

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ПОЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ В ЗОНАХ ЗАРОЖДЕНИЯ УРАГАНОВ

© 2022 г. А. Г. Гранков<sup>а</sup>, \*, А. А. Мильшин<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 10.12.2021 г.

После доработки 31.01.2022 г.

Принята к публикации 04.02.2022 г.

Проведен анализ показателей полноты пространственного и регулярности временного обзора полей влажности атмосферы в Мексиканском заливе на основе данных, полученных полярно-орбитальными спутниками DMSP и GCOM-W1 в периоды зарождения и развития тропических ураганов Bret и Katia в заливе. Получены оценки размеров и частоты появления слепых зон (лакун) при мониторинге общего влагосодержания атмосферы, образующихся в результате расхождения полос сканирования СВЧ-радиометров спутников F11, F13, F14 в период активности урагана Bret и спутников F15, F17, GCOM-W1 в период активности урагана Katia. Приведены данные, иллюстрирующие улучшение показателей обзора полей влажности атмосферы при переходе от одиночных к групповым спутниковым измерениям.

DOI: 10.31857/S0033849422060092

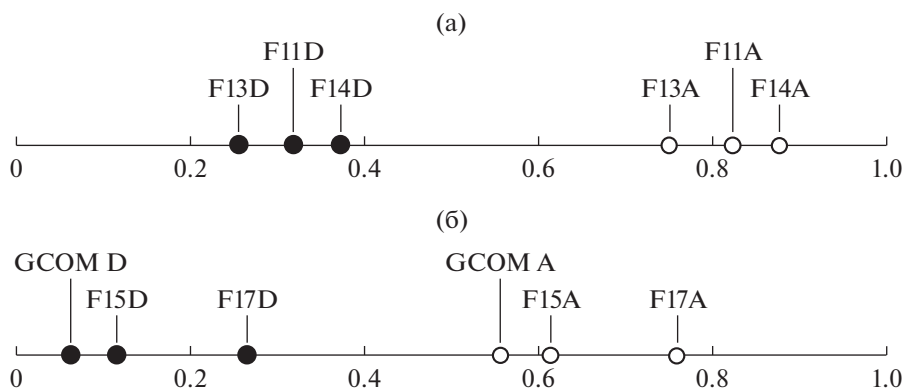
### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для глобального обзора поверхности Земли и атмосферы широко используются спутники полярно-орбитального типа (DMSP, GCOM-W1, Метеор-М и ряд других), особенностью которых является наличие слепых зон, образующихся в результате расхождения полос сканирования в нижних широтах. Появление пропусков данных измерений яркостной температуры (либо результатов их тематической обработки) при спутниковом мониторинге тропических ураганов (ТУ) может приводить к искажениям картины их зарождения и развития, а эффективным путем борьбы с ними может служить использование данных измерений одновременно с нескольких спутников. Например, с помощью данных СВЧ-радиометрических измерений со спутников F11, F13, F14 DMSP удается получить лишь приближенное представление о характере эволюций поля яркостной температуры и о диапазоне ее изменений на некоторых стадиях развития ТУ Bret, в то время как при одновременной обработке этих данных можно воссоздать цельную картину его трансформации на разных стадиях [1]. Качество (полнота и детальность) количественного описания глобальных полей яркостной температуры и геофизических параметров, которое зависит от

пространственного разрешения радиометров и траекторных характеристик спутников, может быть улучшено с помощью специальных алгоритмов пространственно-временной интерполяции данных групповых спутниковых измерений [2, 3].

В данной работе анализируются показатели регулярности временного и полноты пространственного локального мониторинга среднесуточных значений общего влагосодержания атмосферы (ОВА) в Мексиканском заливе радиометрами SSM/I (Scanning Sensor Microwave Imager) и SSMIS (Special Sensor Microwave Imager Sounder) спутников DMSP и радиометром AMSR 2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer) спутника GCOM-W1, функционировавших в периоды активности в заливе ТУ Bret и Katia. Данные показатели играют важную роль при анализе коллективного отклика поля общего влагосодержания атмосферы над акваторией залива на процессы зарождения и развития ураганов [4].

Полученные результаты иллюстрируют картину видимости полей ОВА с отдельных спутников *in situ* (без привлечения специальных алгоритмов коррекции данных спутниковых измерений) и демонстрируют возможности улучшения ее полноты при использовании групповых наблюдений.



