

**Анализ реакции характеристик атмосферы на зарождение ураганов в Мексиканском заливе на основе данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений**

А.Г. Гранков, А.А. Мильшин

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
141190 Фрязино Московской области, пл. Введенского, д. 1  
E-mail: agrankov@inbox.ru

*Развивается подход к изучению процессов зарождения ураганов в Мексиканском заливе, основанный на анализе истории формирования группового (усредненного над акваторией залива) отклика яркостной температуры в спектральной области резонансного излучения водяного пара атмосферы. Подтверждается установленная ранее для ураганов Humberto и Lorenzo связь синоптических историй тропических образований с временной динамикой пространственной дисперсии поля общего влагосодержания атмосферы в Заливе на примерах более мощных ураганов Bret и Katia. Оцениваются показатели полноты пространственного и регулярности временного обзора Мексиканского залива для различных вариантов комбинирования спутников DMSP и EOS Aqua.*

*Ключевые слова: зарождение ураганов, Мексиканский залив, спутниковые наблюдения, СВЧ-радиометрия.*

*An approach to the study of the processes of hurricane origination in the Gulf of Mexico is developed, based on the analysis of the history of the formation of the group (averaged over the Gulf) response of the brightness temperature in the spectral region of the resonant radiation of atmospheric water vapor. The connection of the synoptic histories of tropical formations with the temporal dynamics of the spatial dispersion of the field of the total atmospheric moisture content in the Gulf, established earlier for hurricanes Humberto and Lorenzo is confirmed by the examples of more powerful hurricanes Bret and Katia. The indicators of completeness of the spatial and regularity of the time survey of the Gulf of Mexico for various options for combining the DMSP and EOS Aqua satellites are evaluated.*

*Keywords: hurricane origin, Gulf of Mexico, satellite observations, microwave radiometry.*

**Реакция поля общего влагосодержания атмосферы в Мексиканском заливе на зарождение ураганов**

Анализ поведения характеристик атмосферы и океана в зонах активности тропических ураганов (ТУ) на стадиях их зарождения и развития является актуальной задачей; для этого создана, например, специальная сеть наблюдательных станций в акватории основного и регулярного «поставщика» ТУ для южного и восточного побережий США – Мексиканском заливе.

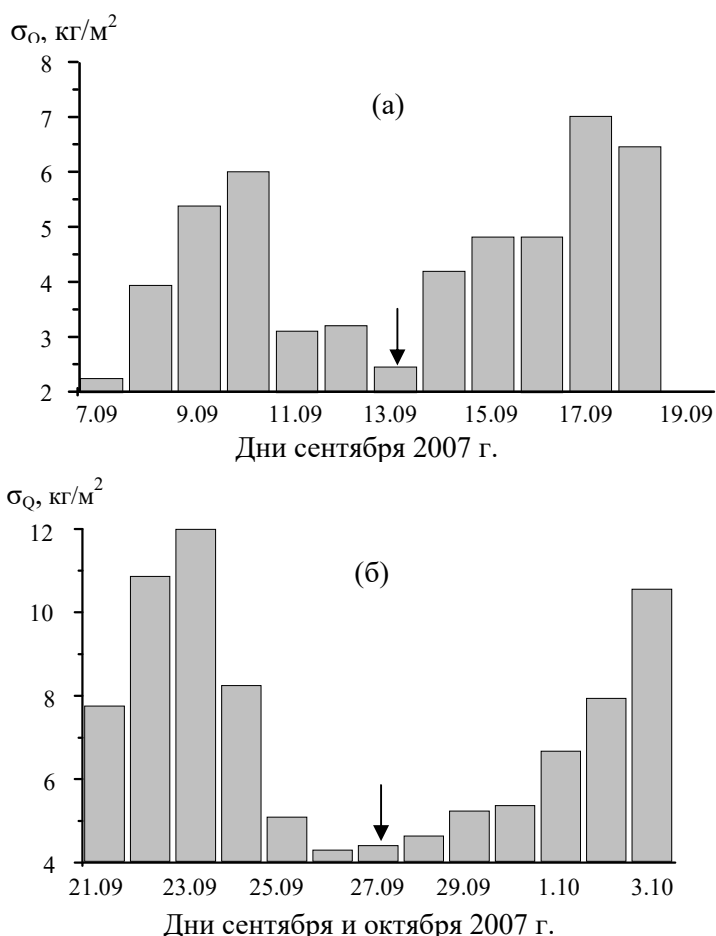
В нашем исследовании основное внимание сосредоточено на местных ураганах, зародившихся в акватории Мексиканского залива, а не пришедших сюда из Карибского моря, либо Атлантики уже в зрелой форме.

