

# **ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ В ЗОНАХ ЗАРОЖДЕНИЯ, РАЗВИТИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ УРАГАНОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

д.ф.-м.н. Гранков А.Г., с.н.с. Мильшин А.А., к-ф.м.н. Новичихин Е.П., вед. спец. Шелобанова Н.К.

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Приведены примеры использования данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений для исследования развития тропических ураганов на стадиях тропической депрессии и морского шторма, а также анализа пространственно-временной динамики их распространения в океане и трансформации. Иллюстрируется роль водяного пара атмосферы как количественного индикатора этих процессов.

## **Содержание работы**

Рассмотрены возможности использования данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений интенсивности излучения (яркостной температуры) СОА (ЯТ) в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн для анализа влажностных характеристик атмосферы в зонах активности тропических ураганов.

Приведены примеры использования данных измерений спутниковых средств, иллюстрирующие значимую роль водяного пара атмосферы как количественного индикатора в таких процессах как развитие тропических ураганов на начальных стадиях (тропическая депрессия, тропический шторм), пространственно-временной динамики распространения ураганов в океане и их трансформации. В работе получила дальнейшее развитие тематика исследований, начатых в ИРЭ РАН в 2008 г. в рамках гранта МНТЦ 03827 "Разработке технологий диагностики зарождения тропических ураганов в океане на основе методов дистанционного зондирования" [1, 2].

Нами использованы современные глобальные архивы данных об океане и атмосфере:

- MSFC (Marshall Space Flight Center) – значения ЯТ над акваториями Мирового океана и результаты их тематической обработки (параметров СОА), привязанные к орбитам спутников (режим swath – просеки земного глобуса);

- NSIDC (National Snow & Ice Data Center) – значения ЯТ над акваториями Мирового океана и результатов их тематической обработки, представленные в виде сеточных значений для квадратов  $0.25 \times 0.25^\circ$  с суточным разрешением (режим gridded);

- NCDC (National Climatic Data Center) – значения ЯТ и результатов их тематической обработки в циклонически активных областях океана, представленные в виде сеточных значений для квадратов  $0.25 \times 0.25^\circ$  с суточным разрешением (режим gridded).

Источниками информации об 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 (Scanning Sensor Microwave Imager [3]) метеорологических спутников DMSP и 12-канальным 6-частотным радиометром AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer [4]) океанографического спутника EOS Aqua, обеспечивающими глобальный обзор земли за трое суток, а неполное – за сутки.

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

## **Развитие тропических ураганов на начальных стадиях**

Исходным материалом здесь послужили данные о тропическом урагане Charley, который зародился в августе 2004 г. в Атлантике, набравшего силу в Карибском море и Мексиканском заливе, и обрушившегося на полуостров Флорида.

В качестве количественного индикатора активности урагана используется величина общего (усредненного по высоте) содержания водяного пара в атмосфере. Результаты целого ряда судовых и спутниковых исследований в энергоактивных зонах океана – циклонических (штормовых) зонах, фронтальных зонах, зонах влияния теплых и холодных течений, свидетельствуют о том, что водяной пар является важным атрибутом процессов теплообмена атмосферы с поверхностью океана, а его общее содержание в атмосфере может служить количественной характеристикой их интенсивности и динамики [5].

В настоящее время спутниковые СВЧ-радиометрические методы определения общего влагосодержания атмосферы являются реальной альтернативой трудоемким и дорогостоящим аэрологическим методам, основанным на высотном (радиозондовом) зондировании атмосферы. Благодаря наличию сильной линии 1.35 см (22.235 ГГц) резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы ее общее влагосодержание относится к числу параметров, которые жестко связаны с измеряемой с ИСЗ яркостной температурой COA.

На основе ежесуточных, усредненных по квадратам  $0.25 \times 0.25^\circ$  данных об общем влагосодержании атмосферы из архива NSIDC, полученных по данным измерений спутников EOS Aqua, построены его зависимости от времени для различных точек траектории урагана Charley на ранних стадиях развития урагана в Карибском море – тропической депрессии и морского шторма (рисунок 1).

