

## О ПРОБЛЕМАХ МОНИТОРИНГА ПОЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ МЕТОДАМИ СПУТНИКОВОЙ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ РАДИОМЕТРИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЦИКЛОГЕНЕЗА В ТРОПИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКЕ

© 2023 г. А. Г. Гранков<sup>а</sup>, \*, Е. П. Новичихин<sup>а</sup>, Н. К. Шелобанова<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Фрязинский 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 06.12.2022 г.

После доработки 21.01.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Рассмотрены некоторые проблемы СВЧ-радиометрических методов мониторинга полей общего влагосодержания атмосферы со спутников в районах формирования ураганов в тропических областях Атлантики. Анализируются возможности использования для этих задач полярно-орбитальных спутников (DMSP, EOS Aqua, GCOM-W1), особенностью которых является наличие пробелов в спутниковых данных (слепых зон), образующихся в результате расхождения полос сканирования в нижних широтах. Показано на ряде примеров, что совместное использование различных спутников позволяет снизить влияние данного эффекта и получить отчетливую картину эволюций полей влажности атмосферы в тропической Атлантике и их связи с эволюциями тропических волн, инициирующих зарождение ураганов.

DOI: 10.31857/S0033849423110049, EDN: IHJZEM

### ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что частота съемки поверхности океана и атмосферы со спутников должна соответствовать скорости изменения наблюдаемых процессов. Это техническое условие является важным для использования орбитальных спутниковых средств при изучении процессов с синоптическим временем существования, к которым относятся тропические ураганы (ТУ). Здесь значительные изменения параметров атмосферы и океана системы могут происходить каждые 6–12 ч, в то время как временное разрешение спутниковых данных составляет в лучшем случае 12 ч (с учетом восходящих и нисходящих проходов).

Дополнительным фактором, влияющим на качество мониторинга процессов зарождения и развития ТУ, является наличие слепых зон, образующихся в результате расхождения полос сканирования спутниковых радиометров в низких (экваториальных) широтах.

Наличие пространственных пробелов и временных пропусков может привести к искажениям картины циклогенеза, эффективным способом борьбы с которыми, как известно, может служить использование данных измерений с нескольких спутников. При этом может быть достигнута достаточно высо-

кая точность восстановления глобальных полей яркостной температуры и параметров поверхности океана и атмосферы с помощью специальных алгоритмов пространственно-временной интерполяции данных измерений, учитывающих различия в пространственном разрешении радиометров и траекторных характеристиках спутников [1, 2].

В более локальных масштабах данная проблема рассматривалась в [3], где анализировались возможности комплексирования СВЧ-радиометров спутников DMSP, EOS Aqua, GCOM-W1 для повышения полноты пространственного и регулярности временного обзора полей общего влагосодержания атмосферы (ОВА) в Мексиканском заливе в связи с задачей диагностики процессов зарождения местных ураганов. В данной работе область наших интересов в рамках этой задачи расширена до экваторий тропической Атлантики, характеризующихся интенсивным переносом водяного пара от западного побережья Африки к Карибскому бассейну и Мексиканскому заливу. В центре внимания следующие вопросы:

— насколько тесно временная и пространственная динамика полей ОВА связана с эволюциями тропических волн, инициирующих зарождение ураганов,

— насколько слепые зоны спутниковых радиометров мешают изучению таких связей,

— каковы простые способы устранения негативного влияния этого эффекта.

В качестве исходных данных используются ежесуточные данные спутниковых архивов National Snow & Ice Data Center (NSIDC), Remote Sensing Systems (RSS) и Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) об общем содержании водяного пара в атмосфере над Мировым океаном с пространственным разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ . Архивы основаны на данных долговременных измерений радиометров SSM/I (Scanning Sensor Microwave Imager) [4] и SSMIS (Special Sensor Microwave Imager Sounder) [5] метеорологических спутников DMSP и радиометров AMSR-E и AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer) океанографических спутников EOS Aqua и GCOM-W1 [6]. Данные устройства представляют собой сканирующие многоканальные системы, измеряющие интенсивность собственного СВЧ-излучения поверхности океана и атмосферы на горизонтальной и вертикальной поляризациях в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн в полосе обзора 1400...1600 км.

