

## О связи циклогенеза в Мексиканском заливе с переносом водяного пара в Тропической Атлантике (по спутниковым СВЧ-радиометрическим данным)

А. Г. Гранков\*, А. А. Мильшин\*,

Е. П. Новичихин\*

*Приведены результаты спутникового мониторинга процессов трансатлантического переноса водяного пара в атмосфере от западного побережья Африки к Мексиканскому заливу. С помощью данных сверхвысокочастотных радиометрических измерений спутников "DMSP", EOS "Aqua", "GCOM-W1" выделены зоны с высоким содержанием водяного пара в атмосфере в тропической зоне Атлантики и проведен анализ динамики их перемещения в сторону Мексиканского залива в периоды, предшествующие зарождению ураганов Брет (1999 г.), Лоренцо (2007 г.), Катя (2017 г.) в заливе. Обсуждается связь процессов переноса атмосферного водяного пара в тропической области Атлантики с процессами циклогенеза в Мексиканском заливе.*

**Ключевые слова:** зарождение ураганов, Мексиканский залив, перенос водяного пара в Атлантике, спутниковые сверхвысокочастотные радиометрические измерения.

**DOI:** 10.52002/0130-2906-2023-8-35-42

### Введение

Разработка технологий диагностики характеристик атмосферы и океана в районах активности тропических ураганов (ТУ) с помощью радиофизических средств наблюдений из космоса является актуальной задачей [1, 4].

Сообщение посвящено некоторым вопросам использования спутниковых сверхвысокочастотных (СВЧ) радиометрических методов для анализа полей влажности атмосферы в районах тропического циклогенеза. Данные методы получили широкое распространение благодаря сети спутниковых средств, обеспечивающих высокие показатели полноты пространственного обзора и регулярности временного обзора радиотепловых полей в океане и атмосфере.

Основное внимание сосредоточено на местных ураганах, зарождающихся в акватории Мексиканского залива, а не приходящих сюда с Карибского моря или с Атлантики уже в зрелой форме. Число таких ураганов невелико, например в период с 1995 по 2021 г. в заливе зародились 15 ура-

\* Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук; e-mail: agrankov@inbox.ru (Гранков Александр Георгиевич).

ганов, в то время как число ТУ, пришедших к побережью США и Мексики в этот период, исчисляется несколькими десятками.

Изучение именно этой категории ТУ позволит достичь лучшего понимания региональных механизмов их зарождения и прогресса в разработке технологий раннего обнаружения. Например, рассмотрение ряда местных тропических образований — Брет (1999 г.), Хумберто (2007 г.), Лоренцо (2007 г.), Катя (2017 г.) — позволило обнаружить эффект группового отклика поля общего влагосодержания атмосферы (ОВА) над акваторией Мексиканского залива на процессы зарождения и развития ТУ [2]. В частности, была выявлена общая для данных образований особенность — усиление в течение нескольких дней пространственной изменчивости ОВА над заливом и дальнейшее ее ослабление перед финальной стадией — появлением урагана.

Актуальной задачей дальнейших исследований является рассмотрение происходящих за пределами Мексиканского залива процессов, способных предопределить возникновение местных ТУ за 7—10 суток до начала их формирования на самых ранних стадиях (тропическая депрессия, тропический шторм). К числу таких процессов, согласно данным Национального центра ураганов США, можно отнести тропические волны, распространяющиеся через Атлантику от западного побережья Африки к Мексиканскому заливу, которые переносят воздушные массы на запад преобладающими восточными ветрами вдоль тропиков и субтропиков вблизи экватора. Тропические волны могут привести к образованию ураганов в Северной Атлантике, в бассейне Карибского моря и в Мексиканском заливе. Также с точки зрения связи циклогенеза в Мексиканском заливе с внешними условиями может представлять интерес внутритропическая зона конвергенции — полоса вдоль экватора между пассатами Северного и Южного полушарий, которая совпадает с экваториальной депрессией — зоной низкого атмосферного давления вдоль экватора.