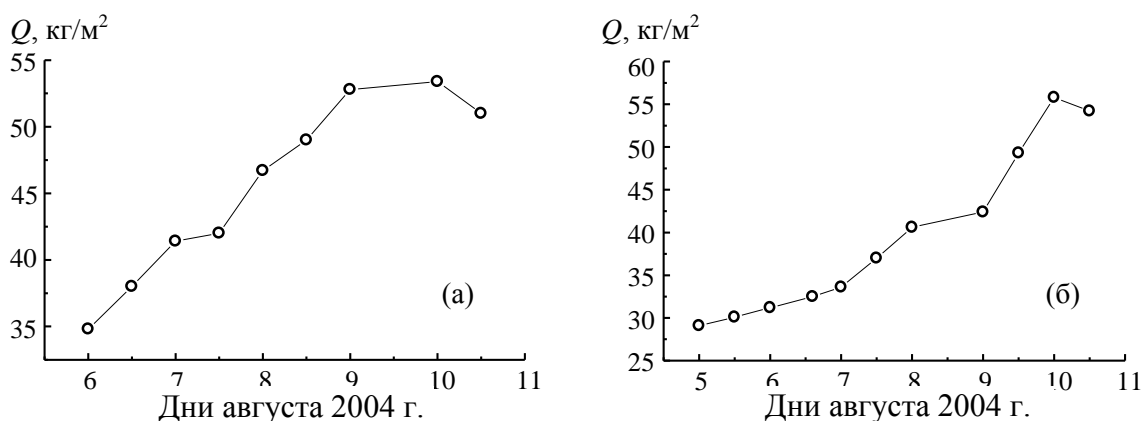


Рисунок 1. Приращение общего содержания водяного пара в атмосфере  $Q$  при развитии урагана Charley по данным радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua: (а) – на стадии тропической депрессии (в точке траектории урагана  $12.2^\circ$  с.ш.,  $63.2^\circ$  з.д.); (б) – на стадии морского шторма (в точке  $15.6^\circ$  с.ш.,  $71.8^\circ$  з.д.)

Из иллюстрации видно, что на каждой из этих стадий развития урагана Charley наблюдается сильное увеличение общего содержания водяного пара, т.е. его аккумуляция в атмосфере.

Рисунок 2 демонстрирует еще один пример использования спутниковых измерений в области резонансного поглощения собственного радиоизлучения COA в водяном паре атмосферы для описания эволюции урагана Katrina на ранней стадии его возникновения в районе Багамских островов в августе 2005 г. (стадии тропической депрессии). 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).

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

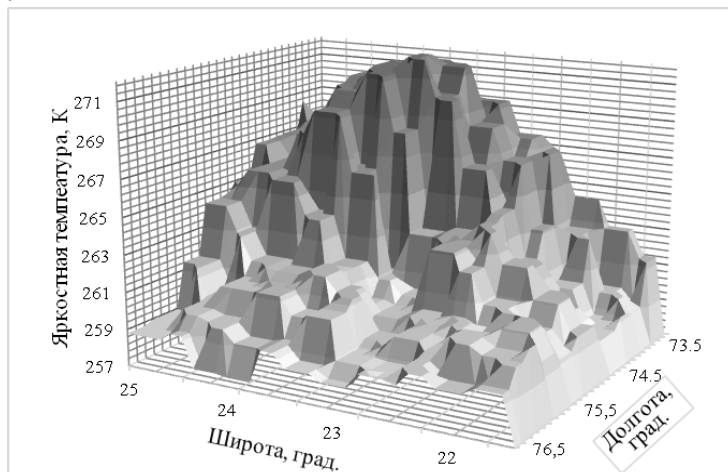


Рисунок 2. Яркостная температура COA, измеренная каналом 22V (22.235 ГГц, вертикальная поляризация) радиометра SSM/I в области зарождения урагана Katrina 23 августа 2005 г.

### Распространение и трансформация тропических ураганов

Возможности использования СВЧ-радиометрических методов для слежения за траекториями распространения тропических ураганов и анализа их трансформаций со спутника EOS Aqua демонстрирует рисунок 3.

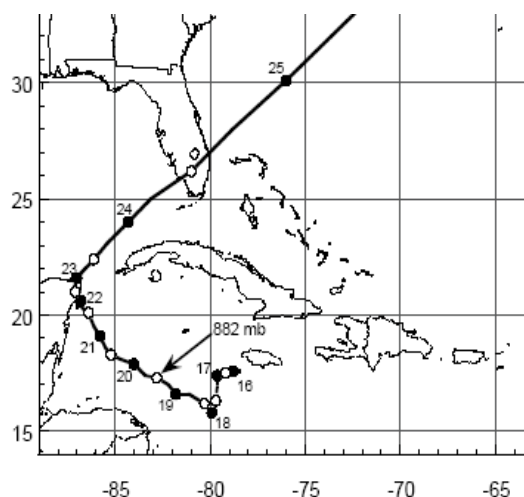


Рисунок 3а. Траектория распространения урагана Wilma от очага его зарождения в Карибском море и Мексиканском заливе: цифры – дни октября 2005 г. [6]