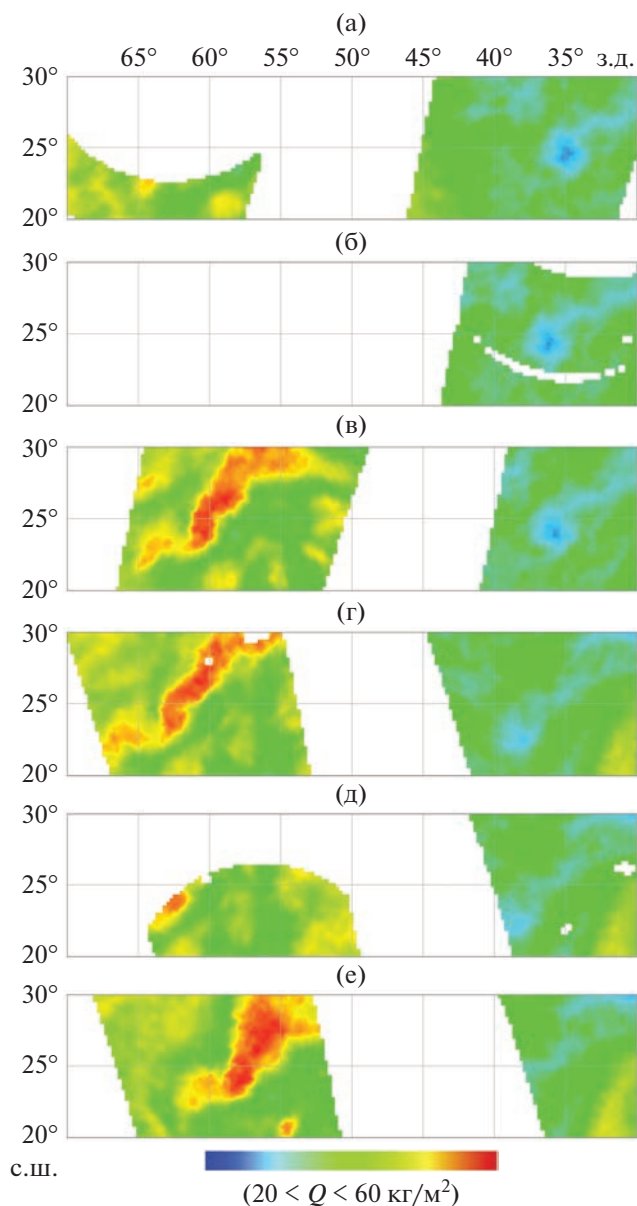
Цель работы — рассмотреть возможности использования перечисленных спутниковых СВЧ-радиометрических систем для получения наиболее полного представления о пространственно-временной изменчивости полей ОВА в тропической Атлантике и по возможности ответить на поставленные вопросы на примерах историй формирования TY Bret (1999), Frances (2004), Irma (2017).

## 1. ТРОПИЧЕСКИЙ УРАГАН BRET

Ураган Bret сформировался первоначально в виде тропической депрессии у берегов полуострова Юкатан в Мексиканском заливе 18 августа 1999 г. в точке  $19.5^\circ$  с.ш.,  $94.4^\circ$  з.д. и набрал полную силу (скорость ветра 230 км/ч) в районе залива  $26.2^\circ$  с.ш.,  $96.1^\circ$  з.д. 22 августа возле южного побережья США (штат Техас) [7]. Период его активности совпал со временем функционирования спутников F11, F13 и F14, проводивших мониторинг поверхности Земли в рамках программы США Defense Meteorological Satellite Program (DMSP).

Тропический ураган Bret примечателен тем, что он является самым мощным ураганом из числа зародившихся в Мексиканском заливе за всю историю наблюдений.

