



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.13>

УДК: 551.465

ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ УРАГАНОВ В РИФТОВЫХ ЗОНАХ ТРОПИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ

А.Г. Гранков

Фрязинский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. академика Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 21 ноября 2025 г.

Аннотация. Выделены районы зарождения ураганов в тропической части Северной Атлантики за период 1995-2023 гг. и оценена степень их локализации относительно тектонических разломов на дне океана. На основе данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений иллюстрируется роль тропических (африканских) волн в атмосфере в локализации районов зарождения тропических ураганов в области Срединно-Атлантического хребта, характеризующейся высокой гидротермальной активностью. Исследуется временная динамика общего влагосодержания атмосферы и потоков скрытого и явного тепла на поверхности океана в данной области в периоды формирования ураганов.

Ключевые слова: спутниковая СВЧ-радиометрия, тропические ураганы и волны, тектонические разломы, общее влагосодержание атмосферы, поверхностные тепловые потоки.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Гранков Александр Георгиевич, agrankov@inbox.ru

Введение

Изучение характеристик атмосферы и океана в зонах зарождения тропических ураганов (ТУ) на различных стадиях их существования с помощью спутниковых СВЧ-радиометрических средств является актуальной задачей [1,2].

Среди различных факторов, влияющих на формирование ТУ, в ряде исследований отмечается глубинная дегазация в зонах разлома земной коры, связанная с гидротермальной и магматической деятельностью дна океана [3-5].

Данный эффект находится за пределами «прямой видимости» спутниковых СВЧ-радиометрических методов, однако их использование возможно благодаря существованию ряда механизмов сообщения дна океана с его поверхностью. Как отмечается в [5] приток тепловой энергии от гидротермальных источников в интерфейс системы океан-атмосфера может приводить к его прямому нагреву восходящими потоками газов (в виде пузырьков) и дополнительному – за счет дальнейшего их подъема в стратосферу, где они взаимодействуют с озоном, вызывая усиление нисходящих потоков инфракрасного и ультрафиолетового излучения. Автор [5] видит общую причину глобальных катастроф (тайфуны, ураганы и т.п.) именно в усилении глубинной дегазации, подтверждая это совпадением в большинстве случаев их эпицентров с зонами интенсивной дегазации в зонах разломов.

Описанные явления приводят к развитию неустойчивости (нестационарности) процессов тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой, что может объяснить, например, рост поверхностных потоков скрытого и явного тепла в периоды времени, предшествовавших зарождению ТУ Lorenzo и Bret в районе залива Кампече Мексиканского залива в зоне Карибской литосферной плиты, а также ТУ Ivan в Атлантическом океане в зоне Срединно-Атлантического хребта (рифта) на дне океана [6,7].

В настоящей статье на основе многолетних данных Национального центра ураганов США выделены районы зарождения ураганов в тропической зоне Северной Атлантики за период 1995-2023 гг. и оценена степень их локализации относительно границ (разломов) между Северо-Американской,

Южно-Американской, Карибской и Африканской литосферными плитами, позволяющей судить косвенно о влиянии глубинной дегазации дна океана в рифтовых зонах на процессы циклогенеза.

Для получения количественных оценок этого влияния с помощью архивных данных HOAPS (The Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite, Version 4.0) исследована временная динамика общего влагосодержания атмосферы (ОВА) и тепловых потоков (ТП) в скрытом и явном виде на поверхности океана в районах формирования ряда тропических ураганов в области Срединно-Атлантического хребта, характеризующейся высокой гидротермальной активностью и дегазацией океана.

Проведен анализ роли африканских восточных волн в атмосфере в локализации районов зарождения ураганов в данной области.

1. Области локализации ураганов в тропической части Северной Атлантики

На основе данных Национального центра ураганов США (National Hurricane Center, раздел NHC Data Archive, Tropical Cyclone Reports) выделены районы зарождения и развития тропических ураганов на различных стадиях за период 1995-2023 гг. в области 0-20° с.ш., 30-70° з.д. Северной Атлантики в зонах разломов. Следует отметить, что данная область находится под влиянием тропических волн (иное название – африканские восточные волны), формирующихся 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 [8].