**Рис. 1.** Время пересечения экватора (в долях суток) спутниками F11, F13, F14 в 1999 г. (а) и спутниками F15, F17, GCOM в 2017 г. (б) на восходящих (А) и нисходящих (D) витках (время полета к районам зарождения ТУ Bret и Katia от экватора (6–7 мин) не учитывается; внесены поправки на зависимость времени пересечения экватора от сроков эксплуатации спутников к моменту съемок ураганов).

### 1. ПРИМЕРЫ РЕГУЛЯРНОСТИ И ПОЛНОТЫ ОБЗОРА МЕКСИКАНСКОГО ЗАЛИВА СО СПУТНИКОВ DMSP И GCOM-W1

Рассмотрим возможности использования современных спутниковых СВЧ-радиометрических систем для мониторинга среднесуточных значений ОВА над Мексиканским заливом на примерах ураганов Bret (август 1999 г.) и Katia (август–сентябрь 2017 г.), чьи синоптические истории описаны в работах [5, 6]. Среди всех ураганов, зародившихся в заливе в период 1995–2020 гг., Bret выделяется наибольшей силой (скорость ветра до 230 км/ч), а Katia относится к числу ураганов, отмеченных техногенной катастрофой и приведших к необратимым изменениям термохалинной структуры и системы течений Мексиканского залива.

Для анализа среднесуточных значений общего влагосодержания атмосферы в заливе в периоды активности данных ураганов используются измерения, полученные со спутников, объединенных в две условные группы:

- со спутников DMSP F11, F13, F14 (радиометр SSM/I) в период активности ТУ Bret в августе 1999 г.;
- со спутников F15 (радиометр SSM/I), F17 (радиометр SSMIS), GCOM-W1 (радиометр AMSR 2) в период активности ТУ Katia в августе–сентябре 2017 г.

В первом случае спутники F11, F13, F14 были единственными средствами наблюдения за ТУ Bret; во втором – доступными для наблюдения за ТУ Katia являются также данные измерений радиометра WindSat спутника Coriolis и радиометра МТВЗА-ГЯ спутника Метеор-М № 2, которые в нашем анализе не использовались.

Рисунок 1 дает представление о количестве сеансов измерений в сутки и их регулярности, кото-

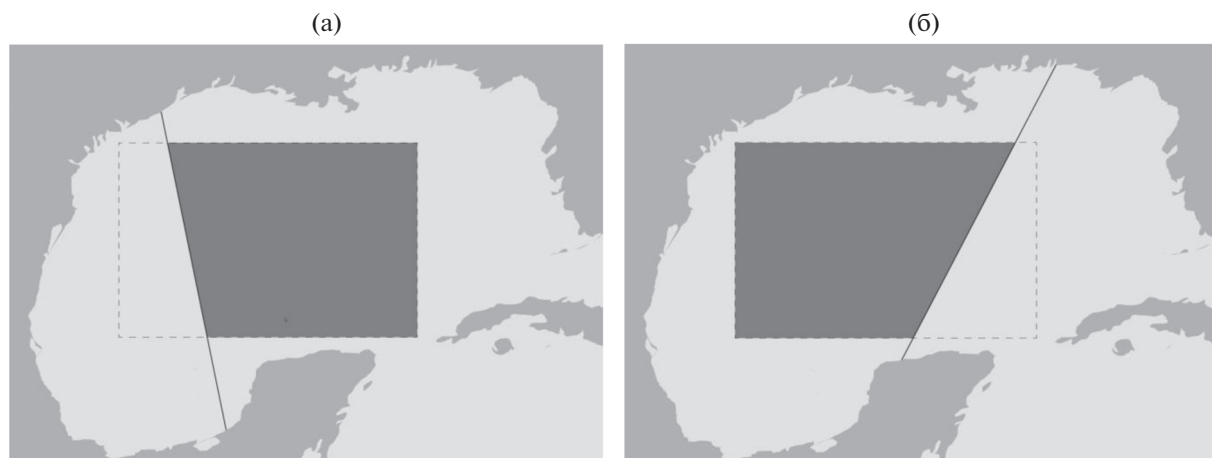
рые могут обеспечить выбранные нами спутники для мониторинга Мексиканского залива в периоды активности ТУ Bret и Katia.

Как видно из рисунка, при равном количестве сеансов измерений в сутки для обеих спутниковых группировок более высокая регулярность обзора залива обеспечивается группировкой спутников F15, F17, GCOM-W1.