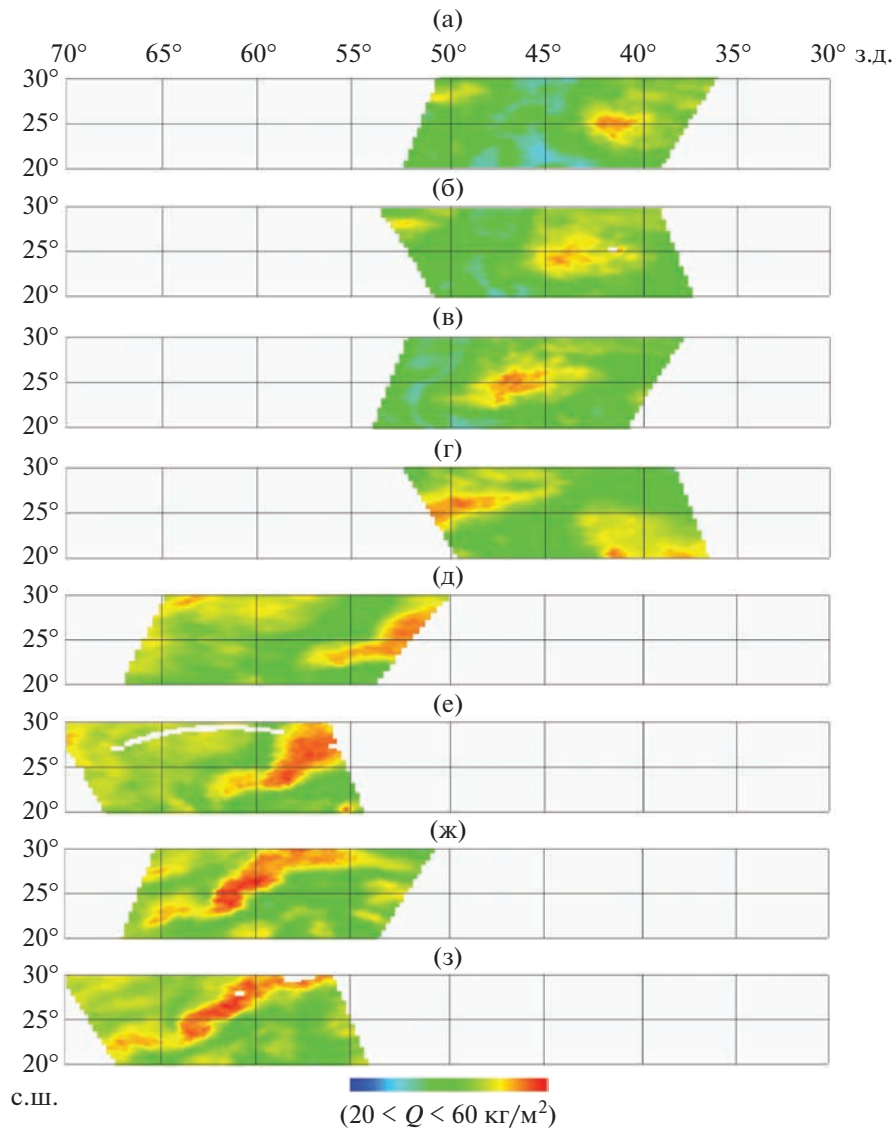
Проведен анализ пространственно-временной изменчивости полей ОВА ( $Q$ ) на основе данных измерений радиометров SSM/I спутников F11, F13, F14 (архив RSS) в области  $20^\circ \dots 30^\circ$  с.ш.,  $70^\circ \dots 30^\circ$  з.д. Атлантики в период 13–16 августа 1999 г., предшествующий зарождению TY Bret.



**Рис. 1.** Изображения поля ОВА в выбранной области тропической Атлантики 16 августа 1999 г. (от 0 до 24 ч) по данным измерений радиометров SSM/I спутников F11, F13, F14 на восходящих (А) и нисходящих (D) орбитах (время — солнечное (местное)): (а) 6.0 ч (F13 D); (б) 7.6 ч (F11 D); (в) 8.8 ч (F14 D); (г) 18.0 ч (F13 A); (д) 19.6 ч (F11 A); (е) 20.8 ч (F14 A).

Отмечается сильное влияние слепых зон на полноту воспроизведения общего влагосодержания атмосферы; для иллюстрации на рис. 1 приведены изображения поля ОВА в данной области океана для всей совокупности ее пересечений на восходящих и нисходящих орбитах спутников 16 августа в течение суток (от 0 до 24 ч).