Согласно данным National Hurricane Center в перечень ураганов, зародившихся в акватории Мексиканского залива в период 1995-2017 гг. входят ТУ Danny (70), Earl (85), Bret (125), Gabrielle (70), Erica (65), Humberto (80), Lorenzo (70), Nate (65), Katia (90), – в скобках указаны максимальные значения скорости ветра в морских узлах. Таким образом, в этот период в заливе зародились лишь 9 ураганов, в то время как число пришедших ТУ, обрушившихся на побережья США и Мексики в этот период, исчисляется несколькими десятками. В период май-октябрь 2007 года в заливе наблюдалось 14 тропических ураганов и штормов, но 10 из них имели очаги возникновения в Атлантическом океане, либо в Карибском море.

Уступая последним в интенсивности (балльности по шкале Саффира-Симпсона), местные ураганы оставляют мало времени местным службам на предупредительные меры, т.к. время их распространения от очагов возникновения к суше составляет от двух до нескольких суток.

Еще одной важной причиной особого интереса к ураганам, зародившимся в Мексиканском заливе, может служить наше предположение о том, что изучение именно этой категории ТУ позволит достичь лучшего понимания локальных (а не глобальных) механизмов их появления в океане и прогресса в разработке технологий их раннего обнаружения.

В настоящее время нами развивается подход к изучению процессов зарождения ураганов в Мексиканском заливе, основанный на анализе метеорологических полей и полей яркостной температуры с помощью архивов NISDC (National Snow & Ice Data Center) и RSS (Remote Sensing Systems). Полученные в [1, 2] результаты указывают на существование кооперативного эффекта в отклике яркостной температуры в спектральной области резонансного излучения водяного пара атмосферы на зарождение урагана Humberto, т.е. участия в его формировании обширных областей Мексиканского залива, прилегающих к очагам их возникновения. Результаты анализа метеорологических полей по данным спутниковых СВЧ-радиометрических измерений [2, 3] показывают общую для ураганов Humberto и Lorenzo особенность – усиление в течение нескольких дней пространственной дисперсии общего влагосодержания атмосферы (ОВА) над акваторией Мексиканского залива и дальнейшее ее ослабление перед финальной стадией – появлением урагана (рис. 1)[2, 3].



**Рис. 1. Стандартные отклонения общего влагосодержания атмосферы  $\sigma_Q$  от среднесуточных значений в Мексиканском заливе в периоды зарождения и развития ТУ**