Установлено, что районы зарождения ураганов в рассматриваемой области группируются преимущественно вблизи тектонических разломов, причем наиболее отчетливо эта закономерность проявляется для ранних стадий развития ТУ – тропических депрессий и штормов.

Рисунок 1 иллюстрирует расположение районов возникновения тропических депрессий для всей совокупности ураганов в области $0-20^{\circ}$ с.ш., $30-70^{\circ}$ з.д. Северной Атлантики в период 1995-2023 гг. относительно линий разломов.

Приведенная иллюстрация указывает на высокую степень локализации районов развития ураганов в зонах тектонических разломов (несмотря на некоторую схематичность отображения последних). Большой научный и практический интерес представляет исследование в данных районах особенностей временной динамики тепловых процессов на поверхности океана и в атмосфере на стадиях, предшествующих зарождению тропических ураганов, а также роли атмосферных тропических волн в формировании их очагов с помощью архивных спутниковых данных.

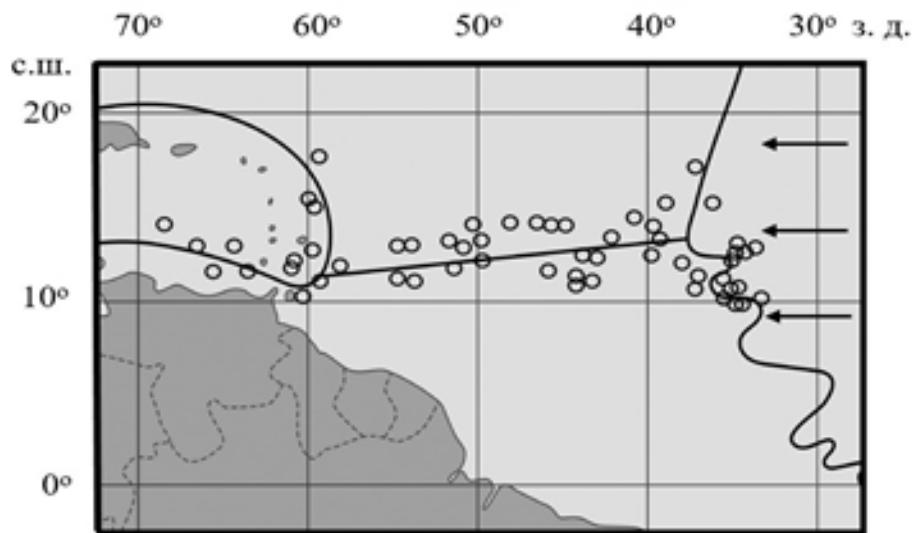


Рис. 1. Районы зарождения тропических депрессий в период 1995-2023 гг. и их расположение относительно тектонических разломов в тропической части Северной Атлантики. Стрелками обозначено направление распространения тропических волн.

2. Временная динамика ОВА и ТП в области Северо-Атлантического разлома

Для ряда тропических ураганов исследована временная динамика ОВА и ТП на поверхности океана с шестичасовым временным разрешением на сетке $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (архив HOAPS) в районах зарождения тропических депрессий в области Северо-Атлантического разлома (трещины в земной коре, проходящей по оси Срединно-Атлантического рифта). Данные о поверхностных тепловых потоках базируются на результатах СВЧ-радиометрических измерений со спутников DMSP и ИК-радиометрических измерениях со спутников NOAA: первые используются для определения температуры, влажности воздуха и скорости ветра в приводном слое атмосферы, а вторые – для температуры поверхности океана [9]; те и другие параметры в совокупности позволяют рассчитать значения ТП в явной и скрытой формах по формулам тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой – балк-формулам [10]. Данные о значениях ОВА базируются на результатах СВЧ-радиометрических измерений со спутников DMSP.

Некоторые результаты проведенного исследования иллюстрируются ниже на примерах тропических ураганов Erin и Ike.

Ураган Erin сформировался первоначально в виде тропической депрессии 1 сентября 2001 г. в точке 12.5° с.ш., 34.3° з.д. тропической Атлантики вблизи Северо-Атлантического разлома [11].