Приведенный пример показывает, что слепые зоны на изображениях ОВА, обусловленные расхождением полос сканирования радиометров F11,



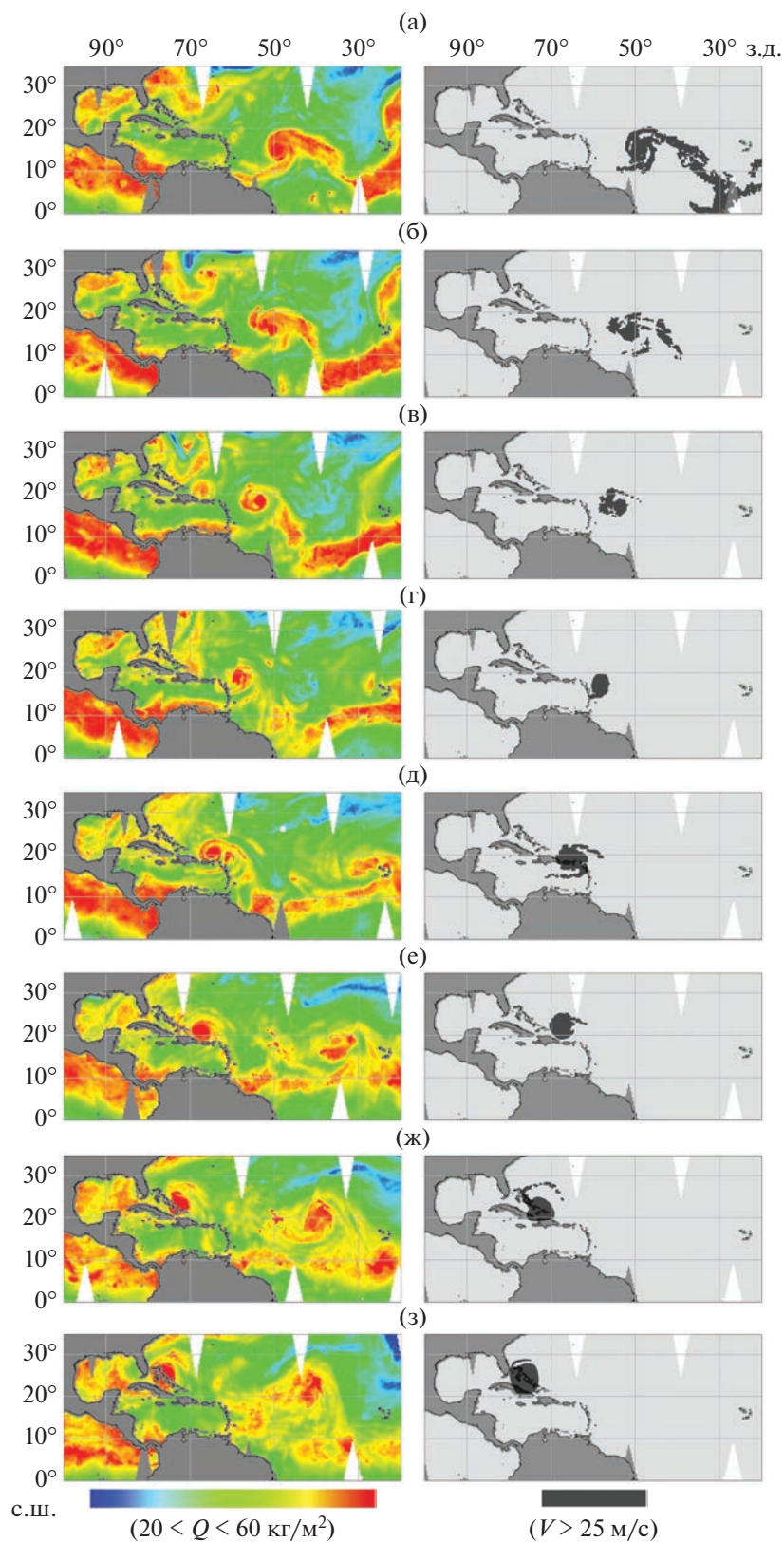
**Рис. 2.** Эволюция полей ОВА в выбранной области тропической Атлантики в период 13–16 августа 1999 г. согласно измерениям с радиометров SSM/I спутников F11, F13, F14 на восходящих (A) и нисходящих (D) орбитах: а – 13.09, 8.8 ч (F14 D); б – 13.09, 19.6 ч (F11 A); в – 14.09, 6.0 ч (F13 D); г – 14.09, 18.0 ч (F13 A); д – 15.09, 8.8 ч (F14 D); е – 15.09, 19.6 ч (F11 A); ж – 16.09, 8.8 ч (F14 D); з – 16.09, 18.0 ч (F13 A).