В статье рассматривается возможность индикации данных процессов в области Атлантики между западным побережьем Африки и Мексиканским заливом с помощью полей общего влагосодержания атмосферы, восстанавливаемых СВЧ-радиометрами спутников “DMSP”, EOS “Aqua”, “GCOM-W1”, и оценивается связь временной динамики полей ОВА с процессами зарождения и развития тропических ураганов Брет, Лоренцо, Катя. При этом используются результаты тематической обработки спутниковых данных из архивов RSS (Remote Sensing System), NSIDC (National Snow and Ice Data Center) и JAXA Data Providing Service.

### **Динамика поля ОВА в Атлантике в период, предшествующий зарождению урагана Брет**

Ураган Брет сформировался первоначально в виде тропической депрессии у берегов п-ова Юкатан в Мексиканском заливе 18 августа 1999 г. в точке 19,5° с. ш., 94,4 з. д. и набрал полную силу (скорость ветра около 230 км/ч) в районе залива в точке 26,2 с. ш., 96,1 з. д. в полдень 22 августа возле южного побережья США (штат Техас) [7]. Период его активности совпал со временем функционирования спутников DMSP “F11” (декабрь 1991 г. — май 2000 г.), “F13” (май 1995 г. — ноябрь 2009 г.) и “F14” (май 1997 г. — август 2008 г.).

С помощью данных архива RSS об общем содержании водяного пара в атмосфере над Мировым океаном, базирующихся на измерениях радиометров SSM/I (Scanning Sensor Microwave Imager) спутников “F11”, “F13”, “F14”, исследовано изменение ОВА в области 20—30 с. ш., 30—70 з. д. в тропической зоне Атлантики с пространственным разрешением 0,25° 0,25° в период, предшествующий зарождению урагана Брет в Мексиканском заливе. Результаты представлены на рис. 1 в виде временной последовательности спутниковых сканов.

Рисунок 1 демонстрирует существование в Атлантике области с высоким содержанием водяного пара в атмосфере (до 50—60 кг/м<sup>3</sup>), перемещающейся в направлении Мексиканского залива в период, соответствующий времени распространения тропической волны от западного побережья Африки к заливу [7]. Эволюция данной области не может быть связана с другими тропическими образованиями, зародившимися, согласно данным архива Национального центра ураганов, примерно в одно время с ТУ Брет, но имевшими совершенно другие траектории.

Следует отметить, что данные о пространственно-временной эволюции данной области могли быть более полными (до 6 наблюдений в сутки), если бы результаты спутниковых съемок не ограничивали слепые зоны (лакуны), образующиеся вследствие расхождения полос сканирования радиометров в низких (экваториальных) широтах. Детальный анализ влияния отмеченного эффекта на полноту пространственного обзора и регулярность временного обзора полей влажности атмосферы выполнен в работе [3] на примере Мексиканского залива.

### **Динамика поля ОВА в Атлантике в период, предшествующий зарождению урагана Лоренцо**

Тропический ураган Лоренцо образовался из тропической волны, которая прошла через западное побережье Африки 11 сентября 2007 г., и сформировался первоначально в виде тропической депрессии в юго-западной части Мексиканского залива 25 сентября 2007 г. в точке 21,8 с. ш., 94,8 з. д., достигнув стадии урагана 28 сентября в точке 20,5 с. ш., 96,3 з. д. [6]. Увеличение скорости ветра с 45 до 130 км/ч здесь произошло в течение 42 ч (25—27 сентября 2007 г.).

С помощью данных измерений радиометра AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer) спутника EOS “Aqua” (архив NSIDC) исследованы процессы пространственно-временной изменчивости поля ОВА в области 20—30 с. ш., 40—70 з. д. тропической зоны Атлантики в период, предшествующий зарождению урагана Лоренцо, а также поля ОВА в Мексиканском заливе в области 20,75—28 с. ш., 85,5— з. д. в тот же период.