Анализ характеристик пространственного обзора радиометров SSM/I, SSMIS, AMSR 2 показывает, что расхождение их полос сканирования в широтном поясе, характерном для Мексиканского залива, приводит к ярко выраженному эффекту возникновению слепых зон (лакун). Примером может служить рис. 2, иллюстрирующий слепые зоны в прямоугольной области залива (21.75°...28° с.ш., 85.5°...97.75° з.д.), наблюдаемые со спутников F13 и F15 при слежении за развитием ТУ Bret 16.08.1999 г. и Katia 05.09.2017 г. Данная область покрывает значительную часть Мексиканского залива и используется нами как своего рода полигон для изучения статистических характеристик пространственных полей общего влагосодержания атмосферы и общего водозапаса облаков и их связи с процессами зарождения и развития тропических ураганов [4].

Границами, разделяющими видимые и слепые области, являются линии – (проекции трасс спутников), положение которых определяется наклоном их орбит и характером движения спутников (восходящее или нисходящее).

Проведен анализ слепых и видимых зон, наблюдаемых при восстановлении полей общего влагосодержания атмосферы с различных спутников в области 21.75°...28° с.ш., 85.5°...97.75° з.д. Мексиканского залива при слежении за развитием



**Рис. 2.** Слепые (незатемненные) и видимые (затемненные) зоны Мексиканского залива в области интересов при обзоре спутником F13 (16 августа 1999 г.) на восходящем витке (а) и спутником F15 (5 сентября 2017 г.) на нисходящем витке (б); штриховая линия – область интересов, сплошная – трассы спутников.

ТУ Bret 16.08.1999 г. (рис. 3) и Katia 05.09.2017 г. (рис. 4). Исходными данными служат суточные значения ОВА, сгруппированные в виде матриц  $42 \times 26$  на пространственной сетке  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , взятые из архивов NSIDC (National Snow & Ice Data Center) RSS (Remote Sensing Systems) и JAXA Data Providing Service.

На приведенных рисунках обращает на себя внимание тот факт, что в ряде случаев (см. рис. 3д, 4г, 4е) форма и положение границ видимых областей отличаются от тех, которые обуславливаются траекторными характеристиками спутников. Это может быть связано с различного рода помехами, которые являются причиной отбраковки данных измерений яркостной температуры и продуктов их обработки в спутниковых архивах. К ним относятся: телекоммуникационные радиопомехи, мощная облачность и осадки, солнечное радиоизлучение. Перечисленные факторы приводят к дополнительному росту размеров пропусков (лакун) в спутниковых изображениях распределения ОВА над Мексиканским заливом.

Приведенные примеры показывает, что пропуски данных имеют место для существенной части акватории Мексиканского залива (в особенности для спутников F11, F13, F14), что может привести к сильным искажениям оценок общего влагосодержания атмосферы над его акваторией. Из данных наблюдений изменчивости полей ОВА в различные периоды деятельности ТУ Bret и Katia следует, что местоположение, размеры и частота появления лакун сильно меняются, более полное представление об этих характеристиках могут дать результаты статистического анализа.

## 2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ И ЧАСТОТЫ ПОЯВЛЕНИЯ СЛЕПЫХ ЗОН В ЗАЛИВЕ В ПЕРИОДЫ АКТИВНОСТИ ТУ BRET И КАТИА

Проведен статистический анализ показателей полноты пространственного и регулярности временного обзора общего влагосодержания атмосферы в Мексиканском заливе спутниками F11, F13, F14 и F15, F17, GCOM-W1.

Получены оценки частоты появления лакун и их размеров в области  $21.75^\circ \dots 28^\circ$  с.ш.,  $85.5^\circ \dots 97.75^\circ$  Мексиканского залива (рис. 5).

