



УДК 551.465

## ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА СВЯЗИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА С ПЕРЕНОСОМ ВОДЯНОГО ПАРА В АТЛАНТИКЕ

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

<sup>а</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, пл. акад. Введенского, 1, Московская обл., Фрязино, 141190 Россия

\*e-mail: agrankov@inbox.ru

Поступила в редакцию 22.06.2023 г.

После доработки 27.09.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Иллюстрируются возможности использования данных СВЧ-радиометрических измерений со спутников EOS Aqua и GCOM-W1 для изучения влияния тропических волн в Атлантике на процессы зарождения урагана Lorenzo (2007) и штормов Matthew (2004), Colin (2016) в Мексиканском заливе путем мониторинга пространственно-временной изменчивости полей водяного пара в заливе. Приведены примеры использования спутниковых изображений полей влажности атмосферы, полученных со спутников DMSP, EOS Aqua, демонстрирующие процессы трансформации тропических волн в атлантические ураганы Bonnie (1998), Frances (2004), Ivan (2004).

**Ключевые слова:** Мексиканский залив, тропические волны, тропические ураганы, водяной пар, спутниковая СВЧ-радиометрия

**DOI:** 10.31857/S0002351524010073

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений в исследованиях процессов зарождения тропических ураганов (ТУ) является мониторинг полей влажности атмосферы в районах циклогенеза на основе данных спутниковых измерений интенсивности собственного СВЧ-излучения – яркостной температуры системы океан–атмосфера в спектральной области резонансного поглощения радиоволн в водяном паре атмосферы [Гранков и др., 2022; Шарков и др., 2012; Ermakov, 2021].

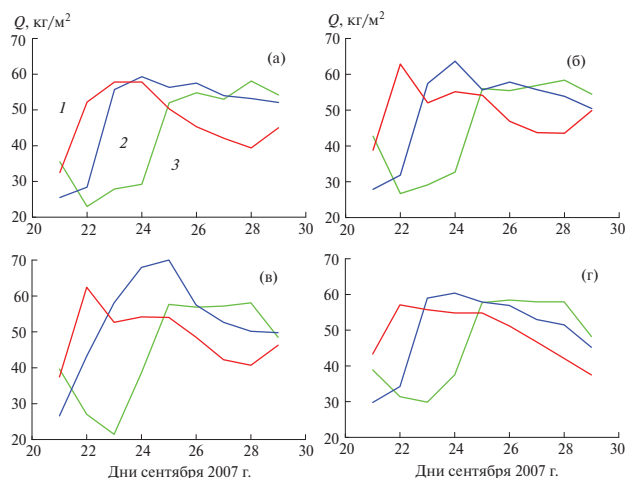
Данный подход использован нами ранее для изучения процессов циклогенеза в Мексиканском заливе путем анализа отклика общего влагосодержания атмосферы (ОВА) на эти процессы на основе данных измерений СВЧ-радиометров SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) и SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) спутников DMSP, радиометров AMSR-E и AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer) спутников EOS Aqua и GCOM.

Проведенный анализ пространственной изменчивости полей ОВА в периоды зарождения и развития ТУ Bret (1999 г.), Humberto (2007 г.), Lorenzo (2007 г.), Katia (2017 г.) выявил их дру-

жные изменения не только в районах зарождения данных ураганов, но и в прилегающих к ним обширных областях Мексиканского залива [Гранков, 2021].

Такой результат можно объяснить влиянием тропических волн (иное название – африканские восточные волны [Thorncroft, Hodges, 2001]), формирующихся в тропической Атлантике в период с апреля–мая по октябрь–ноябрь, распространяющихся от западного побережья Африки к Карибскому морю и Мексиканскому заливу и несущих массы теплого воздуха на запад преобладающими восточными ветрами вдоль тропиков и субтропиков вблизи экватора. Иллюстрацией может служить приход в Мексиканский залив тропической волны во время зарождения ТУ Lorenzo в сентябре 2007 г. [Franklin, 2007] (рис. 1). Здесь представлены наблюдаемые радиометром AMSR-E спутника EOS Aqua вариации ОВА в фиксированных точках залива в период, предшествующий зарождению урагана 28 сентября.