F13, F14, наблюдаются над значительной частью тропической Атлантики (в отдельных случаях пропуски в изображениях усугубляются техническими пропусками измерений – см. рис. 1а, 1б, 1д). Для того чтобы сформировать достоверную картину пространственной и временной изменчивости ОВА в этой области в период, предшествующий зарождению ТУ Bret, следует использовать лишь отдельные фрагменты локальных (суточных) спутниковых измерений (изображений), отбрасывая пустые и сохраняя лишь те, которые “видят” зоны с высокими значениями  $Q$  (до  $60 \text{ кг/м}^2$ ) и могут совпадать по динамике движения с тропическими волнами. При этом полезными могут оказаться общеизвестные сведения о форме, размерах тропических волн и

типичных траекториях их перемещения в тропической Атлантике [8].

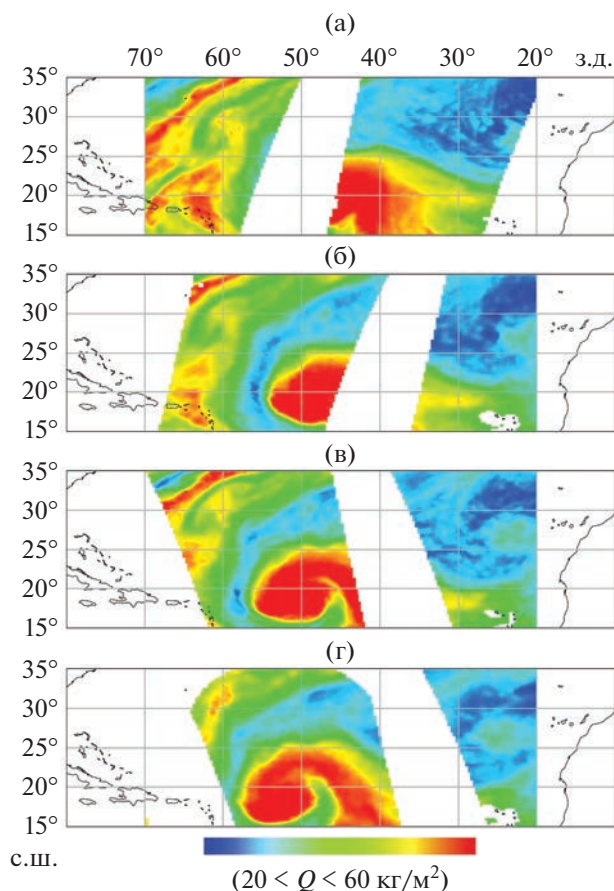
С помощью такого подхода получены оценки эволюции полей ОВА в исследуемой области Атлантики в период, предшествующий формированию ТУ Bret.

Рисунок 2 представляет собой конечный результат отбора наиболее цельных изображений ОВА из всего набора, полученных на восходящих и нисходящих орбитах спутников F11, F13, F14 в период с 13 по 16 августа (24 изображения). Приведенная иллюстрация указывает на существование области в тропической Атлантике с высоким содержанием водяного пара в атмосфере (до  $60 \text{ кг/м}^2$ ), движущейся в направлении Мексиканского залива



**Рис. 3.** Эволюции полей ОВА  $Q$  (слева) и скорости приводного ветра  $V$  (справа) в период развития ТУ Frances с 27 августа по 3 сентября: 27.08 (а), 28.08 (б), 29.08 (в), 30.08 (г), 31.08 (д), 01.09 (е), 02.09 (ж), 03.09 (з); белые клинообразные области — слепые зоны радиометра AMSR-E.





