

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

© 2023 г. А. Г. Гранков^а, *, Е. П. Новичихин^а, Н. К. Шелобанова^а

^а 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 акваторий 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 ежедневные 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 БРЕТ

Ураган Bret сформировался первоначально в виде тропической депрессии у берегов полуострова Юкатан в Мексиканском заливе 18 августа 1999 г. в точке 19.5° с.ш., 94.4° з.д. и набрал полную силу (скорость ветра 230 км/ч) в районе залива 26.2° с.ш., 96.1° 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° ... 30° с.ш., 70° ... 30° з.д. Атлантики в период 13–16 августа 1999 г., предшествующий зарождению TY Bret.

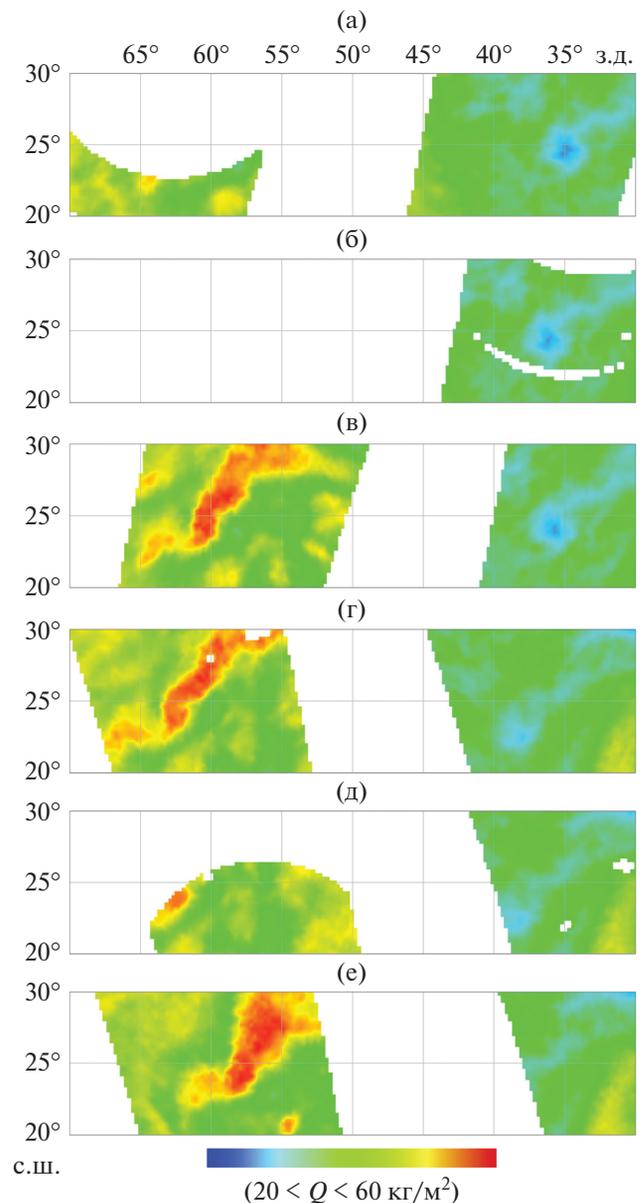


Рис. 1. Изображения поля ОВА в выбранной области тропической Атлантики 16 августа 1999 г. (от 0 до 24 ч) по данным измерений радиометров SSM/I спутников F11, F13, F14 на восходящих (А) и нисходящих (D) орбитах (время – солнечное (местное)): (а) 6.0 ч (F13 D); (б) 7.6 ч (F11 D); (в) 8.8 ч (F14 D); (г)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