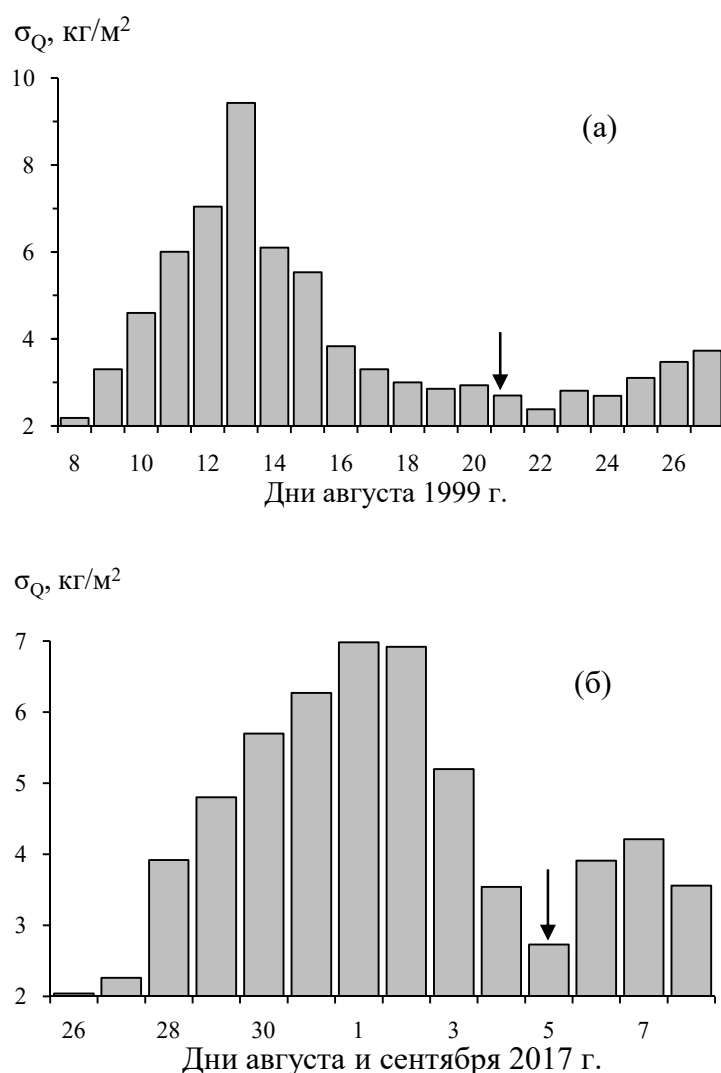
**Humberto (a) и Lorenzo. Стрелками отмечены моменты перехода тропических образований в стадию урагана [2, 3].**

**По данным радиометра AMSR-Еспутника EOAAqua (архив NSIDC).**

С целью валидации этих результатов получены аналогичные оценки для наиболее мощных ураганов, зародившихся в Мексиканском заливе в период с 1995 по 2017 гг.: ТУ Bret [4] и Katia [5] (рис. 2).

Для анализа пространственно-временной динамики общего влагосодержания атмосферы в заливе используются данные измерений со всех спутников, оснащенных СВЧ-радиометрической аппаратурой, проводивших съемку в периоды активности данных ураганов:

- спутников DMSPF11, F13, F14 в период активности ТУ Bret в августе 1999 г.;
- спутников F15, F17, EOAAqua в период активности ТУ Katia в августе-сентябре 2017 г.



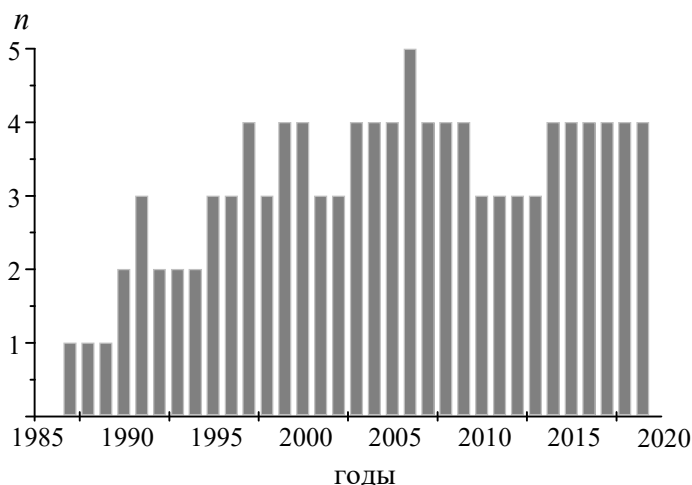
**Рис. 2. Стандартные отклонения общего влагосодержания атмосферы  $\sigma_Q$  от среднесуточных значений в Мексиканском заливе в период зарождения и развития ТУ Bret (a) и Katia (б). Стрелкой отмечен момент перехода тропического образования в стадию урагана.**

При сравнении результатов для ТУ, приведенных на рис. 1 и 2, можно наблюдать общие черты во временной изменчивости дисперсии ОВА: 1 – значимый (на 5–8 кг/м<sup>2</sup>) всплеск пространственной дисперсии ОВА в заливе за несколько суток до зарождения ураганов; 2 – «затишье» (минимум) дисперсии ОВА в заливе (вариации в пределах 2.3–2.8 кг/м<sup>2</sup>) при переходе тропического образования в стадию урагана.