**Рис. 4.** Изображения поля ОВА в тропической Атлантике 2 сентября 2017 г. по данным измерений радиометра SSM/I спутника F17 и радиометра AMSR2 спутника GCOM-W1 на восходящих (А) и нисходящих (D) орбитах: а – 1.6 ч (GCOM D); б – 6.3 ч (F17 D); в – 13.6 ч (GCOM A); г – 18.3 ч (F17 A).

в период времени, который согласно [7] соответствует тропической волне, распространяющейся по той же траектории, что и данная область.

## 2. ТРОПИЧЕСКИЙ УРАГАН FRANCES

Тропическое образование Frances сформировалось под воздействием мощной тропической волны, начавшей свое движение от западного побережья Африки 21 августа 2004 г. по направлению к Багамским островам, достигнув стадии урагана 26 августа в районе 13.3° с.ш., 45.8° з.д. Атлантики и набрав полную силу 2 сентября у берегов Гаити (скорость ветра 230 км/ч) [9].

Формирование TY Frances можно проследить с помощью спутников DMSP F13, F14, F15 и спутника EOS Aqua. Для анализа динамики процессов на поверхности океана и в атмосфере в области зарождения и развития урагана мы ограничились данными измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua из архива NSIDC, на основе которых получены оценки пространственно-вре-

менной изменчивости различных параметров атмосферы в области 0°...35° с.ш., 100°...20° з.д. Атлантики в период развития TY Frances.

Выявлена область (рис. 3), характеризующаяся высокими значениями общего влагосодержания атмосферы  $Q$  (до 60 кг/м<sup>2</sup>) и высокой скоростью приводного ветра  $V$  (более 25 м/с), перемещающаяся от западного побережья Африки к полуострову Флорида в период 27 августа–3 сентября 2004 г. Для уточнения нижней границы изменения величины  $V$  на выделенных на рис. 3 ветровых структурах нами использованы дополнительно данные о полях скорости приводного ветра в области формирования TY Frances (как и в рассмотренном далее примере с ураганом Irma), полученные с помощью геопортала спутникового радиотеплового излучения (<https://fireras.su/tpw/Fields.aspx>) [1].

Следует отметить, что траектория перемещения данной области хорошо соответствуют приведенной в [9] траектории распространения (Best Track Position) TY Frances, иллюстрирующей динамику появления и перемещения зон наиболее низкого атмосферного давления и наиболее высокой скорости ветра, контролируемых наземными метеорологическими средствами.