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,

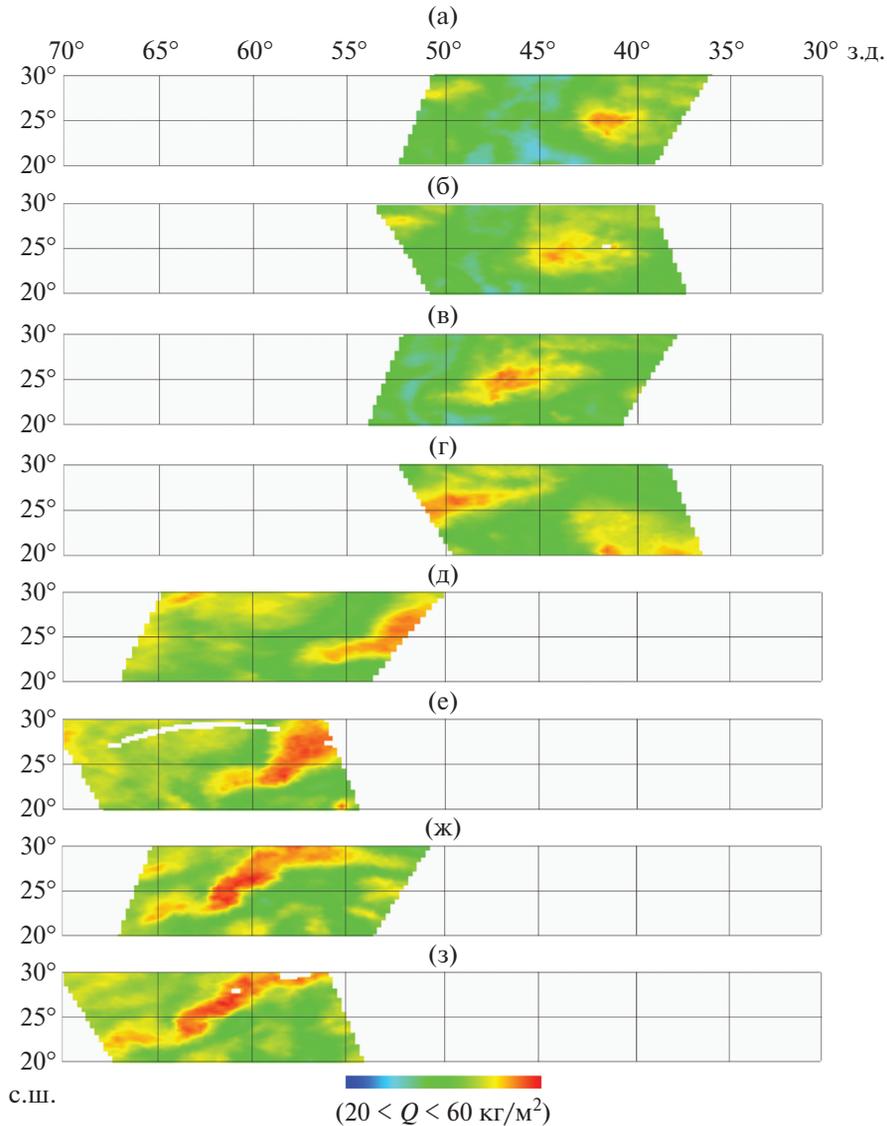


Рис. 2. Эволюция полей ОВА в выбранной области тропической Атлантики в период 13–16 августа 1999 г. согласно измерениям с радиометров SSM/I спутников F11, F13, F14 на восходящих (А) и нисходящих (D) орбитах: а – 13.09, 8.8 ч (F14 D); б – 13.09, 19.6 ч (F11 A); в – 14.09, 6.0 ч (F13 D); г – 14.09, 18.0 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 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 кг/м^2), движущейся в направлении Мексиканского залива