#### **Анализ показателей полноты пространственного и регулярности временного обзора Мексиканского залива различными спутниковыми группировками**

В настоящее время для глобального обзора поверхности Земли и атмосферы широко используются спутники полярно-орбитального типа (DMSP, EOS Aqua, ряд других), особенностью которых является наличие слепых зон, образующихся в результате расхождения полос сканирования в нижних широтах. Наличие пропусков данных при спутниковом мониторинге тропических ураганов может приводить к искажениям картины их развития; эффективным путем борьбы с ними может служить использование данных измерений одновременно с нескольких спутников. К примеру, с помощью данных СВЧ-радиометрических измерений со спутников F11, F13, F14 DMSP удается получить лишь приближенное представление о характере эволюций яркостной температуры и о диапазоне ее изменений на некоторых стадиях развития тропического урагана Bret, в то время как при одновременной обработке этих данных можно воссоздать цельную картину его трансформации на разных стадиях [6].

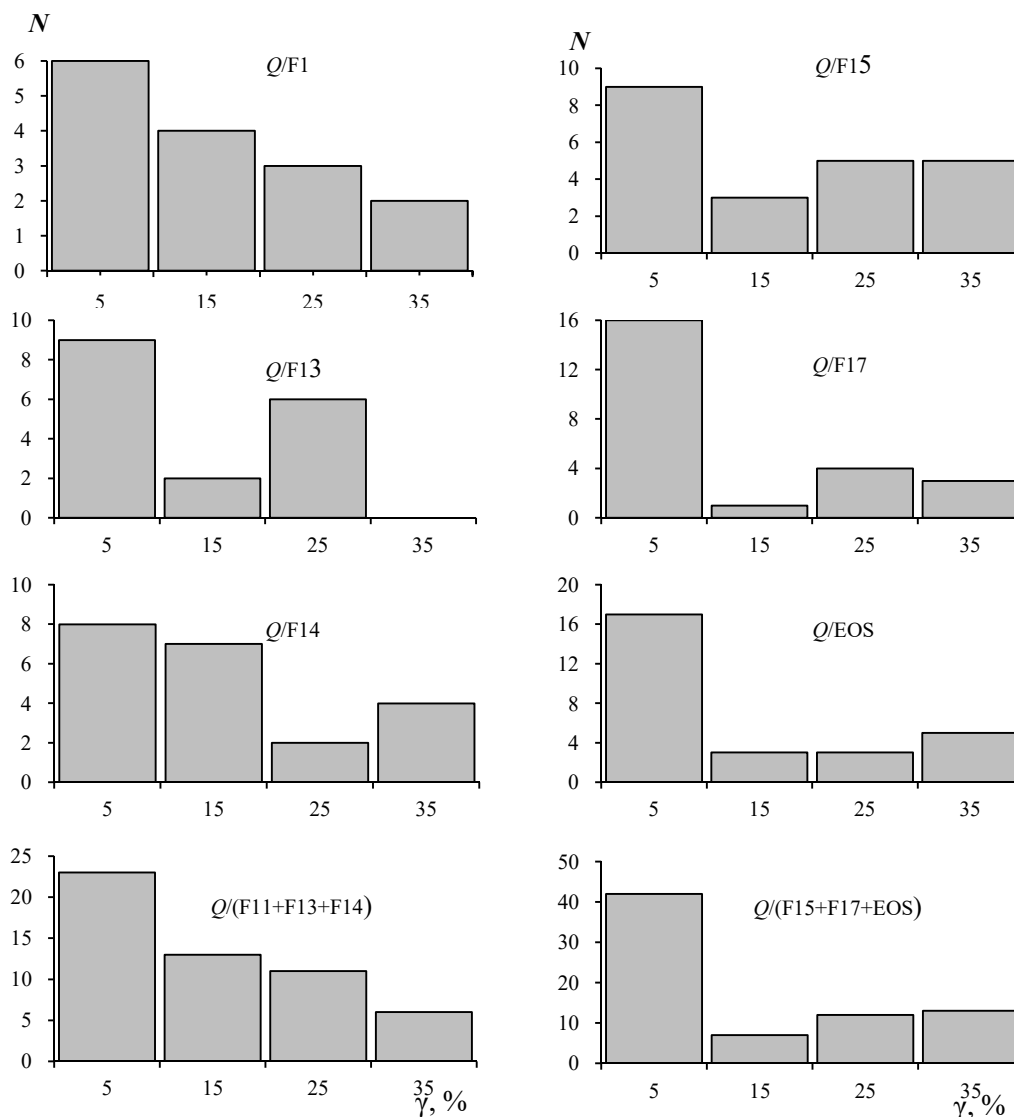
Анализ хронографии СВЧ-радиометрических съемок со спутников DMSP (радиометры SSM/I и SSMIS) показывает, что возможность их комплексного использования для повышения частоты мониторинга тех или иных участков поверхности Земли и атмосферы расширялась от одного до трех сеансов в период 1987–1996 гг. до трех-четырех в последующие годы (рис. 3). Дальнейшее увеличение числа сеансов может быть достигнуто путем расширения объема данных измерений за счет радиометров AMSR-E, AMSR-2 спутника EOS Aqua и радиометра MTB3A-GЯ отечественных спутников серии Метеор-М.