Рисунок демонстрирует сильный всплеск общего содержания водяного пара в атмосфере  $Q$  (на 25–30 кг/м<sup>2</sup>), перемещающийся из восточной части акватории Мексиканского залива в западном направлении; что можно рассматривать как



**Рис. 1.** Динамика ОВА ( $Q$ ) в период, предшествующий зарождению ТУ Lorenzo в Мексиканском заливе в узлах сетки с координатами долготы  $85.5^\circ$  з.д. (1),  $91^\circ$  з.д. (2),  $95.75^\circ$  з.д. (3) и широты  $25^\circ$  с.ш. (а),  $24^\circ$  с.ш. (б),  $23^\circ$  с.ш. (в),  $22^\circ$  с.ш. (г).

следствие приближения тропической волны со стороны Атлантики к заливу 21 сентября.

Более полное представление о влиянии тропических волн на процессы циклогенеза в Мексиканском заливе, а также в акватории тропической Атлантики может быть получено на основе данных анализа полей (изображений) ОВА со спутников DMSP, EOS Aqua, GCOM-W1, Метеор-М, обеспечивающих глобальную информацию об этом и других параметрах атмосферы и поверхности океана с пространственным разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  с суточной регулярностью.

Ниже оценим возможности использования спутниковых измерений для анализа влияния тропических волн на формирование полей влажности атмосферы в Мексиканском заливе в периоды зарождения различных тропических образований.

В рамках данной задачи рассмотрены не только тропические ураганы, но и тропические штормы,

мы, частота зарождения которых в несколько раз выше, благодаря чему может быть расширен объем полезной информации для анализа процессов циклогенеза в заливе.

## РЕАКЦИЯ ПОЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ В МЕКСИКАНСКОМ ЗАЛИВЕ НА ПРИБЛИЖЕНИЕ ТРОПИЧЕСКИХ ВОЛН

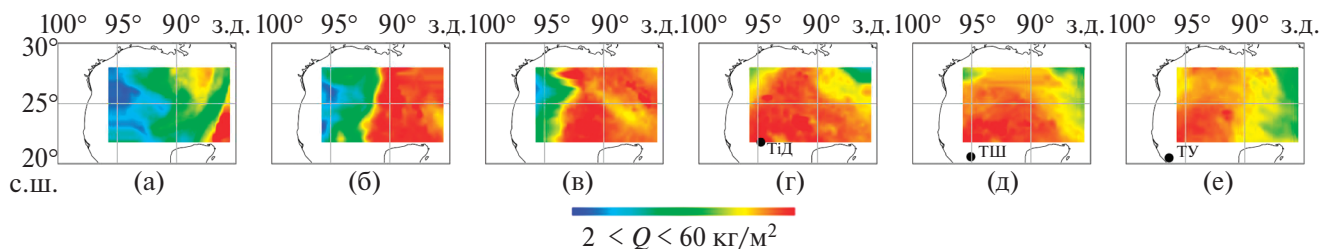
Рассмотрим ряд примеров использования данных спутниковых измерений для анализа влияния тропических волн на поля ОВА в заливе в периоды зарождения местных ураганов и штормов.

### *Зарождение урагана Lorenzo, сентябрь 2007 г.*

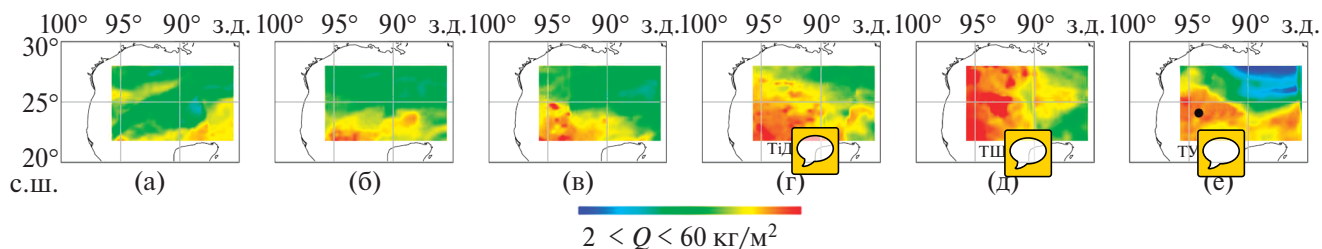
В соответствии с [Franklin, 2007] ТУ Lorenzo образовался из тропической волны, которая прошла через западное побережье Африки 11 сентября 2007 г., и сформировался первоначально в виде тропической депрессии в юго-западной части Мексиканского залива 25 сентября 2007 г. в точке  $21.8^\circ$  с.ш.  $94.8^\circ$  з.д., достигнув стадии урагана 28 сентября в точке  $20.5^\circ$  с.ш.  $96.3^\circ$  з.д.