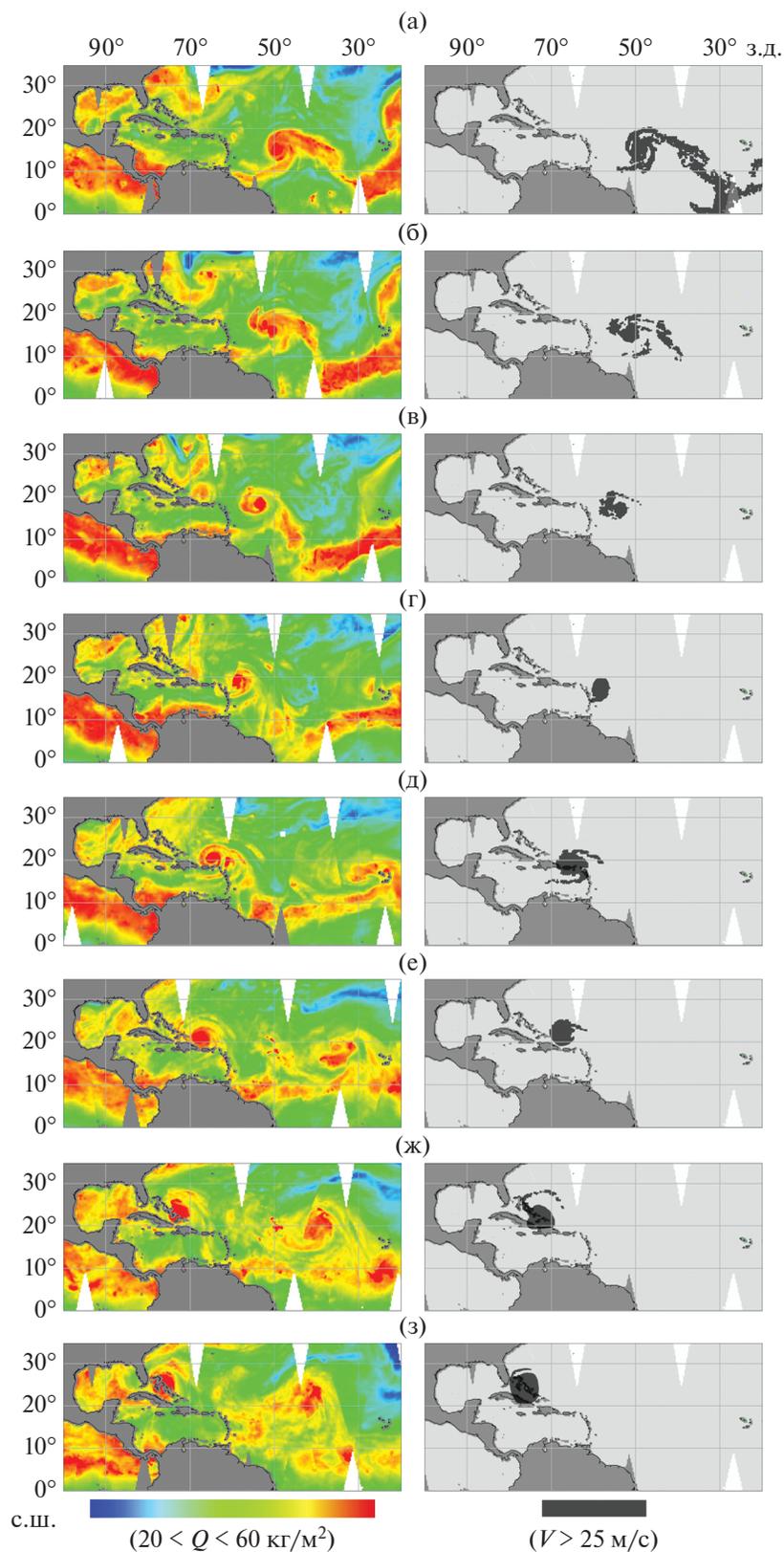


Рис. 3. Эволюции полей ОВА Q (слева) и скорости приводного ветра V (справа) в период развития ТУ Frances с 27 августа по 3 сентября: 27.08 (а), 28.08 (б), 29.08 (в), 30.08 (г), 31.08 (д), 01.09 (е), 02.09 (ж), 03.09 (з); белые клинообразные области – слепые зоны радиометра AMSR-E.

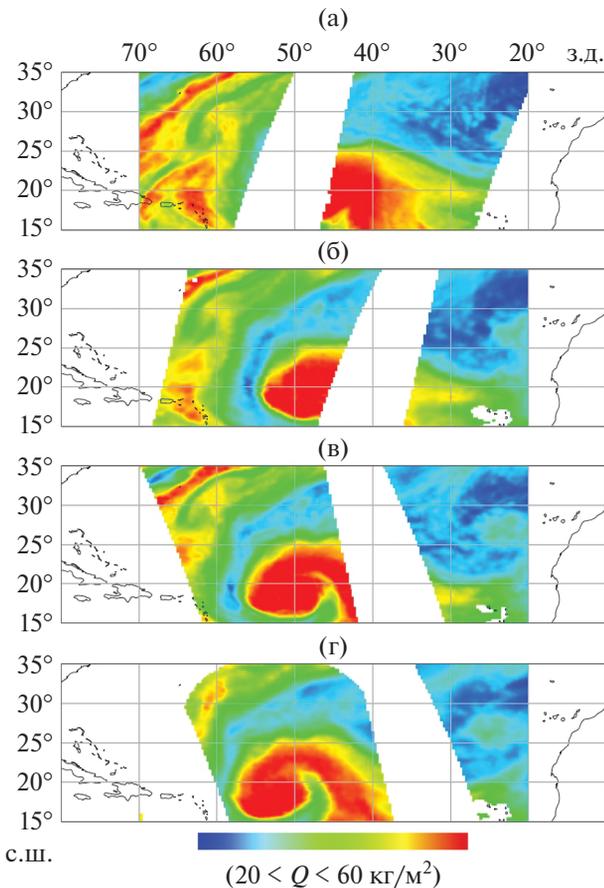


Рис. 4. Изображения поля ОВА в тропической Атлантике 2 сентября 2017 г. по данным измерений радиометра SSM/I спутника F17 и радиометра AMSR2 спутника GCOM-W1 на восходящих (A) и нисходящих (D) орбитах: а – 1.6 ч (GCOM D); б – 6.3 ч (F17 D); в – 13.6 ч (GCOM A); г – 18.3 ч (F17 A).

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 $0^\circ \dots 35^\circ$ с.ш., $100^\circ \dots 20^\circ$ з.д. Атлантики в период развития TY Frances.