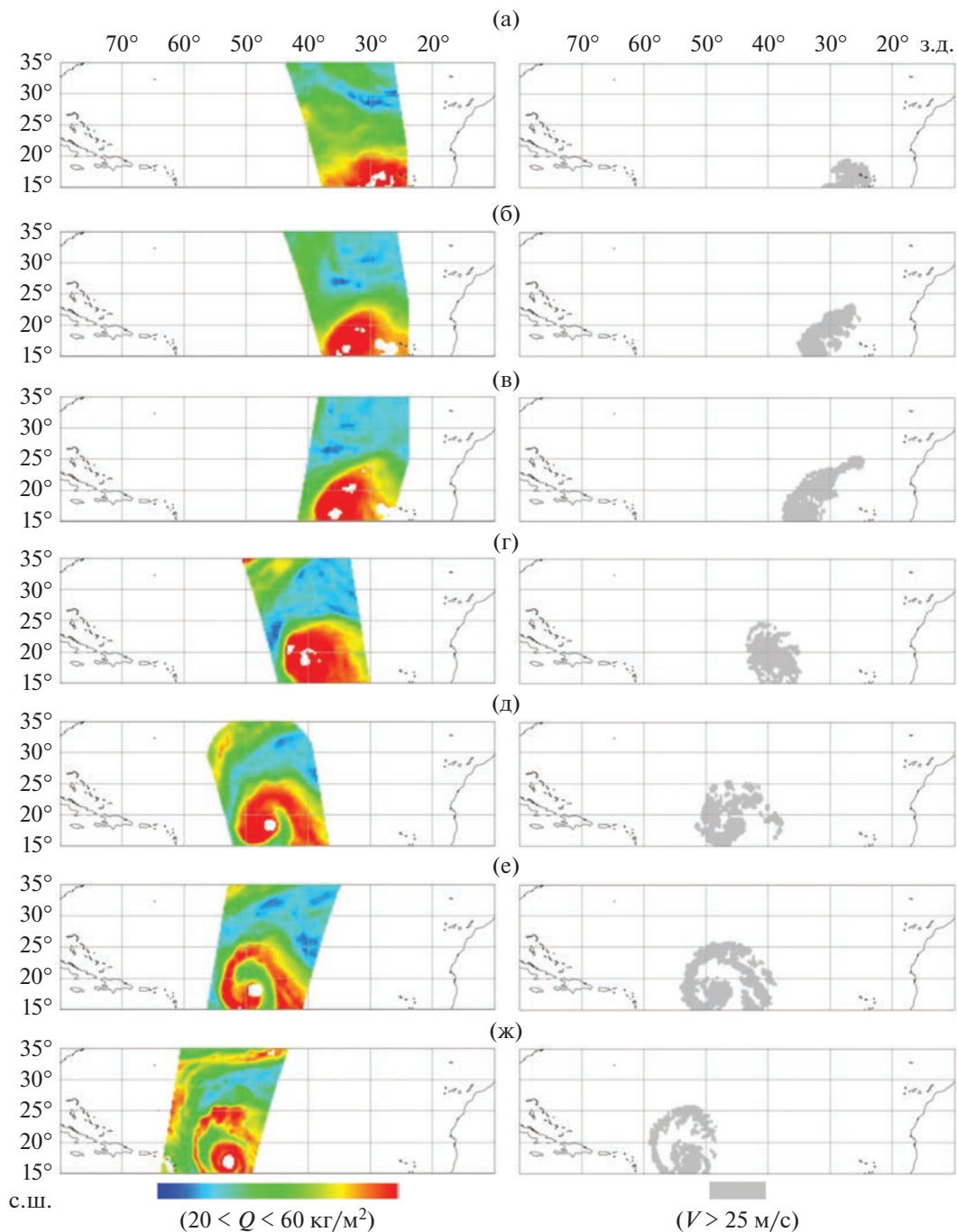
## 3. ТРОПИЧЕСКИЙ УРАГАН IRMA

Тропический ураган Irma возник под воздействием тропической волны, начавшей свое движение от западного побережья Африки 27 августа 2017 г., и первоначально сформировался в виде тропической депрессии 30 августа 2017 г. в точке 16.1° с.ш., 26.9° з.д. Атлантики, достигнув стадии урагана 31 августа в точке 16.4° с.ш., 32.5° з.д. и набрав полную силу 5 сентября у берегов Гаити (скорость ветра 285 км/ч) [10].

Период зарождения и развития TY Irma совпал со временем функционирования спутников DMSP F15, F16, F17, F18, а также спутника GCOM-W1, запущенного в мае 2012 г. в соответствии с космической миссией Global Change Observation Mission – Water 1.

Проведен анализ слепых зон в данных измерений атмосферных параметров радиометром SSMIS спутника F17 (архив RSS) и радиометром AMSR2 спутника GCOM-W1 (архив JAXA) в области 0°...35° с.ш., 80°...10° з.д. Атлантики в период развития TY Irma. В данном случае слепые зоны наблюдаются в значительной части акваторий тропической Атлантики; в качестве примера на рис. 4 приведены изображения поля общего содержания водяного пара в атмосфере в данной области для всей совокупности ее пересечений на восходящих и нисходящих орбитах спутников 2 сентября 2017 г.

Для получения общей картины эволюции общего содержания водяного пара и других пара-



**Рис. 5.** Эволюции полей ОВА  $Q$  (слева) и скорости приводного ветра  $V$  (справа) в период развития ТУ Irma (с 29 августа по 4 сентября) по данным измерений радиометра SSMIS спутника F17 и радиометра AMSR2 спутника GCOM-W1 на восходящих (А) и нисходящих (D) витках: 29.08 F17 А (а), 30.08 F17 А (б), 31.08 F17 D (в), 01.09 GCOM А (г), 02.09 F17 А (д), 03.09 F17 D (е), 04.09 GCOM D (ж).