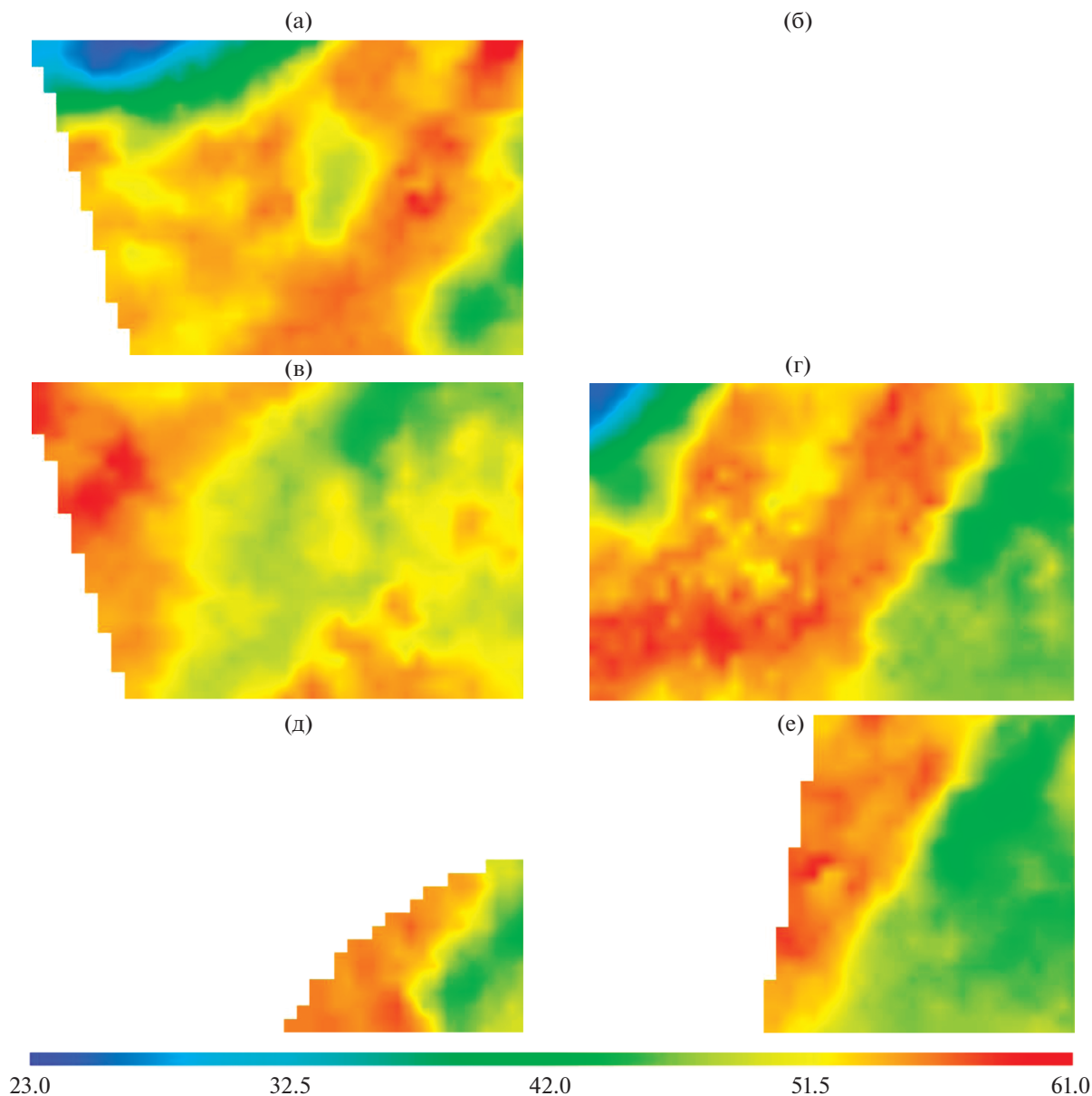
Верхний предел рассматриваемых изменений относительной площади лакун ограничен порогом  $\gamma = 40\%$ , выше которого, по нашим оценкам, теряется доверие к надежности восстановления суточных значений ОВА в областях с лакунами.

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы.

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

2. Число информативных (содержащих информацию о величине ОВА) зон в Мексиканском заливе за 17-дневный период наблюдений за развитием ТУ Katia спутниками F15, F17, GCOM-W1 в 1.4 раза больше, чем за 24-дневный период наблюдений за развитием ТУ Bret F11, F13, F14.

Следует отметить, что для спутников F15, F17, GCOM-W1 в режиме одиночного обзора частота появления лакун зон в Мексиканском заливе в ~1.5 раза ниже этого показателя для спутников F11, F13, F14.



**Рис. 3.** Видимые зоны распределения общего влагосодержания атмосферы (в  $\text{кг}/\text{м}^2$ ) в выделенной области Мексиканского залива при ее обзоре спутниками F11 (а, б), F13 (в, г), F14 (д, е) 16 августа 1999 г. на восходящих (слева) и нисходящих (справа) витках; время пересечения экватора спутниками указано на рис. 1. На рис. 3б, исследуемая область залива находится вне видимости спутника F11.

Рисунок 6 иллюстрирует изменчивость относительных размеров лагун в Мексиканском заливе при мониторинге ОВА в периоды активности урагана Bret со спутников F13, F14 и урагана Katia со спутников F17, GCOM-W1.