На рис. 2 приведены изображения тех и других процессов за исключением районов п-ова Флорида, Багамских о-вов и о. Куба. Это обусловлено регулярными пропусками в архивах NSIDC данных об общем влагосодержании атмосферы, о скорости приводного ветра и других метеорологических параметрах из-за влияния на достоверность данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений и на результаты их интерпретации [8]

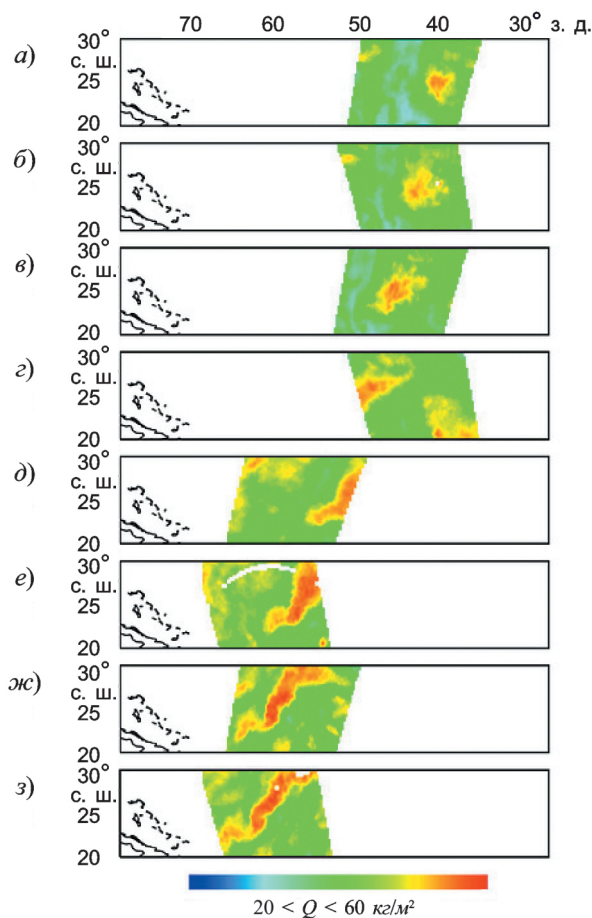


Рис. 1. Эволюция поля общего влагосодержания атмосферы в выделенной области Атлантики в период 13—16 августа 1999 г. по данным измерений радиометров SSM/I спутников “F11”, “F13”, “F14” на восходящих (А) и нисходящих (D) витках: а) 13 августа, “F14”, D; б) 13 августа, “F11”, А; в) 14 августа, “F13”, D; г) 14 августа, “F13”, А; д) 15 августа, “F14”, D; е) 15 августа, “F11”, А; ж) 16 августа, “F14”, D; з) 16 августа, “F13”, А.

следующих факторов: близость суши; мощные осадки; солнечное радиоизлучение; телекоммуникационные и промышленные радиопомехи.

Рисунок 2 свидетельствует о наличии в широтном поясе Атлантики 20—30 с. ш. в период 21—27 сентября, предшествующий возникновению ТУ Лоренцо, протяженной области с высоким содержанием водяного пара в атмосфере, перемещающейся по направлению к Мексиканскому заливу, и одновременно о росте в этот период ОВА в юго-западной части залива — зоне зарождения урагана.

Согласно данным Национального центра ураганов США, эволюция данной области в Атлантике не может быть связана с процессами возникновения в это время других тропических образований (урагана Карен