Выявлена область (рис. 3), характеризующаяся высокими значениями общего влагосодержания атмосферы Q (до 60 кг/м²) 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 измененных 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 $0^\circ \dots 35^\circ$ с.ш., $80^\circ \dots 10^\circ$ 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-

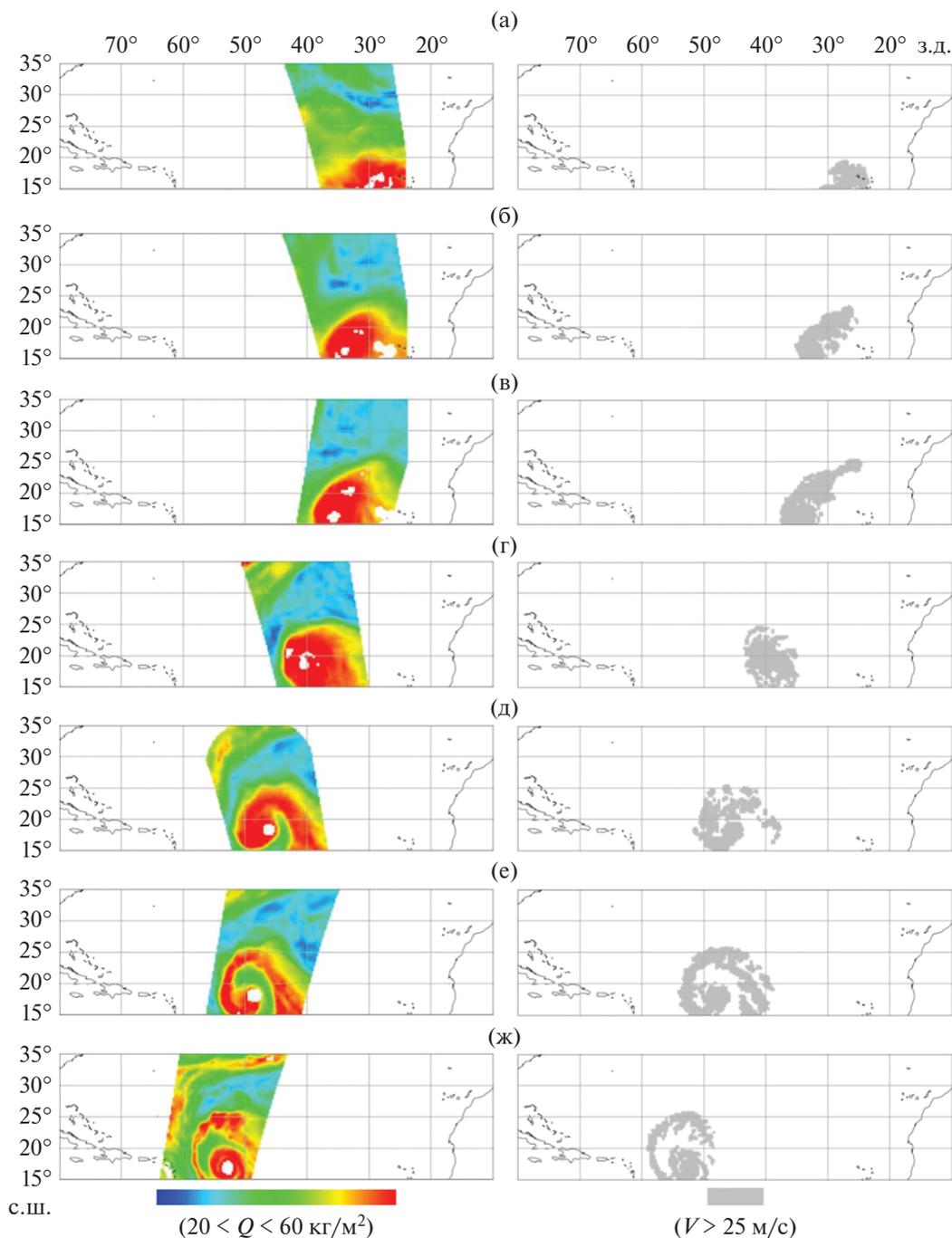


Рис. 5. Эволюции полей ОВА Q (слева) и скорости приводного ветра V (справа) в период развития ТУ Irma (с 29 августа по 4 сентября) по данным измерений радиометра SSMIS спутника F17 и радиометра AMSR2 спутника GCOM-W1 на восходящих (А) и нисходящих (D) витках: 29.08 F17 А (а), 30.08 F17 А (б), 31.08 F17 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 кг/м²) и значительной скоростью приводного ветра ($V > 25$ 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.
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.
10. *Cangialosi J.P., Latto A.S., Berg R.* Tropical Cyclone Report: Hurricane Irma, 30 August–12 September 2017. Miami: National Hurricane Center 24 September 2021.