Проведен анализ временной изменчивости ОВА и ТП в скрытом виде на поверхности океана в районе формирования ТУ Erin в период с 30 августа по 2 сентября 2001 г., а его результаты представлены на рис. 2а и 2б. Из иллюстраций следует, что величины ОВА и ТП достигают максимальных значений в момент времени, совпадающий с началом развития стадии тропической депрессии (начальной стадии ТУ Erin).

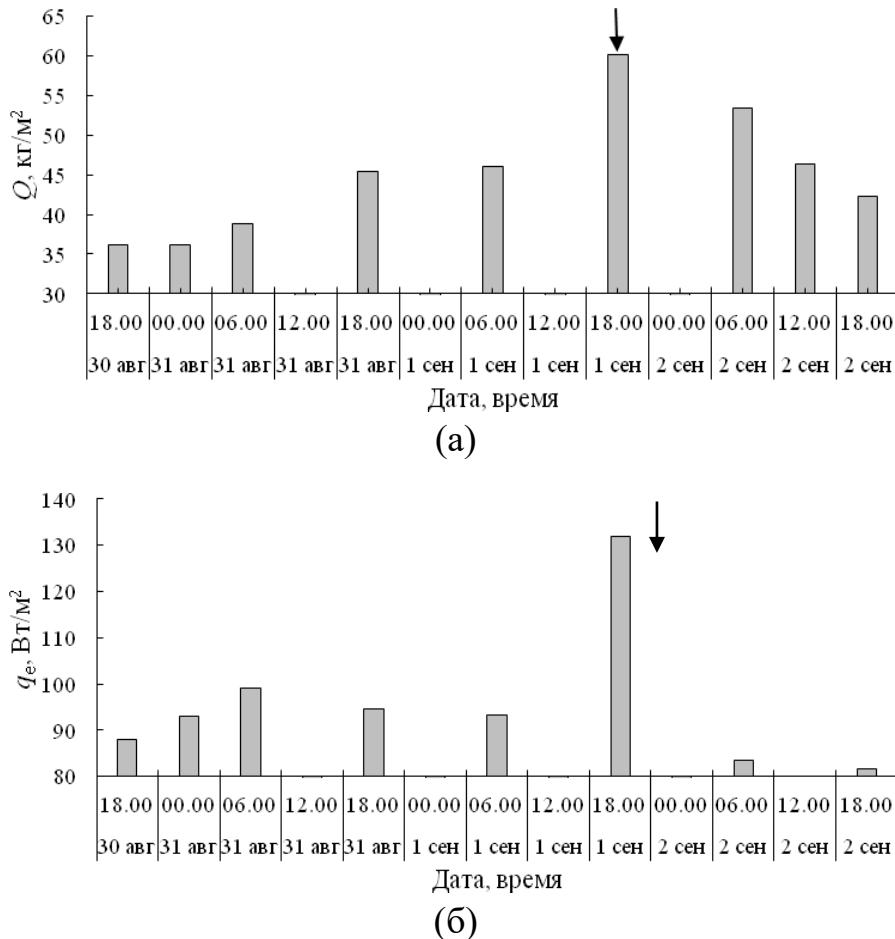


Рис. 2. Временная динамика изменения ОВА (а) и ТП в скрытом виде (б). Стрелкой отмечено начало стадии тропической депрессии.

Пропуски на графиках обусловлены отсутствием данных об общем влагосодержании атмосферы и тепловых потоках в архиве HOAPS, что связано: а) с их отбраковкой в условиях мощной облачности и интенсивных осадков в океане, а также над участками суши; б) наличием слепых зон, образующихся в результате расхождения полос сканирования СВЧ-радиометров спутников DMSP в тропических широтах.

Ураган Ike сформировался первоначально в виде тропической депрессии 1 сентября 2008 г. в точке 17.2° с.ш., 37.0° з.д. тропической Атлантики вблизи Северо-Атлантического разлома [12].

Нами проведен анализ временной изменчивости ТП в скрытом и явном виде на поверхности океана в районе формирования тропического урагана Ike в период с 29 августа по 2 сентября 2008 г., а его результаты представлены на рис. 3а и 3б.