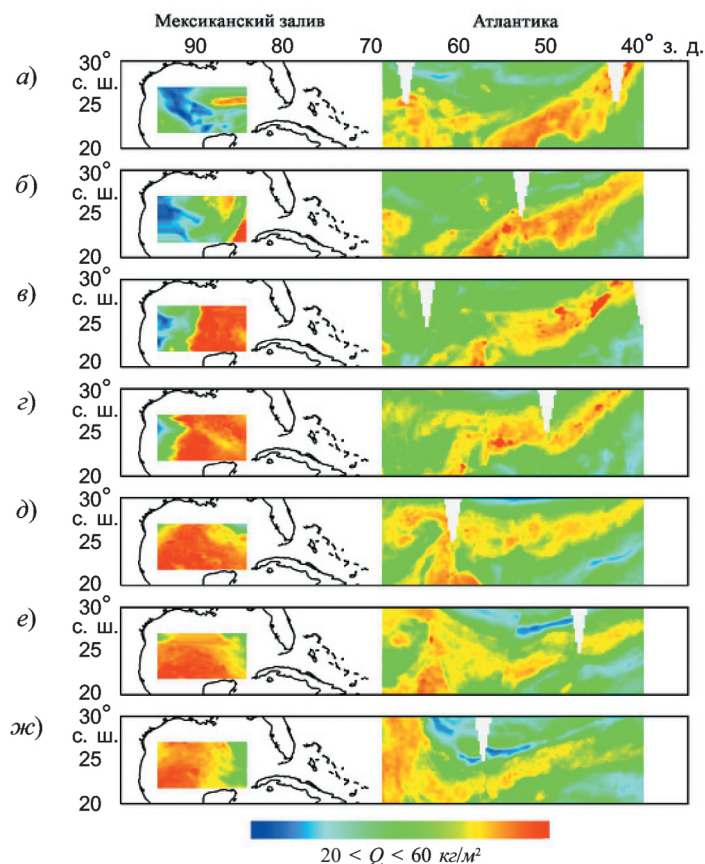


Рис. 2. Эволюция поля общего влагосодержания атмосферы в Мексиканском заливе при приближении области высокого влагосодержания атмосферы в Атлантике в период, предшествующий зарождению ТУ Лоренцо: а) 21 сентября; б) 22 сентября; в) 23 сентября; г) 24 сентября; д) 25 сентября; е) 26 сентября; ж) 27 сентября 2007 г. (по данным измерений радиометра AMSR-E спутника EOS “Aqua”).

Пространственная детальность изображений — 0,25 0,25 , белые области — слепые зоны радиометра AMSR-E.

(Karen) 25—29 сентября, тропических штормов Джерри (Jerry) 23—24 сентября и Мелисса (Melissa) 28—30 сентября), поскольку, возникнув примерно в одно время с ТУ Лоренцо, они имели иные природу возникновения и траектории движения.

### Динамика поля ОВА в Атлантике в период, предшествующий зарождению урагана Катя

Ураган Катя зародился в виде тропической депрессии в полдень 5 сентября 2017 г. в юго-западной части залива Кампече [5], утром 6 сентября достиг статуса тропического шторма и вечером того же дня трансформировался в ураган, смещавшийся к мексиканскому побережью со скоростью около 170 км/ч.