С помощью данных измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua (архив NSIDC – National Snow & Ice Data Center) исследована пространственно-временная изменчивость ОВА в Мексиканском заливе в области  $20.75^\circ$ – $28^\circ$  с.ш.  $97.75^\circ$ – $85.5^\circ$  з.д. в период 22–27 сентября 2007 г., предшествующий зарождению ТУ Lorenzo, а результаты представлены на рис. 2. Данная область охватывает большую часть акватории Мексиканского залива; ее внешние границы выбраны таким образом, чтобы в поле зрения спутниковых радиометров не попадали береговые участки залива.

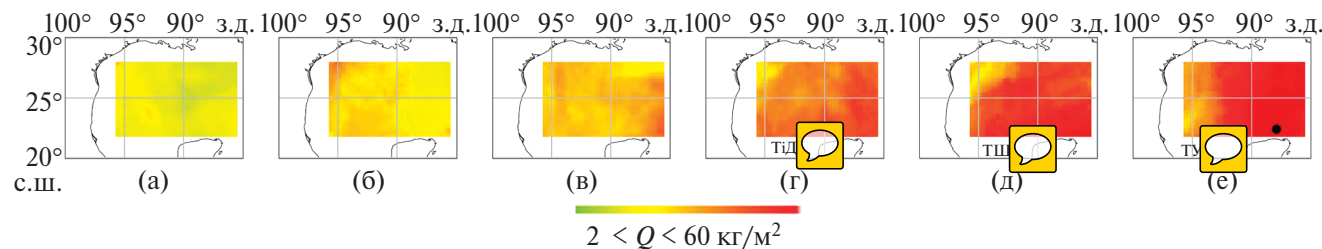
Как видно из рис. 2, приход тропической волны в Мексиканский залив сопровождается появлением области с высоким содержанием водяного пара в атмосфере в его восточной части, перемещающейся на запад и дальнейшей ее ло-



**Рис. 2.** Динамика изменения поля ОВА ( $Q$ ) в выбранной области Мексиканского залива в период, предшествующий зарождению ТУ Lorenzo в сентябре 2007 г.: (а) – 22.09; (б) – 23.09; (в) – 24.09; (г) – 25.09; (д) – 26.09; (е) – 27.09. Время прихода тропической волны к Мексиканскому заливу 21 сентября. ТД – начало стадии тропической депрессии; ТШ – начало стадии тропического шторма; ТУ – начало стадии тропического урагана [Franklin, 2007].



**Рис. 3.** Динамика поля ОВА ( $Q$ ) в акватории Мексиканского залива в период, предшествующий зарождению тропического шторма Matthew в октябре 2004 г.: (а) – 03.10; (б) – 04.10; (в) – 05.10; (г) – 06.10; (д) – 07.10. Время прихода тропической волны к Мексиканскому заливу 3 октября. ТШ – начало стадии тропического шторма [Avila, 2004].



**Рис. 4.** Динамика поля ОВА ( $Q$ ) в акватории Мексиканского залива в период, предшествующий зарождения тропического шторма Colin в июне 2016 г.: (а) – 01.06; (б) – 02.06; (в) – 03.06; (г) – 04.06; (д) – 05.06; (е) – 06.06. ТШ – начало стадии тропического шторма [Pash, Penny, 2017].

кализацией в юго-западной части залива – зоне зарождения урагана Lorenzo.

*Зарождение тропического шторма Matthew, октябрь 2004 г.*

Тропический шторм Matthew образовался из тропической волны, которая прошла через западное побережье Африки 19 сентября 2004 г., и сформировался окончательно в юго-западной части Мексиканского залива 8 октября в точке 24.1° с.ш. 94.2° з.д. [Avila, 2004].