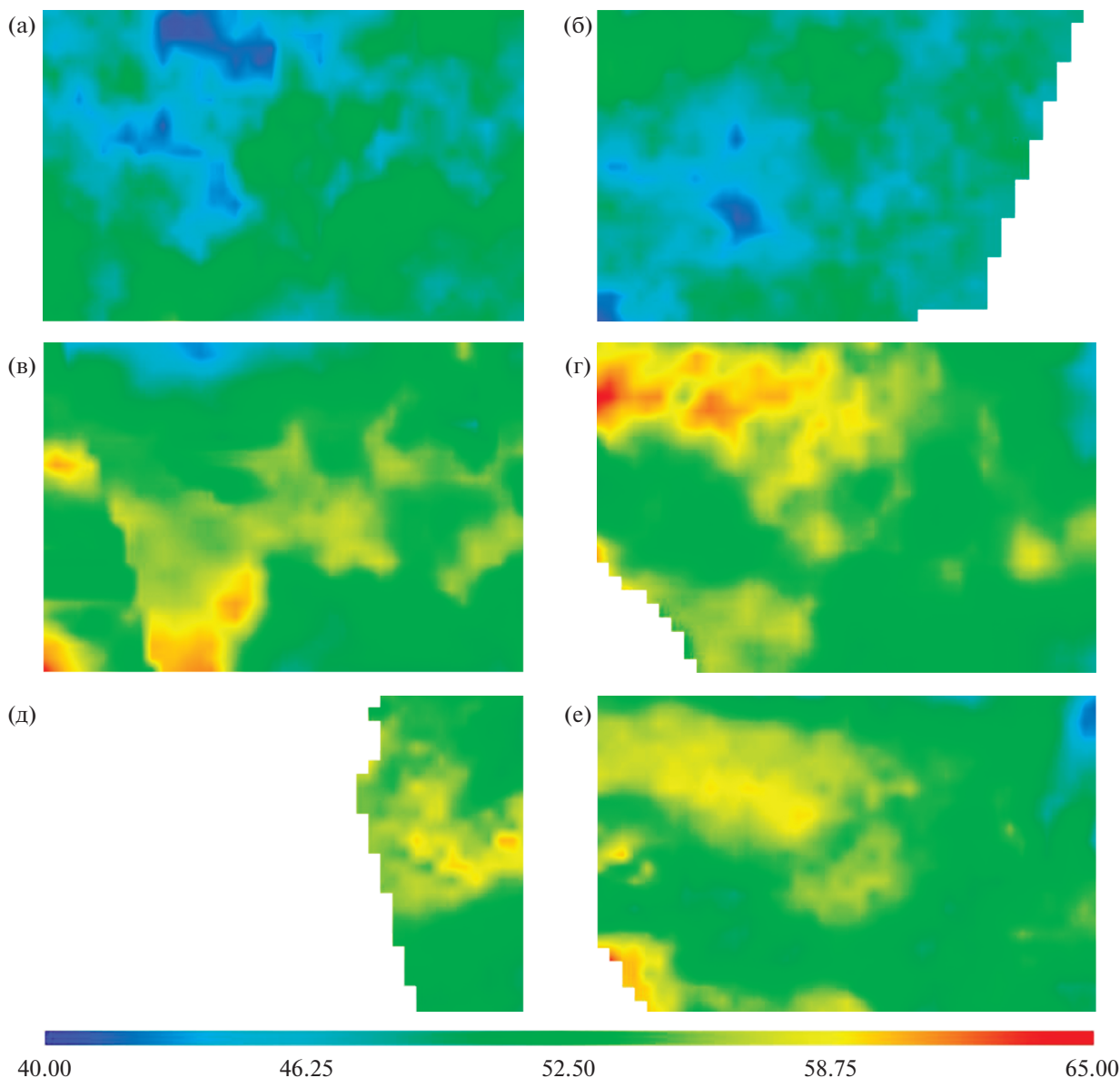
Из иллюстрации видно, что в обоих случаях видимые зоны чередуются с пропусками; наименьшие потери данных об ОВА в лагунах (наименьшее время превышения уровня  $\gamma = 40\%$ ) среди других спутников обеспечивает спутник GCOM-W1.

Рисунок 7 дает представление о важном критерии эффективности спутникового мониторинга

полей ОВА в Мексиканском заливе – максимальном числе зондирований в сутки в периоды развития TY Bret и Katia.

Отметим несколько наиболее значимых результатов.