Из иллюстраций видно, что величины q_e и q_h достигают максимальных значений в момент времени, совпадающий с началом развития стадии тропической депрессии (начальной стадии ТУ Ike).

Пропуски на графиках обусловлены отсутствием данных о значениях ТП на поверхности океана в архиве HOAPS.

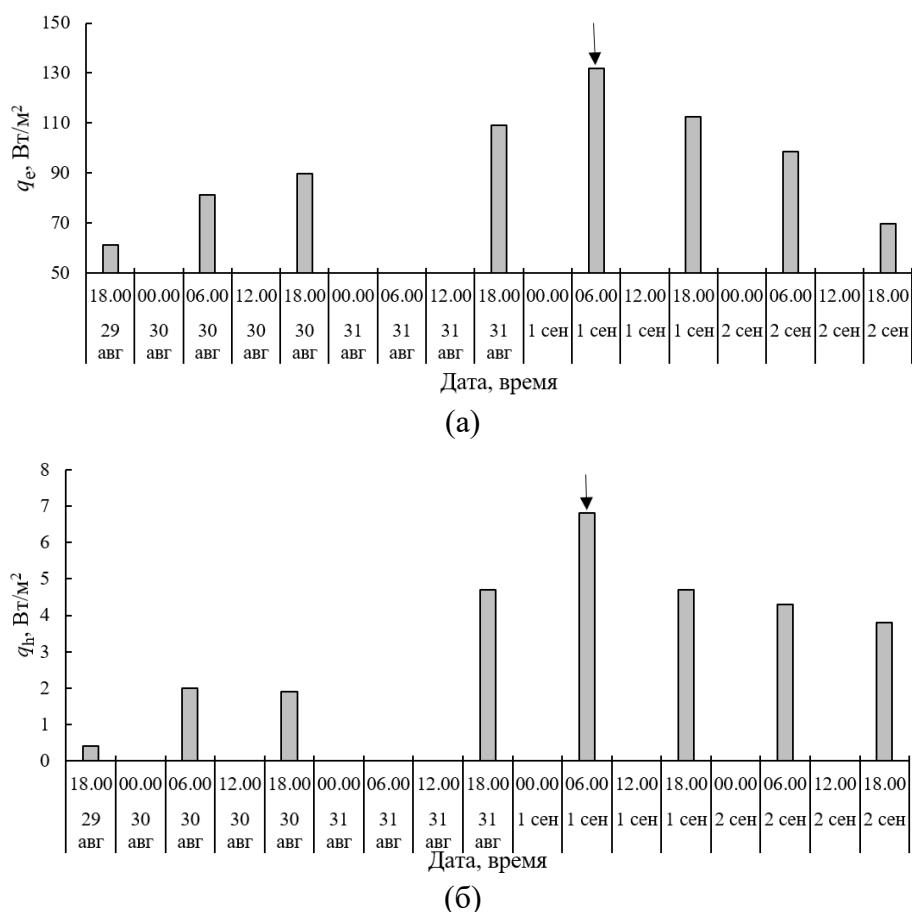


Рис. 3. Временная динамика изменения ТП на поверхности океана скрытого (а) и явного (б) вида в районе формирования ТУ Ike.

Стрелкой отмечено начало стадии тропической депрессии.

3. Поле ОВА как индикатор трансформации тропических волн в тропические ураганы в области Северо-Атлантического разлома

На основе данных архива HOAPS проведен анализ пространственно-временной изменчивости ОВА в Северной Атлантике от западного побережья Африки до районов зарождения ряда тропических ураганов (с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ и шестичасовым временным разрешением) в периоды,

предшествующие их зарождению; в качестве примеров на рис. 4, 5 приведены результаты, полученные для ТУ Erin и Ike.