С помощью данных измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua (архив NSIDC) получены оценки пространственно-временной изменчивости ОВА в области 20.75°–28° с.ш. 97.75°–85.5° з.д. Мексиканского залива в период, предшествующий зарождению шторма Matthew 3–7 октября 2004 г. (рис. 3).

Из иллюстрации видно, что в результате прихода тропической волны в Мексиканском заливе образуется область с высоким содержанием водяного пара в атмосфере, которая последовательно перемещается в северо-западном направлении к району зарождения шторма.

*Зарождение тропического шторма Colin, июнь 2016 г.*

Происхождение тропического шторма Colin можно проследить до тропической волны, которая прошла у западного побережья Африки

27 мая 2016 г. и к 1 июня достигла Карибского моря [Pash, Penny, 2017]. Его окончательное формирование произошло 5 июня 2016 г. в южной области Мексиканского залива в точке 22.4° с.ш. 87.9° з.д.

Получены оценки пространственно-временной динамики ОВА  $Q$  в области 20.75°–28° с.ш. 97.75°–85.5° з.д. залива в период 1–6 июня 2016 г., предшествующий зарождению шторма Colin (рис. 4). Для этих целей использованы данные геопортала спутникового радиотепловидения (<https://fireras.su/tpw/Fields.aspx>) [Ермаков и др., 2013], полученные на основе измерений радиометра AMSR-2 спутника GCOM-W1.

Из иллюстрации видно, что при приближении тропической волны в Мексиканском заливе наблюдается аккумуляция атмосферного водяного пара в районе зарождения тропического шторма Colin.

Приведенные примеры спутникового мониторинга Мексиканского залива показывают, что в периоды, предшествующие зарождению урагана Lorenzo, штормов Matthew и Colin, под воздействием тропических волн происходила “накачка” атмосферы водяным паром, образовывались области с высокими значениями ОВА, перемещавшиеся в течение 5–6 сут в районы залива и ставшие очагами их образования. Данный эффект позволяет объяснить отмеченную

в [Гранков, 2021] тесную связь пространственных характеристик полей ОВА с процессами зарождения ТУ Bret, Humberto, Lorenzo, Katia в Мексиканском заливе.

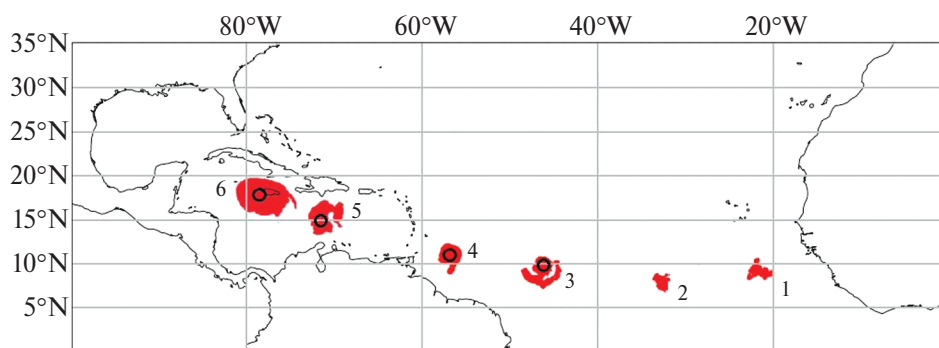
### ПОЛЯ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ КАК ИНДИКАТОРЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ТРОПИЧЕСКИХ ВОЛН В АТЛАНТИЧЕСКИЕ УРАГАНЫ

#### *Тропический ураган Ivan, сентябрь 2004 г.*

По данным оптических и ИК-изображений, полученных с геостационарных спутников GOES-12 и MODIS, ТУ Ivan образовался из тропической волны, которая прошла через западное побережье Африки 31 августа 2004 г., и сформировался окончательно в тропической зоне Атлантики 5 сентября в точке 9.5° с.ш. 43.4° з.д. [Stewart, 2011]. Ураган соответствует 5-й категории интенсивности по шкале Саффира–Симпсона с максимальной скоростью ветра 270 км/ч.

На основе данных архива NSIDC исследована пространственно-временная изменчивость ОВА в области 0°–35° с.ш. 0°–100° з.д. Атлантики в период времени от начальной стадии распространения тропической волны (1) (южнее островов Кабо-Верде) до зарождения ТУ Ivan (3) и его максимального развития (6) в Карибском море (рис. 5).