1. Наличие лагун проявляется особенно сильно при использовании группировки спутников F11, F13, F14, здесь можно наблюдать случаи одноразовых суточных сеансов (6 раз в течение 24-х дней наблюдения) и даже их пропусков (5 раз в течение 24-х дней).



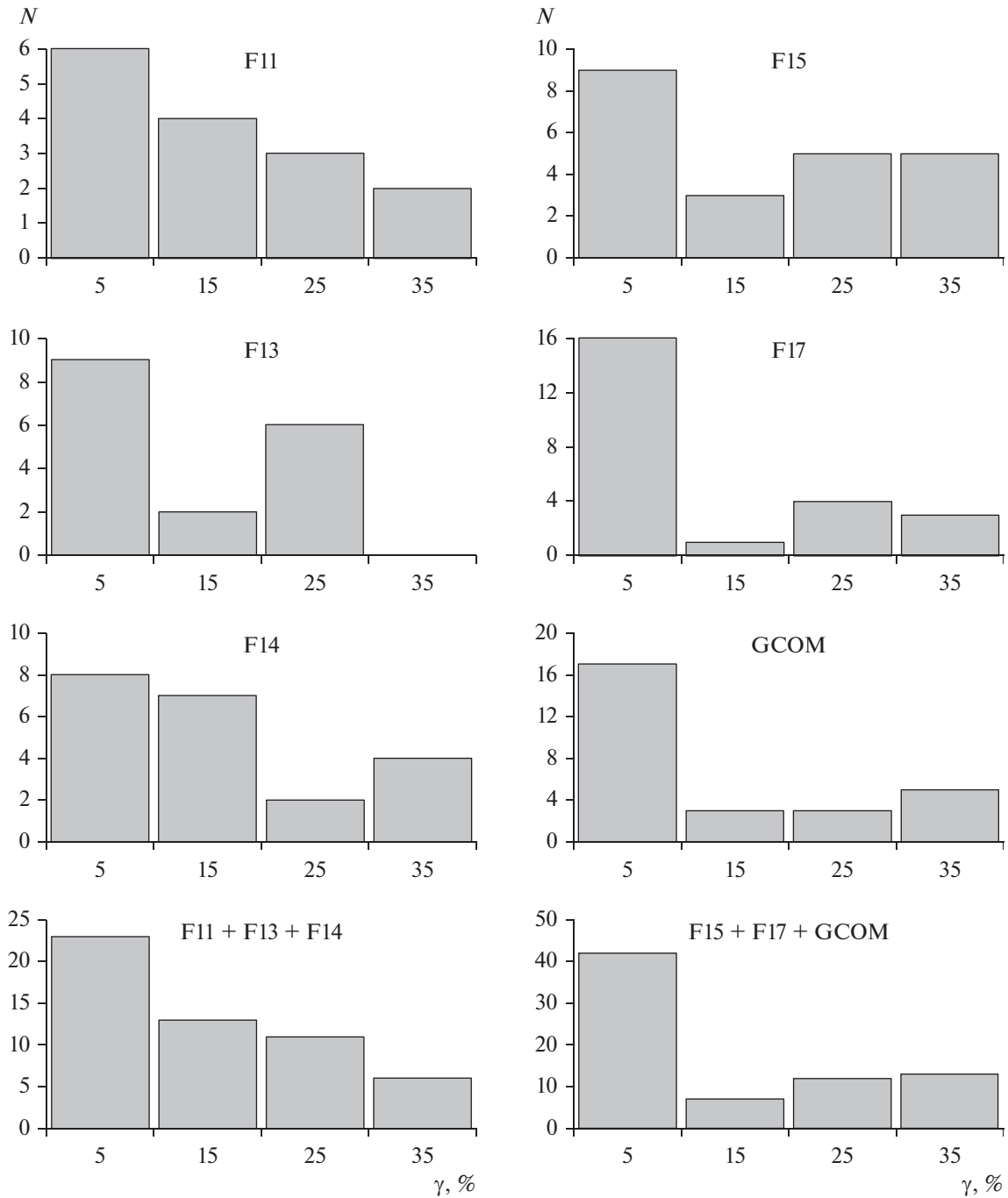
**Рис. 4.** Видимые зоны распределения общего влагосодержания атмосферы (в  $\text{кг}/\text{м}^2$ ) в выделенной области Мексиканского залива при ее обзоре спутниками F15 (а, б), F17 (в, г), GCOM (д, е) 5 сентября 2017 г. на восходящих (слева) и нисходящих (справа) витках. Время пересечения экватора спутниками указано на рис. 1.