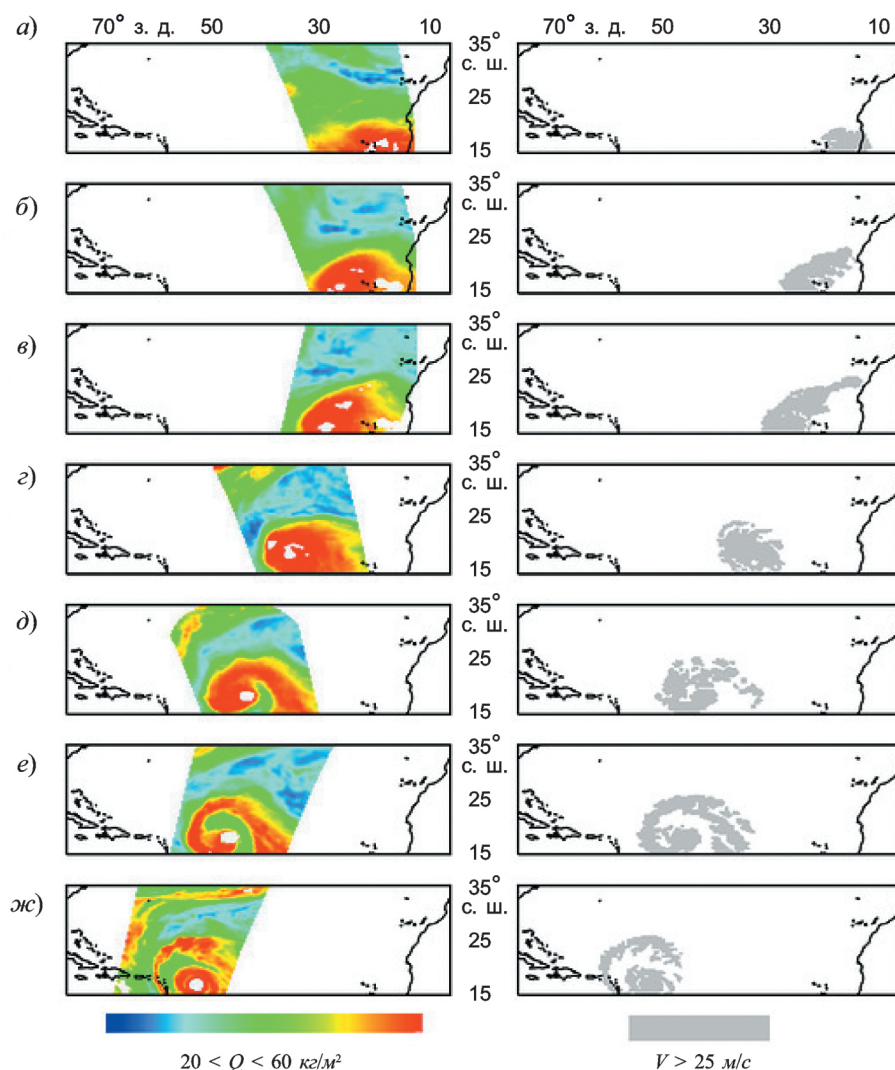


Рис. 3. Пространственно-временная изменчивость полей общего содержания водяного пара в атмосфере (левый столбец) и скорости приводного ветра (правый столбец) в тропической зоне Атлантики в период, предшествующий зарождению ТУ Катя: по данным измерений радиометров SSMIS спутника DMSP “F17” и AMSR2 спутника “GCOM-W1” на восходящих (A) и нисходящих (D) витках: а) 29 августа, “F17”, A; б) 30 августа, “F17”, A; в) 31 августа, “F17”, D; г) 1 сентября, “GCOM”, A; д) 2 сентября, “F17”, A; е) 3 сентября, “F17”, D; жс) 4 сентября 2017 г., “GCOM”, D.

С помощью данных групповых измерений радиометра SSMIS (Special Sensor Microwave Imager Sounder) спутника DMSP “F17” (архив RSS) и радиометра AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer) спутника “GCOM-W2” (архив JAXA Data Providing Service) исследована пространственно-временная изменчивость полей общего содержания водяного пара в атмосфере и скорости приводного ветра в области тропической Атлантики 15—35 с. ш., 20—70 з. д. в период, предшествующий зарождению ТУ Катя.

Выявлена область во внетропической зоне конвергенции Атлантики (рис. 3), характеризующаяся высокими значениями ОВА ( $50\text{--}60 \text{ кг/м}^2$ ) и штормовыми значениями скорости приводного ветра (более  $25 \text{ м/с}$ ), перемещающаяся от западного побережья Африки к Мексиканскому заливу в период 29 августа — 4 сентября, предшествующий зарождению урагана Катя. Траектория перемещения данной области близка к траектории тропической волны, которая согласно [5] явилась причиной зарождения ТУ Катя.

Однако продвижение данной области к Мексиканскому заливу запаздывает на несколько суток по сравнению с продвижением тропической волны (судя по времени ее прохождения района Наветренных островов Карибского моря, южнее п-ова Флорида) и может, видимо, рассматриваться лишь как вторичный (производный) фактор, связанный с зарождением ТУ Катя.