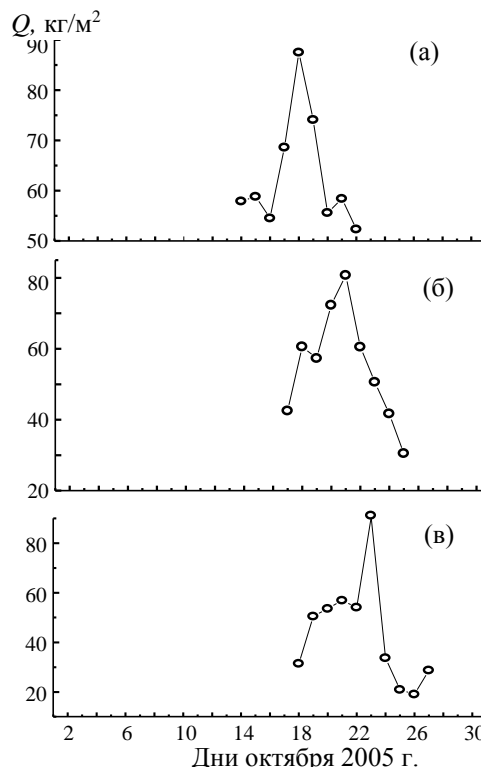


Рисунок 3б. Вариации общего влагосодержания водяного пара в атмосфере по данным измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua на трассе распространения урагана Wilma в точках: (а) – 15,8° с.ш., 79,9° з.д.; (б) – 19,1° с.ш., 85,8° з.д.; (в) – 24° с.ш., 84,3° з.д.

Урагана Wilma сформировавшийся в октябре 2005 г. над Карибским морем, развернулся у юго-восточного побережья Южной Америки в сторону Мексиканского залива и пересек полуостров Флорида, продолжив свой путь в водах Северной Атлантики вдоль восточного побережья США и потеряв свою силу у Новой Шотландии (рис. 3а); его синоптическая история содержится в [6].

Из рис. 3б видно, что появление урагана Wilma в той или иной области Мексиканского залива сопровождается всплеском влагосодержания атмосферы: на 35–40 кг/м<sup>3</sup> в точке (а) Карибского моря (18 октября 00 ч), на 45–50 кг/м<sup>3</sup> в точке (б) Карибского моря (21 октября 00 ч), на 60–65 кг/м<sup>3</sup> в точке (в) Мексиканского залива (24 октября 00 ч).

Вследствие того, что пиковые значения влагосодержания атмосферы соответствуют времени прохождения урагана через ту или иную область океана, можно оценивать приближенно скорость переноса водяного пара вдоль траектории его распространения. Из рис 3 следует, например, что эта величина составляет для урагана Wilma в период 18–24 октября 2005 г. около 300 км/сутки.

К аналогичным результатам приводит анализ пространственной-временной изменчивости полей яркостной температуры COA в области резонансного поглощения излучения в водяном паре атмосферы вдоль трассы распространения урагана Katrina, где его появление в акваториях Мексиканского залива сопровождается резкими всплесками ЯТ, измеряемой радиометром AMSR-E спутника EOS Aqua на длине волны 1.6 см (18.7 ГГц) [6]. На основе данных о временном положении пиков ЯТ следует, что скорость переноса водяного пара вдоль траектории урагана Katrina варьирует от 650 км/сутки до 900 км/сутки в зависимости от степени его развития.

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 нарастании интенсивности урагана Wilma вдоль трассы его распространения от очага зарождения, но и расширения размеров охваченных им областей.

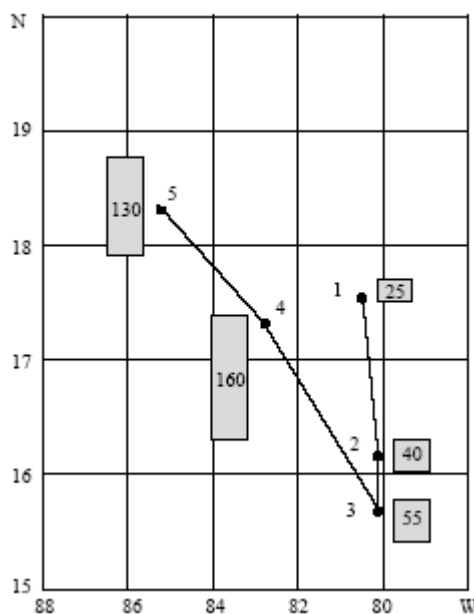


Рис. 4а. Траектория и временная динамика распространения и трансформации урагана Wilma над Карибским морем в октябре 2005 г. на стадиях: тропической депрессии (1); тропического шторма (2, 3) и урагана (4, 5). Числа в прямоугольниках – скорость ветра в морских узлах [6]