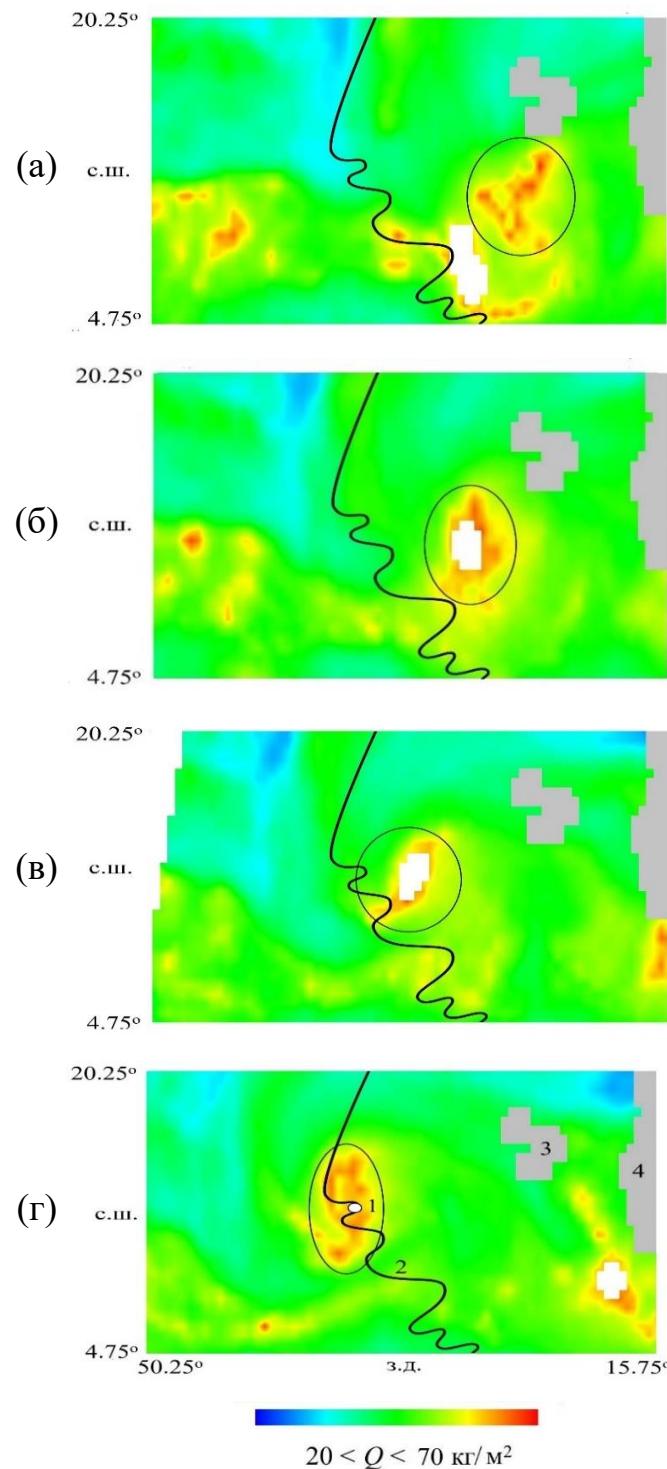


Рис. 4. Эволюция поля ОВА (Q) в тропической части Атлантики в период, предшествующий зарождению ТУ Erin: (а) – 31.08 6 ч; (б) – 31.08 18 ч; (в) – 01.09 6 ч; (г) – 01.09 18 ч. 1 – район зарождения тропической депрессии; 2 – осевая линия Северо-Атлантического разлома; 3 – острова Зеленого Мыса; 4 – западное побережье Африки.

Белым цветом выделены области, для которых данные об ОВА отсутствуют.