Рисунок 5 демонстрирует существование области в Атлантике с высоким содержанием водяного пара в атмосфере (свыше 60 кг/м<sup>2</sup>) и ее пространственные эволюции, которые совпадают с траекторией перемещения тропической волны от западного побережья Африки к району зарождения ТУ Ivan и далее – с траекторией его распространения, описанной в [Stewart, 2011].



**Рис. 5.** Трансформация тропической волны в ТУ Ivan, 2004 г.: 1 – 01.09, 2 – 03.09, 3 – 05.09, 4 – 07.09, 5 – 09.09, 6 – 11.09. Выделенные области характеризуются ОВА 60 кг/м<sup>2</sup> и выше. Кружки отражают пространственное положение глаза урагана в полуденное время суток. По данным радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua.

#### *Тропический ураган Bonnie, август 1998 г.*

Согласно данным оптических и инфракрасных съемок с геостационарного спутника GOES-8 ТУ Bonnie образовался из тропической волны, которая прошла через западное побережье Африки 14 августа 1998 г. и сформировался окончательно в тропической зоне Атлантики северо-восточнее о. Гаити 22 августа в точке 21.1° с.ш. 67.3° з.д. [Avila, 1998].

На основе данных измерений радиометров SSM/I спутников DMSP F11, F13, F14 (архив RSS – Remote Sensing System) исследована пространственно-временная изменчивость ОВА в области 0°–35° с.ш. 10°–80° з.д. Атлантики (рис. 6).

Рисунок 6 иллюстрирует перемещение области с высоким влагосодержанием атмосферы в тропической Атлантике (60–70 кг/м<sup>2</sup>), пространственные эволюции которой совпадают с траекторией перемещения тропической волны от западного побережья Африки к району зарождения ТУ Bonnie и далее – с траекторией его распространения, описанной в [Avila, 1998].

#### *Тропический ураган Frances, август–сентябрь 2004 г.*

По данным оптических и ИК-изображений с геостационарных спутников GOES-12 и MODIS ураган Frances сформировался 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) [Beven II, 2014].

На основе данных измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua (архив NSIDC)



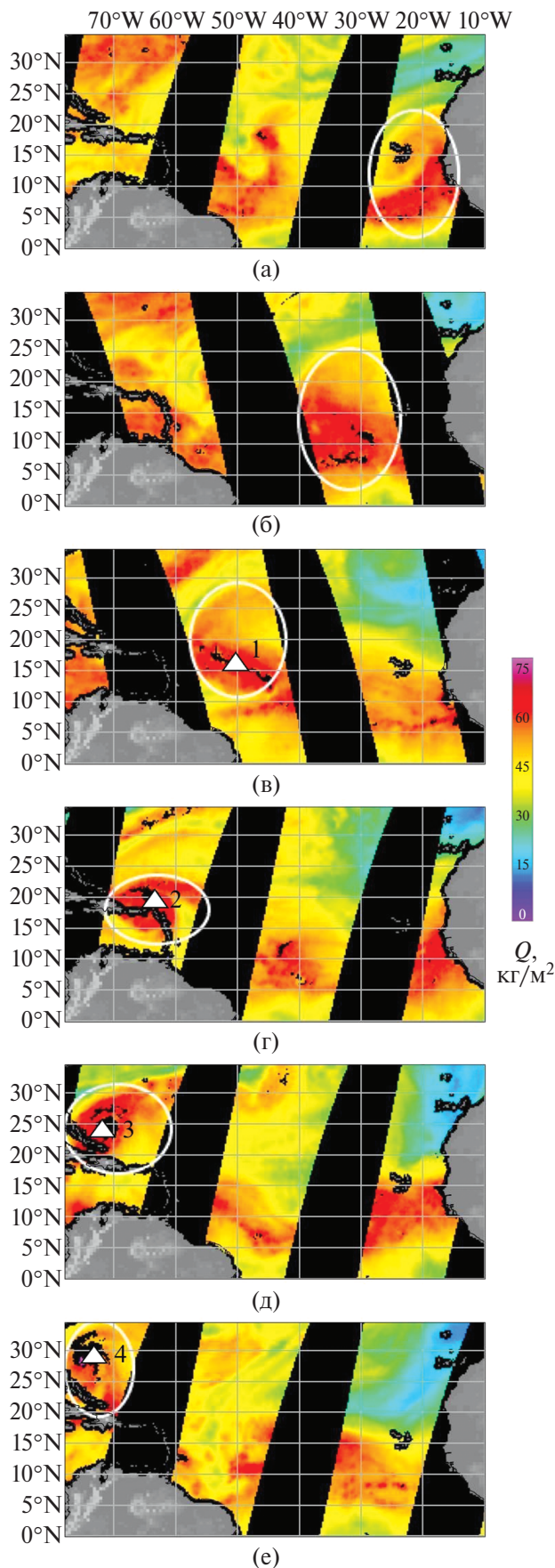
получены оценки пространственно-временной изменчивости общего влагосодержания атмосферы и скорости приводного ветра в области 0°–35° с.ш. 20°–100° з.д. Атлантики в период в период времени от начальной стадии распространения тропической волны до зарождения ТУ Frances и его максимального развития.