### Заключение

Приведенные результаты указывают на то, что эффект расхождения полюс сканирования микроволновых радиометров полярно-орбитальных спутников в низких (экваториальных) широтах оказывает существенное влияние на качество воспроизведения полей влажности атмосферы, играющих значимую роль в процессах циклогенеза в Мексиканском заливе. Данный эффект приводит к потерям (слепым зонам) в изображениях полей атмосферного водяного пара в области распространения тропических волн от западного побережья Африки к Мексиканскому заливу, инициирующих зарождение ураганов в заливе.

На отдельных примерах показана эффективность комбинирования данных измерений одновременно с нескольких спутников. Такой прием обеспечивает полезную избыточность, когда отдельные результаты измерений дублируются, а другие — восполняют дефицит данных в слепых зонах. При этом удается уверенно выделять области, характеризующиеся высокими значениями общего влагосодержания атмосферы ( $50\text{--}60 \text{ кг/м}^2$ ), предшествующими зарождению тропических ураганов в заливе, следить за темпами их приближения к Мексиканскому заливу и оценивать связь их эволюции с процессами циклогенеза.

Дальнейшие усилия могут быть направлены на исследование связи пространственно-временной изменчивости полей влажности атмосферы в области между западноафриканским побережьем и Мексиканским заливом не только с зарождающимися в заливе ураганами, но и с тропическими штормами и депрессиями с целью получения более полной картины циклогенеза в данном регионе.

Авторы признательны Н. К. Шелобановой за обработку первичных данных измерений радиометров SSM/Iи SSMIS спутников DMSP.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

## Литература

1. **Бондур В. Г., Крапивин В. Ф.** Космический мониторинг тропических циклонов. — М., Научный мир, 2014, 508 с.
2. **Гранков А. Г.** О связи полей влажности атмосферы в Мексиканском заливе с процессами зарождения и развития ураганов. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2021, т. 57, № 4, с. 495—506.
3. **Гранков А. Г., Мильшин А. А.** Об эффективности комплексирования спутниковых СВЧ-радиометрических средств мониторинга полей влажности атмосферы в зонах зарождения ураганов. — Радиотехника и электроника, 2022, т. 67, № 7, с. 660—667.
4. **Шарков Е. А.** Дистанционные исследования атмосферных катастроф. — Исследования Земли из космоса, 2010, № 1, с. 52—68.
5. **Avila L. A.** Tropical Cyclone Report: Hurricane Katia, 5—9 September 2017. — Miami, National Hurricane Center, 14 February 2019.
6. **Franklin J. L.** Tropical Cyclone Report: Hurricane Lorenzo, 22—28 September 2007. — Miami, National Hurricane Center, 18 October 2007.
7. **Lawrence M. B. and Kimberlain T. B.** Tropical Cyclone Report: Hurricane Bret, 18—25 August 1999. — Miami, National Hurricane Center (Revised 26 February 2001).
8. **Wentz F. J., Hilburn K. A., and Smith D. K.** Remote Sensing Systems DMSP SSM/I Daily Environmental Suite on 0.25 deg grid, Version 7, Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA, 2012; [www.remss.com/missions/ssmi](http://www.remss.com/missions/ssmi).

Поступила в редакцию 14 VI 2022 г., после доработки 7 IX 2022 г., принята к публикации 11 X 2022 г.

### CONNECTION OF CYCLOGENESIS IN THE GULF OF MEXICO TO THE WATER VAPOR TRANSPORT IN THE TROPICAL ATLANTIC ACCORDING TO SATELLITE MICROWAVE RADIOMETERS

A. G. Grankov, A. A. Mil'shin, and E. P. Novichikhin

*The results of satellite monitoring of the transatlantic transport of water vapor in the atmosphere from the western coast of Africa to the Gulf of Mexico are presented. Using the data of DMSP, EOS Aqua, GCOM-W1 satellite microwave radiometer measurements, zones with high concentrations of water vapor in the atmosphere over the tropical Atlantic are identified, and the dynamics of their movement towards the Gulf of Mexico in the periods preceding the origin of hurricanes Bret (1999), Lorenzo (2007), Katia (2017) in the gulf is analyzed. The connection of the atmospheric water vapor transport over the tropical Atlantic to the cyclogenesis in the Gulf of Mexico is discussed.*