полиномами 2-й степени [12].

ется и авторами [7], исследовавшими энергетические источники интенсификации ТУ Katrina на основе данных спутниковых радиометрических СВЧ-измерений.

Из рис. 9 следует, что в период времени, предшествующий приходу урагана Katrina в район станции SMKF1, наблюдается монотонное возрастание ОВА – параметр Q увеличивается на 11 кг/м² (рис. 9а), а ЯТ СОА на длине волны 1.26 см – на 13 К (рис. 9б).

Следует отметить, что результаты спутниковых и наземных радиометрических СВЧ-исследований временной динамики ОВА, проведенных в Голубой бухте Черного моря, указывают также на существование эффекта накопления водяного пара в атмосфере в предштормовых ситуациях, т.е. в периоды, предшествующие приходу интенсивных морских штормов [2, 12].

Учет 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спутниковый мониторинг пространственно-временной изменчивости общего содержания водяного пара в атмосфере в районах активности тропических ураганов указывает на его тесную связь с процессами нарастания и развития тропических ураганов на различных стадиях.

Анализ данных измерений яркостной температуры СОА радиометров SSM/I спутника DMSP и AMSR-E спутника EOS Aqua в области резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы в районах активности тропических ураганов Wilma, Katrina, Charley свидетельствует о возможности использования общего влагосодержания атмосферы в качестве маркера для определения траектории распространения ураганов в океане, а также для оценки границ их влияния на близлежащие акватории.

Данный подход, основанный на наличии прямых, физически обусловленных связей между общим влагосодержанием атмосферы и яркостной температурой системы океан–атмосфера, не требуя привлечения больших массивов спутниковой информации и трудоемких вычислительных процедур и не претендуя на высокую точность количественных оценок, открывает перспективы выработки инструментария для экспресс-анализа развития тропических ураганов и качественного прогноза их эволюции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан–атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.: Физматлит, 2004.
2. Гранков А.Г., Маречек С.В., Мильшин А.А. и др. // Журн. радиоэлектроники. 2013. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/9/text.pdf>.
3. Покровская И.В., Шарков Е.А. // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 6. С. 18.
4. Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В. // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 73.
5. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 4. С. 3.
6. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P. // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives. 2015. V. 40. № 7/W3. P. 179.
7. Ермаков Д.М., Чернушич А.В., Шарков Е.А., Покровская И.В. // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 47.

8. Hollinger P.H., Peirce J.L., Poe G.A. // IEEE Trans. 1990. V. GRS-28. № 5. P. 781.
9. Kawanishi T., Sezai T., Ito et al. // IEEE Trans. 2003. V. GRS-41. № 48. P. 173.
10. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974.
11. Wentz F.J. // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. № С3. P. 1892.
12. Grankov A.G., Marechek S.V., Milshin A.A. et al. Advances in Hurricane Research. Modelling, Meteorology, Preparedness and Impacts / Ed. by K. Hickey. Rieka: InTech Publ. House. 2012. P. 23.
13. Pasch R.J., Daniel P., Brown D.P., Blake E.S. // Tropical cyclone report: Hurricane Charley, 9–14 August 2004. Miami: National Hurricane Center, 18 October 2004 (Revised 15 September 2011).
14. Knabb R.D., Rhome J.R., Brown D.P. // Tropical cyclone report: Hurricane Katrina 23–30 August 2005. Miami: National Hurricane Center, 20 December 2005.
15. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Новичихин Е.П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. № 10. С. 711.
16. 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, 12 January 2006.