2. При использовании группировки спутников F15, F17, GCOM-W1 для основной части зондирований ОВА (20 из 22-х дней) достигается регулярность два–четыре сеанса в сутки.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа выборочных данных о пространственном распределении общего влагосодержания атмосферы в Мексиканском заливе, полученных со спутников DMSP и GCOM-W1 в периоды зарождения и развития ураганов Bret и Katia, указывают на наличие слепых зон в изобра-

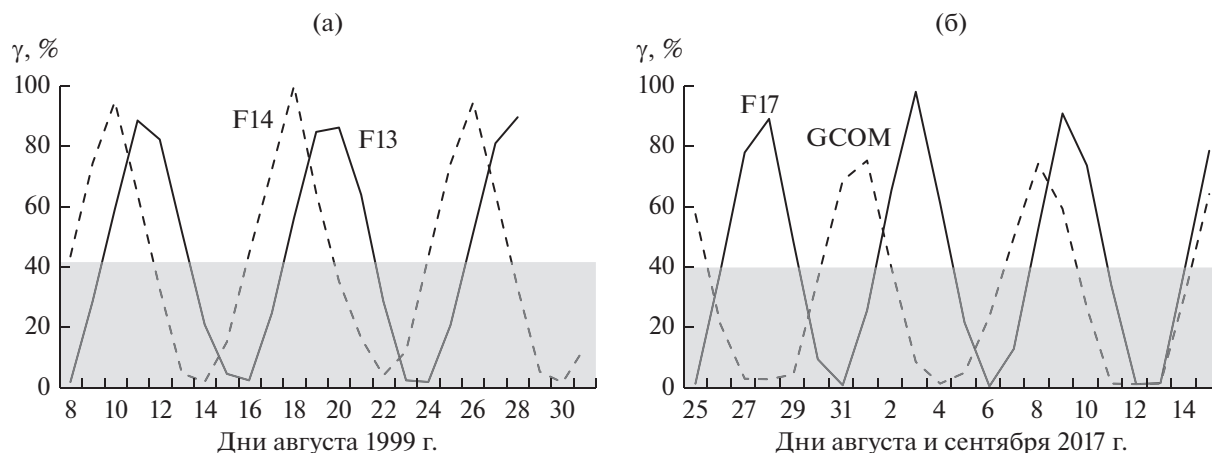
жениях ОВА, обусловленных расхождением полос сканирования СВЧ-радиометров. В ряде случаев наблюдается дополнительное увеличение лагун, которое можно объяснить влиянием на измеряемую со спутников радиояркостьную температуру и результаты ее тематической обработки таких факторов, как мощная облачность и атмосферные осадки, телекоммуникационные радиопомехи, солнечное радиоизлучение. Как видно из результатов работы, современные архивы спутниковых СВЧ-радиометрических позволяют проводить сравнение как отдельных спутников серии DMSP и GCOM-W1, так и их группировок с точки



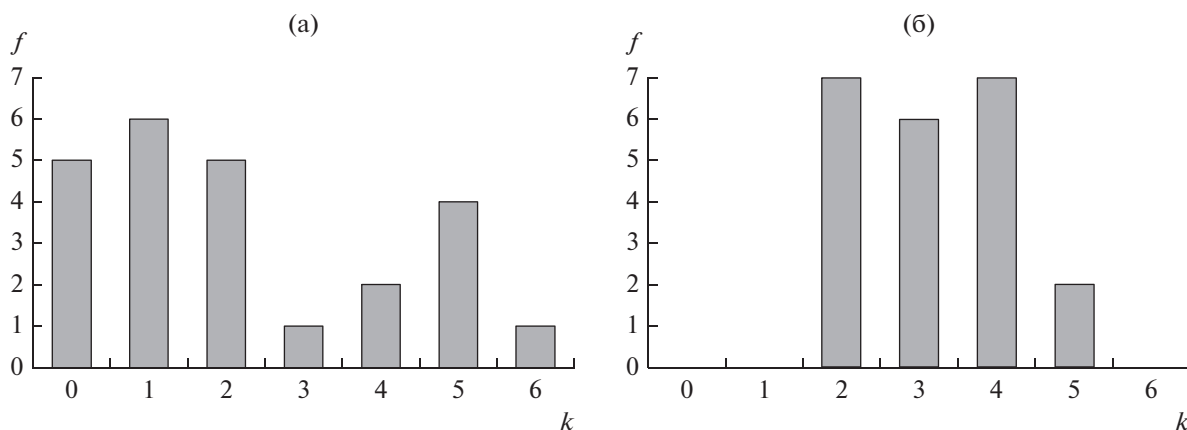
**Рис. 5.** Частоты появления лакун  $N$  в Мексиканском заливе в зависимости от их относительных размеров  $\gamma$  (отношение площади области с лакунами к общей площади обзора в заливе) при зондировании ОВА со спутников F11, F13, F14 в период 8.08–31.08 1999 г. и со спутников F15, F17, GCOM-W1 в период 25.08–10.09 2017 г.