**Рис. 3. Максимальное число спутников DMSP, которое может быть использовано для проведения одновременных измерений в разные годы.**

Проведен анализ показателей полноты пространственного и регулярности временного обзора общего влагосодержания атмосферы в Мексиканском заливе спутниками F11, F13, F14 в период активности ТУ Bret в августе 1999 г. и спутниками F15, F17, EOS Aqua в период активности ТУ Katia в августе-сентябре 2017 г.

Получены оценки частоты появления слепых зон (лакун) и их размеров в области  $21.75^{\circ}$ – $28^{\circ}$ с.ш.,  $85.5^{\circ}$ – $97.75^{\circ}$  Мексиканского залива; для данной области, покрывающей значительную часть залива, сформированы массивы данных в виде матриц  $42 \times 26$ , элементами которой являются среднесуточные значения ОВА в пространственных ячейках  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  (рис. 4). Данный формат представления данных распространен в архивах NSIDC, RSS и используется нами для анализа пространственно-временной изменчивости общего влагосодержания атмосферы в Мексиканском заливе.



**Рис. 3.** Связь частоты появления слепых зон в Мексиканском заливе  $N$  с их относительными размерами  $\gamma$  при зондировании ОВА со спутников F11, F13, F14 в период 8.08–31.08 1999 г. и со спутников F15, F17, EOS Aqua 25.08–10.09 2017 г.  $\gamma$  – отношение площади области с лакунами к общей площади обзора в заливе.

Верхний предел рассматриваемых изменений относительной площади слепых зон ограничен порогом  $\gamma = 40\%$ , выше которого теряется доверие к надежности восстановления (интерполяции) значений ОВА в областях с лакунами.

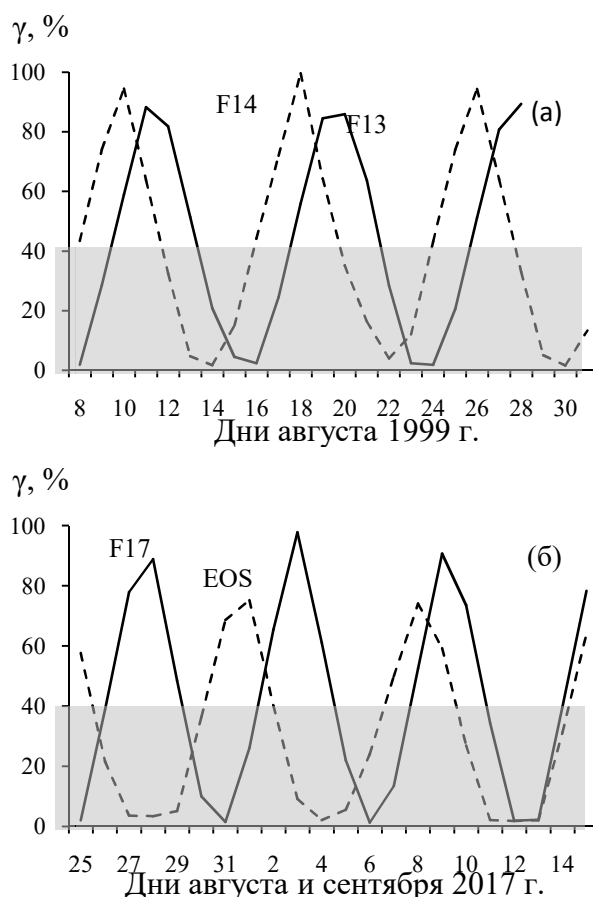
Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Увеличение числа спутников от одного до трех приводит к снижению числа слепых зон в 2.5–3.5 раза при наблюдения за развитием ураганов Bret и Katia.