метров атмосферы в период зарождения и развития ТУ Irma проведена селекция всех изображений, полученных спутниками F17 и GCOM-W1 на восходящих и нисходящих витках в этот период. Композиция из их наиболее цельных фрагментов, составленная с учетом общих сведений о циклогенезе урагана Irma [10], позволила выделить область, которая характеризуется высокими

значениями ОВА (до  $60 \text{ кг/м}^2$ ) и значительной скоростью приводного ветра ( $V > 25 \text{ м/с}$ ), и перемещается от западного побережья Африки к Большим Антильским островам в период 29 августа—4 сентября 2017 г. (рис. 5).

Рисунок иллюстрирует последовательно следующие стадии развития ТУ Irma: приближение

тропической волны к району циклогенеза 29 августа (рис. 5а); формирование тропической депрессии 30 августа (рис. 5б); зарождение урагана 31 августа (рис. 5в); развитие урагана и его перемещение к Наветренным островам 1–4 сентября (рис. 5в–5ж).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье результаты свидетельствуют о том, что эффект расхождения полос сканирования микроволновых радиометров спутников на полярных орбитах в нижних (экваториальных) широтах оказывает существенное влияние на качество воспроизведения полей влажности атмосферы, которые играют значительную роль в процессах циклогенеза в Мексиканском заливе и других акваториях тропической Атлантики.

Этот эффект приводит к потерям (слепым пятнам) на изображениях полей атмосферного водяного пара в области распространения тропических волн от западного побережья Африки до Мексиканского залива, инициирующих возникновение и развитие тропических ураганов.

Отдельные примеры показывают эффективность объединения данных измерений с нескольких спутников одновременно для мониторинга полей ОВА в данной области. Этот способ обеспечивает полезную избыточность, когда некоторые результаты измерений ОВА дублируются, в то время как другие восполняют дефицит данных в слепых зонах.

Рассмотренные примеры свидетельствуют также о том, что спутниковый мониторинг полей влажности атмосферы позволяет обнаруживать тропические волны в периоды, предшествующие стадии зарождения ураганов (за несколько суток для ТУ Bret и Irma), а также следить за их развитием и распространением на последующих стадиях (ТУ Frances и Irma).

Дальнейшим направлением исследований может служить поиск областей Атлантики в разные периоды времени, где спутниковые данные о переносе водяного пара атмосферы тропическими

волнами позволяют “предвидеть” возникновение как ранних, так и зрелых форм ураганов с заблаговременностью до 7–10 сут. Также представляется важной уяснение роли тропических волн как непосредственного фактора процессов циклогенеза, например путем оценивания частоты случаев, когда данный фактор непременно приводит к образованию урагана.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИРЭ им. Котельникова РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермаков Д.М., Раев М.Д., Чернушич А.П., Шарков Е.А. // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 72.
2. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 3. С. 37.
3. Гранков А.Г., Мильшин А.А. // РЭ. 2022. Т. 67. № 7. С. 660.
4. Hollinger P.H., Peirce J.L., Poe G.A. // IEEE Trans. 1990. V. GRS-28. № 5. P. 781.
5. Kunkee D., Boucher, D., Poe, G. et al. // IEEE Trans. 2008. V. GRS-46. № 4. P. 863.
6. Kawanishi T., Sezai T., Ito Y. et al. // IEEE Trans. 2003. V. GRS-41. № 7. P. 173.
7. Lawrence M.B., Kimberlain T.B. Tropical Cyclone Report: Hurricane Bret, 18–25 August 1999. Miami: National Hurricane Center. [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL022011\\_Bret.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL022011_Bret.pdf).
8. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974.
9. Beven II J.L. Tropical Cyclone Report: Hurricane Frances, 25 August–8 September 2004. Miami: National Hurricane Center. [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL062004\\_Frances.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL062004_Frances.pdf).
10. Cangialosi J.P., Latta A.S., Berg R. Tropical Cyclone Report: Hurricane Irma, 30 August–12 September 2017. Miami: National Hurricane Center 24 September 2021.