Выявлена область, характеризующаяся высокими значениями общего влагосодержания атмосферы (60 кг/м<sup>2</sup> и более) и скорости приводного ветра (более 25 м/с), перемещающаяся от западного побережья Африки к полуострову Флорида в период 27 августа – 3 сентября 2004 г. (рис. 7). Из иллюстрации следует, что траектория перемещения данной области в период 26–30 августа совпадают с траекторией перемещения тропической волны из Атлантики к району зарождения ТУ Frances, а далее – с траекторией его распространения, описанной в [Beven II, 2014].

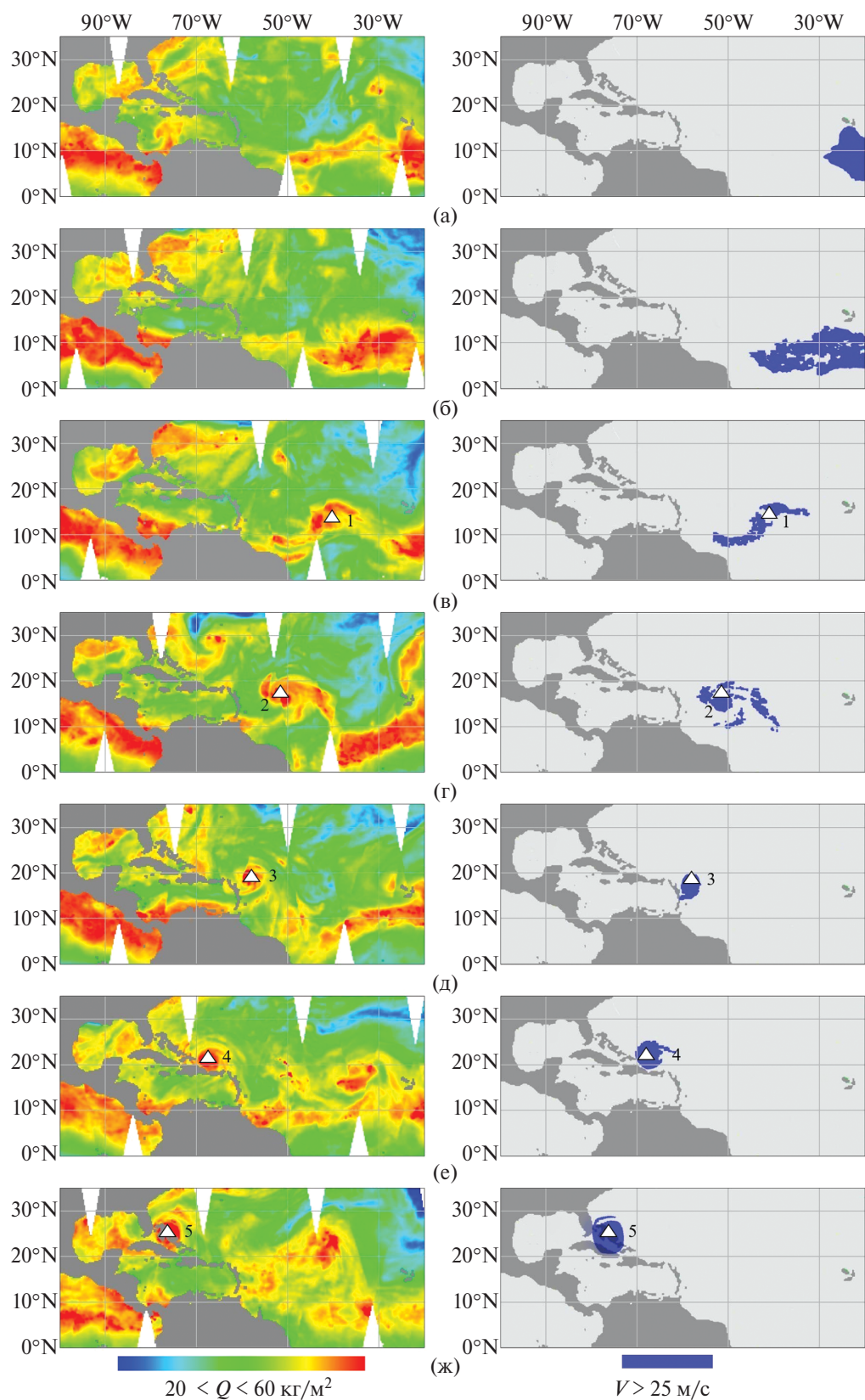
### ВЫВОДЫ

Приведенные результаты спутникового мониторинга Мексиканского залива показывают, что в периоды, предшествующие зарождению урагана Lorenzo, штормов Matthew и Colin, под воздействием тропических волн происходила “накачка” атмосферы водяным паром, образовывались области с высокими значениями ОВА, перемещавшиеся в течение 5–6 сут в районы залива, ставшие очагами возникновения данных тропических образований. Этот эффект объясняет отмеченную в [Гранков, 2021] тесную связь пространственных характеристик полей ОВА с процессами зарождения ТУ Bret, Humberto, Lorenzo, Katia в Мексиканском заливе.

На примерах историй возникновения и развития ТУ Ivan, Bonnie, Frances можно видеть, что данные спутниковых СВЧ-радиометрических измерений позволяют выделять зоны в тропической Атлантике с высоким содержанием водяного пара в атмосфере (60–70 кг/м<sup>2</sup>), траек-