зрения полноты и регулярности данных о полях влажности атмосферы в Мексиканском заливе. Существуют аналогичные возможности для анализа эффективности их использования при исследовании процессов зарождения и развития ураганов в период 2002–2011 гг. со спутников EOS Aqua, Coriolis с 2003 г., Метеор-М № 2 с 2014 г.

Комплексирование спутниковых СВЧ-радиометрических средств позволяет существенно уменьшить число лакун в пространственных распределениях ОВА при слежении за ураганами Berta и Katia. В нашем случае удается если не устранить, то сгладить свойственное групповым спутниковым измерениям противоречие между



**Рис. 6.** Относительные размеры лакун  $\gamma$  в Мексиканском заливе при зондировании ОВА на нисходящих витках спутников F13, F14 (а) и F17, GCOM-W1 (б).



**Рис. 7.** Частота случаев  $f$  с числом  $k$  спутниковых зондирований ОВА за сутки в Мексиканском заливе: а – в период с 8 по 31.08.1999 г. со спутников F11, F13, F14; б – в период с 25.08. по 10.09.2017 г. со спутников F15, F17, GCOM-W1.

полнотой обзора области интересов и его временной регулярностью, возникающее при анализе таких динамических процессов как зарождение и развитие тропических образований. В самом деле, несмотря на существенные различия полей влажности атмосферы, наблюдаемых разными спутниками в разное время суток 16.08.1999 г. (см. рис. 3) и 05.09.2017 г. (см. рис. 4), различия в их статистических характеристиках (усредненных по акватории Мексиканского залива значениях и среднеквадратических отклонениях, рассматриваемых нами как показатели коллективного отклика атмосферы на процессы зарождения ураганов [4]), являются не столь значимыми. Например, разброс оценок пространственной изменчивости (дисперсии) ОВА в заливе между данными спутника F11 на восходящем витке и спутника F13 на восходящем и нисходящем витках (для этих заслуживающих доверия выборок – относительные размеры лакун  $\gamma$  не превышают 40%) составляет

1.1  $\text{кг}/\text{м}^2$ , в то время как междусуточные вариации пространственной дисперсии в период с 14 по 21 августа 1999 г., предшествующий зарождению ТУ Bret, достигают 7.3  $\text{кг}/\text{м}^2$ . Разброс оценок пространственной дисперсии ОВА между данными спутников F15 и F17 на восходящих и нисходящих витках и спутника GCOM-W1 на нисходящем витке составляет 0.5  $\text{кг}/\text{м}^2$ , а междусуточные вариации дисперсии поля влажности атмосферы в период с 1 по 5 сентября 2017 г., предшествующий зарождению ТУ Bret, достигают 4.5  $\text{кг}/\text{м}^2$ .

Затронутые в данной работе вопросы и полученные результаты следует рассматривать как первый шаг в оценивании влияния полноты и регулярности спутникового мониторинга полей влажности атмосферы при анализе процессов зарождения и развития ураганов. В дальнейшем следует сосредоточиться не столько на определении количества и размеров лакун в данных спут-

никовых измерений, сколько на анализе их роли в получении наиболее цельного представления об этих процессах при тех или иных способах усвоения спутниковой информации.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражает признательность Е.П. Новичихину за разработку и апробацию программного обеспечения работы.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гранков А.Г., Мильшин А.А. // Метеорология и гидрология. 2021. № 4. С. 78.
2. Ермаков Д.М., Раев М.Д., Чернушич А.П., Шарков Е.А. // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 72.
3. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 3. С. 37.
4. Гранков А.Г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 4. С. 1.
5. Lawrence M.B., Kimberlain T.B. // Tropical Cyclone Report: Hurricane Bret, 18–25 August 1999. Miami: National Hurricane Center (Revised 26 February 2001).
6. Avila L.A. // Tropical Cyclone Report: Hurricane Katia, 5–9 September 2017. Miami: National Hurricane Center, 14 February 2019.