2. Число информативных (неслепых) зон в Мексиканском заливе за 17-дневный период наблюдений за развитием ТУ Катияспутниками F15, F17, EOSAqua в 1.4 раза больше, чем за 24-дневный период наблюдений за развитием ТУ Bret спутниками F11, F13, F14.

Следует отметить, что для спутников F15, F17, EOSAqua в режиме одиночного обзора частота появления слепых зон в Мексиканском заливе в ~1.5 раза ниже этого показателя для спутников F11, F13, F14.

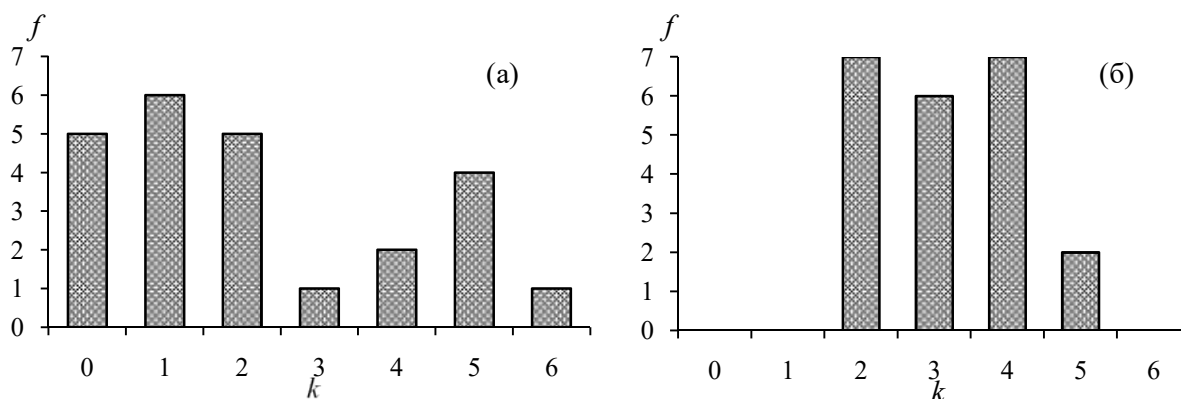
Рис. 4 иллюстрирует временную изменчивость относительных размеров слепых зон в Мексиканском заливе при мониторинге общего влагосодержания атмосферы в заливе в периоды активности урагана Bret со спутников F13, F14 и урагана Katia со спутников F17, EOSAqua.



**Рис. 4. Изменчивость относительных размеров слепых зон  $\gamma$  в Мексиканском заливе при зондировании ОВА на нисходящих витках спутников F13, F14 (а) и F17, EOSAqua (б).**

Из иллюстрации видно, что в обоих случаях зоны доступа к данным об ОВА чередуются со слепыми зонами; наименьшие потери данных об ОВА в слепых зонах (наименьшее время превышения уровня  $\gamma = 40\%$ ) среди других спутников обеспечивает спутник EOSAqua.

Рис.5 дает представление о важном критерии эффективности использования спутникового мониторинга общего влагосодержания атмосферы в Мексиканском заливе – максимальном числе зондирований ОВА в сутки в периоды развития ТУ Bret и Katia.