**Рис. 6.** Эволюции поля ОВА ( $Q$ ) в тропической зоне Атлантики по данным измерений радиометров SSM/I спутников F11, F13, F14 на восходящих (A) и нисходящих (D) витках в период, предшествующий зарождению ТУ Bonnie: (а) – 15.08 (F14 D); (б) – 17.08 (F14 A); (в) – 19.08 (F11A); (г) – 21.08 (F13 D) и в период его развития: (д) – 23.08 (F14 D); (е) – 25.08 (F13D). 1 – тропическая депрессия; 2 – тропический шторм; 3, 4 – тропический ураган (по данным [Avila, 1998]). Слепые области (вне видимости радиометров) выделены черным цветом.



**Рис. 7.** Эволюция полей влажности атмосферы ( $Q$ ) и скорости приводного ветра ( $V$ ) в Атлантике по данным радиометра AMSR-E в период, предшествующий зарождению ТУ Frances: (а) – 22.08; (б) – 24.08 и его развития: (в) – 26.08; (г) – 28.09; (д) – 30.09; (е) – 01.09; (ж) – 03.09. 1 – тропический шторм; 2, 3, 4, 5 – тропический ураган (по данным [Beven II, 2014]). Белые клинообразные области – слепые зоны радиометра AMSR-E.



тории которых соответствуют определяемым по данным спутниковых оптических и инфракрасных съемок траекториям распространения тропических волн от западного побережья Африки к районам зарождения тропических ураганов. Результаты, показанные для ТУ Frances, свидетельствуют о том, что распространение тропической волны можно наблюдать не только в виде эволюций поля водяного пара атмосферы, но и поля скорости приводного ветра.

Во всех рассмотренных случаях траектории дальнейшего распространения областей с высокой локализацией водяного пара в атмосфере совпадают с приведенными в [Stewart, 2011; Avila, 1998; Beven II, 2014] траекториями развития ТУ Ivan, Bonnie, Frances (Best Track Positions), иллюстрирующими пространственно-временную динамику появления и перемещения зон минимального атмосферного давления и максимальной скорости ветра.