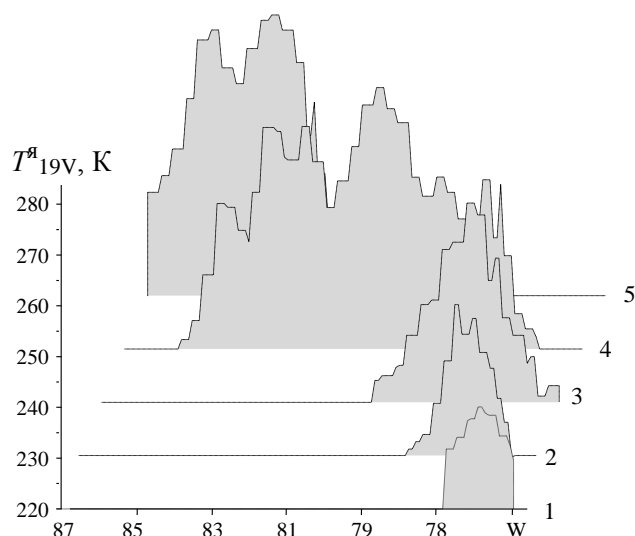


Рис. 4б. Разрезы ЯТ, измеренной спутниками DMSP в канале 19V радиометра SSM/I вдоль траектории распространения и трансформации урагана Wilma на различных стадиях: 1 – 15 окт., 23 ч. 18 мин.; 2 – 17 окт., 14 ч. 29 мин., 3 – 18 окт., 1 ч. 40 мин., 4 – 19 окт., 12 ч. 14 мин., 5 – 20 окт., 12 ч. 34 мин.

Рисунок 4 иллюстрирует пространственно-временную изменчивость поля яркостной температуры, измеренной со спутника EOS Aqua 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.). Измерения проведены с помощью канала радиометра AMSR-E 19V (19.35 ГГц, вертикальная поляризация), который обладает высокой чувствительностью как к влагосодержанию атмосферы, так и к скорости приводного ветра.

Из приведенных результатов видно, что переход тропического образования Wilma из одной стадии в другую сопровождается ростом яркостной температуры  $T^Я_{19V}$  от 20 до 50–55 К.

В этот период наблюдается также расширение активности урагана по изменчивости ЯТ на различных разрезах от 1 до 4.3 градуса (от 110 до 475 км), которые могут характеризовать меридиональные границы распространения урагана на близлежащие акватории.

### Заключение

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, а также критерием для оценки скорости их распространения.

### Литература

1. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К. СВЧ-радиометрические системы для мониторинга и предсказания ураганов и штормов // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. Серия: Проблемы эоинформатики, Выпуск VII, 7-8 декабря 2012 г., Москва, 11-13.

2. Grankov A.G., Marechek S.V., Milshin A.A., Novichikhin E.P., Golovachev S.P., Shelobanova N.K., Shutko A.M. Elaboration of Technologies for Diagnosis of Tropical Hurricanes Beginning in Oceans with Remote Sensing Methods, Chapter in collective monograph "Hurricane Researches", InTech Publ. House, 2012, 23-41.
3. Hollinger P.H, Peirce J.L, Poe G.A. SSM/I instrument evaluation // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing. 1990. V. 28. P. 781-790.
4. Kawanishi T, Sezai T, Ito et al. The advanced microwave scanning radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. No. 48. P. 173-183.
5. Гранков А.Г., Мильшин А.А. О чем говорит собственное радиотепловое излучение океана // "Земля и Вселенная", 2019, №1, 48-61.
6. Richard J. Pasch, Eric S. Blake, Hugh D. Cobb III, and David P. Roberts. Tropical Cyclone Report. Hurricane Wilma, 15-25 October 2005 (with updated versions 28 September 2006 and 9 September 2014). National Hurricane Center, 12 January 2006.

## **CHANGEABILITY OF THE ATMOSPHERE MOISTURE CONTENT IN ZONES OF ORIGIN, DEVELOPMENT AND PROPAGATION OF TROPICAL HURRICANS FROM THE DATA OF SATELLITE MICROWAVE RADIOMETRIC MEASUREMENTS**

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

Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS

Some examples of using the satellite microwave radiometric methods for studying the tropical hurricanes dynamics are presented. The aspects of hurricanes development at the stages of tropical depression and sea storm, as well as the spatial and temporal changeability of their propagation in the ocean are under consideration. The role of the atmospheric water vapor as the quantitative indicator of these processes is illustrated.