**Рис. 5. Частота случаев  $f$  с числом  $k$  спутниковых зондирований ОВА за сутки в Мексиканском заливе: (а) – в период 8-31.08 1999 г. со спутников F11, F13, F14; (б) – в период 25.08.2017-15.09 2017 г. со спутников F15, F17, EOSAqua.**

Здесь можно выделить несколько результатов:

1. Частота зондирования ОВА над Мексиканским заливом со спутников F11, F13, F14 или F15, F17, EOSAqua не превышает 5–6 сеансов в сутки. Достижению предельного показателя (9 сеансов в сутки при измерениях с 3-х спутников на восходящих и нисходящих витках) препятствует наличие слепых зон в этой области.
2. Наличие слепых зон проявляется особенно сильно при использовании группировки спутников F11, F13, F14, где можно наблюдать случаи одноразовых суточных сеансов (6 из 24-х дней наблюдений) и даже их пропусков (5 из 24-х дней).
3. При использовании группировки спутников F15, F17, EOSAqua основная часть зондирований ОВА (20 из 22-х дней) осуществлялась с регулярностью 2–4 сеанса в сутки.

Следует отметить, что помимо ограничений во временном разрешении (частоте) наблюдений, свойственных орбитальным спутникам, существует еще одно, связанное с наличием различного рода помех, которые служат причиной отсутствия (отбраковки) данных спутниковых измерений; среди них выделяются следующие [7, 8]:

- близость суши;
- мощные осадки;
- солнечное радиоизлучение;
- промышленные и телекоммуникационные радиопомехи.

### **Заключение**

Основной результат проведенного нами исследования заключается в определении роли пространственной дисперсии поля общего влагосодержания атмосферы над Мексиканским заливом в качестве характеристики процессов развития местных ураганов. Возможно, такой подход позволит достичь лучшего понимания локальных (не внешних, глобальных) механизмов их появления в океане, а также прогресса в разработке технологий их раннего обнаружения в заливе.

Современные орбитальные спутниковые СВЧ-радиометрические средства обладают необходимым потенциалом для решения этой задачи. Их траекторные ограничения можно преодолеть путем группирования данных отдельных измерений, обеспечив достаточное временное разрешение для анализа развития тропических ураганов в Мексиканском заливе.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием № 0030-2019-0008 (шифр «Космос»).

## Литература

1. Гранков А.Г. Об отклике влажностных характеристик атмосферы в Мексиканском заливе на зарождение тропических циклонов Humberto и Lorenzo по данным спутниковых СВЧ-радиометрических измерений / Под ред. Мкртчяна Ф.А. Доклады МНТОРЭС им. А.С. Попова. Материалы Международного симпозиума. Вып. XIV. Сер.: Проблемы экоинформатики. МНТОРЭС. 2020. С.200-204.
2. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Новичихин Е.П., Шелобанова Н.К. О связи радиоизлучения в области поглощения водяного пара атмосферы с характеристиками тропических ураганов на разных стадиях их развития. Известия вузов // Радиофизика, 2020, LXIII, №3. С. 228-239.
3. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Новичихин Е.П., Шелобанова Н.К. Анализ связи радиотепловых и метеорологических полей с процессами зарождения и развития ураганов в Мексиканском заливе // Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2021 (в настоящем сборнике).
4. Lawrence M.B., Kimberlain T.B. // Tropical Cyclone Report: Hurricane Bret, 18-25 August 1999. Miami: National Hurricane Center (Revised 26 February 2001).
5. Avila L.A. // Tropical Cyclone Report: Hurricane Katia, 5-9 September 2017. Miami: National Hurricane Center, 14 February 2019.
6. Гранков А.Г., Мильшин А.А. О влиянии регулярности спутниковых СВЧ-радиометрических измерений на точность воспроизведения яркостной температуры в циклонических зонах океана // Метеорология и гидрология, 2021 (в печати).
7. Wentz F. J. SSM/I Version-7 Calibration Report, report number 011012, Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA, 2013, 46 p.
8. Li-Li, Njoku E.G., Im. E, Chang P.S., German K. St.A Preliminary Survey of Radio-Frequency Interference Over the U.S. in Aqua AMSR-E Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, Vol. 42, No. 2, P. 380-390.