Полученные результаты указывают на важную роль трансатлантического переноса атмосферного водяного пара в процессах циклогенеза в Мексиканском заливе и Атлантике, а также на возможность использования его интегрального (общего) содержания в атмосфере в качестве индикатора траекторий распространения тропических волн.

Из рассмотренных примеров также следует, что спутниковый мониторинг атмосферного водяного пара позволяет проследивать происхождение зарождающихся в Мексиканском заливе и тропической Атлантике ураганов и штормов до восточных африканских волн, что расширяет потенциальные возможности раннего прогнозирования их возникновения. При этом следует считать преждевременным использование общего влагосодержания атмосферы в качестве универсального и долговременного предиктора зарождения тропических ураганов и штормов, поскольку восточные африканские волны не во всех случаях приводят к их образованию; наблюдаются и альтернативы, когда финальным результатом их активности является возникновение лишь тропических депрессий.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гранков А.Г.* О связи полей влажности атмосферы в Мексиканском заливе с процессами зарождения и развития ураганов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 4. С. 495–506.
- Гранков А.Г., Мильшин А.А., Новичихин Е.П.* Спутниковая СВЧ-радиометрия тепловых и динамических процессов на поверхности океана и в атмосфере. М.: Российская Академия наук, 2022. 240 с.
- Ермаков Д.М., Раев М.Д., Чернушич А.П., Шарков Е.А.* Алгоритм построения глобальных радиотепловых полей системы океан–атмосфера высокой пространственно-временной дискретизации по спутниковым микроволновым измерениям // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 72–82.
- Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В.* Повышенное содержание водяного пара в атмосфере тропических широт как необходимое условие генезиса тропических циклонов // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 73–82.
- Avila L.A.* Tropical Cyclone Report: Tropical Hurricane Bonnie 19–30 August 1998. Miami: National Hurricane Center 24 October 1998.
- Avila L.A.* Tropical Cyclone Report: Tropical Storm Matthew 8–10 October 2004. Miami: National Hurricane Center 17 November 2004.
- Beven II J.L.* Tropical Cyclone Report: Hurricane Frances, 25 August – 8 September 2004. Miami: National Hurricane Center (Updated 12 April 2005, 9 September and 6 November 2014).
- Ermakov D.* Satellite radiothermography of atmospheric processes: method and applications. Springer: Chaim, 2021. 199 p.
- Franklin J.L.* Tropical Cyclone Report: Hurricane Lorenzo, 22–28 September 2007. Miami: National Hurricane Center, 18 October 2007.
- Pasch R.J., Penny A.B.* Tropical Cyclone Report: Tropical Storm Colin 5–7 June 2016. Miami: National Hurricane Center, 17 January 2017.
- Stewart S.R.* Tropical Cyclone Report: Tropical Hurricane Ivan 2–12 September 2004. Miami: National Hurricane Center 16 December 2004 (Updated 27 May 2005 and 11 August 2011).
- Thorncroft C., Hodges K.* African easterly wave variability and its relationship to Atlantic tropical cyclone activity // J. Climate. 2001. V. 14. P. 1166–1179.

## **Application of Satellite Microwave Radiometric Methods to Analyze the Relationship of Tropical Cyclogenesis with Water Vapor Transport in the Atlantic**

**A. G. Grankov<sup>1, \*</sup>, E. P. Novichikhin<sup>1</sup>, N. K. Shelobanova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino Branch, pl. akad. Vvedenskogo, 1, Fryazino, Moscow oblast, 141190 Russia*

*\*e-mail: agrankov@inbox.ru*

Some possibilities of using microwave radiometric measurements from the EOS Aqua and GCOM-W1 satellites to study the influence of tropical waves in the Atlantic on cyclogenesis processes in the Gulf of Mexico by monitoring the spatial and temporal variability of water vapor fields in the Gulf are illustrated. Examples of the use of satellite images of atmospheric humidity fields obtained from DMSP and EOS Aqua satellites are given to demonstrate the processes of transformation of tropical waves into Atlantic hurricanes Bonnie (1998), Frances (2004), Ivan (2004).

**Keywords:** Gulf of Mexico, tropical waves, tropical hurricanes, water vapor, satellite microwave radiometry