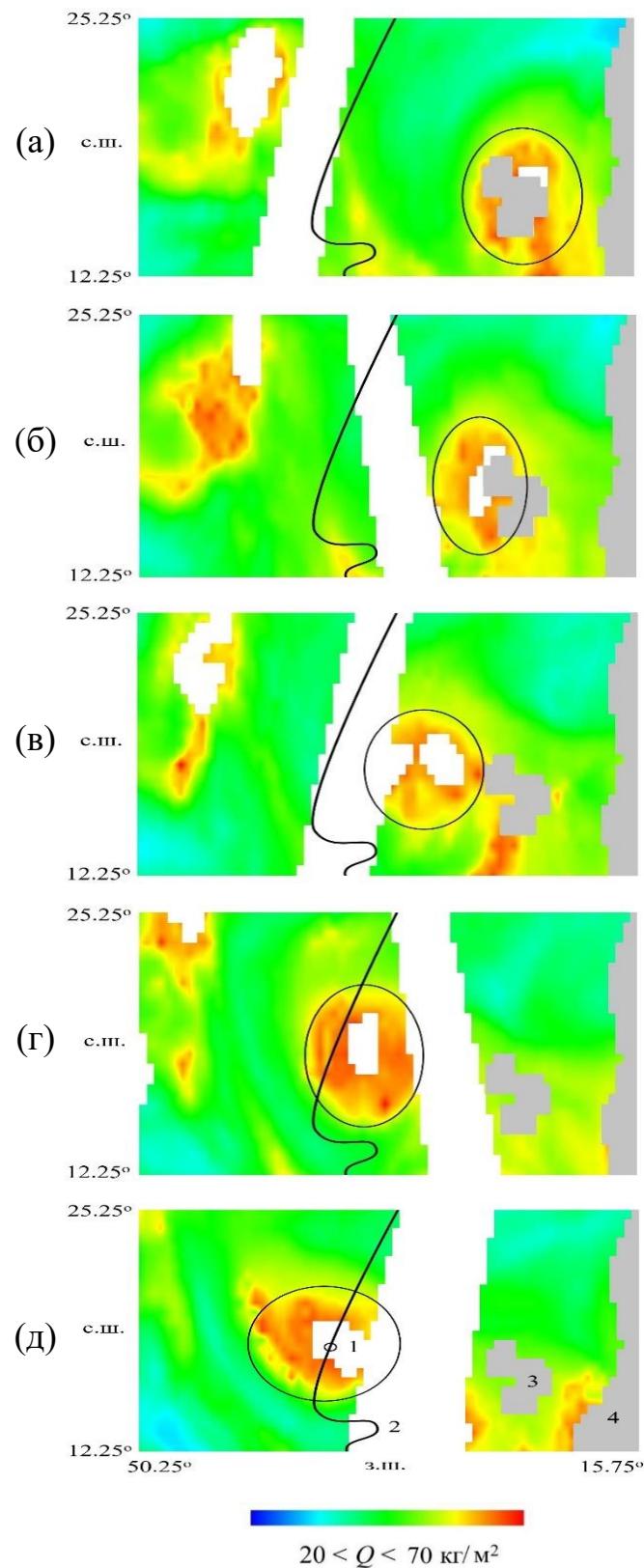


Рис. 5. Эволюции поля ОВА (Q) в тропической части Северной Атлантики в период, предшествующий зарождению ТУ Ike: (а) – 30.08 6 ч; (б) – 30.08 18 ч; (в) – 31.09 6 ч; (г) – 31.09 18 ч; (д) – 01.09 6 ч; 1 – район зарождения тропической депрессии; 2 – осевая линия Северо-Атлантического разлома; 3 – острова Зеленого Мыса; 4 – западное побережье Африки.

Белым цветом выделены области, для которых данные об ОВА отсутствуют.

Иллюстрации демонстрируют существование областей с высокими значениями ОВА (до 70 кг/м^2), перемещающихся от западного побережья Африки в направлениях к районам зарождения ТУ Erin и Ike. Траектории их перемещения совпадают с траекториями движения тропических волн, описанными в [11,12].

Следующая особенность, наблюдаемая на рис. 4 и 5, обращает на себя особое внимание: время начала развития ураганов (стадии тропической депрессии) совпадает со временем прихода тропических волн в область Северо-Атлантического разлома, в данных случаях, на широте $\sim 12.5^\circ$ для ТУ Erin и на широте $\sim 17.2^\circ$ для ТУ Ike. Этот результат согласуется с приведенными на рис. 1 данными о локализации районов зарождения тропических ураганов зоне разлома и позволяет объяснить усиление тепловых процессов на поверхности океана и в атмосфере (рис. 2, 3) как следствие прихода тропических волн в эту область.

Можно также видеть, что траектории дальнейшего перемещения областей с высокими значениями общего влагосодержания атмосферы хорошо совмещаются с траекториями распространения тропических ураганов на последующих стадиях их развития (рис. 6).

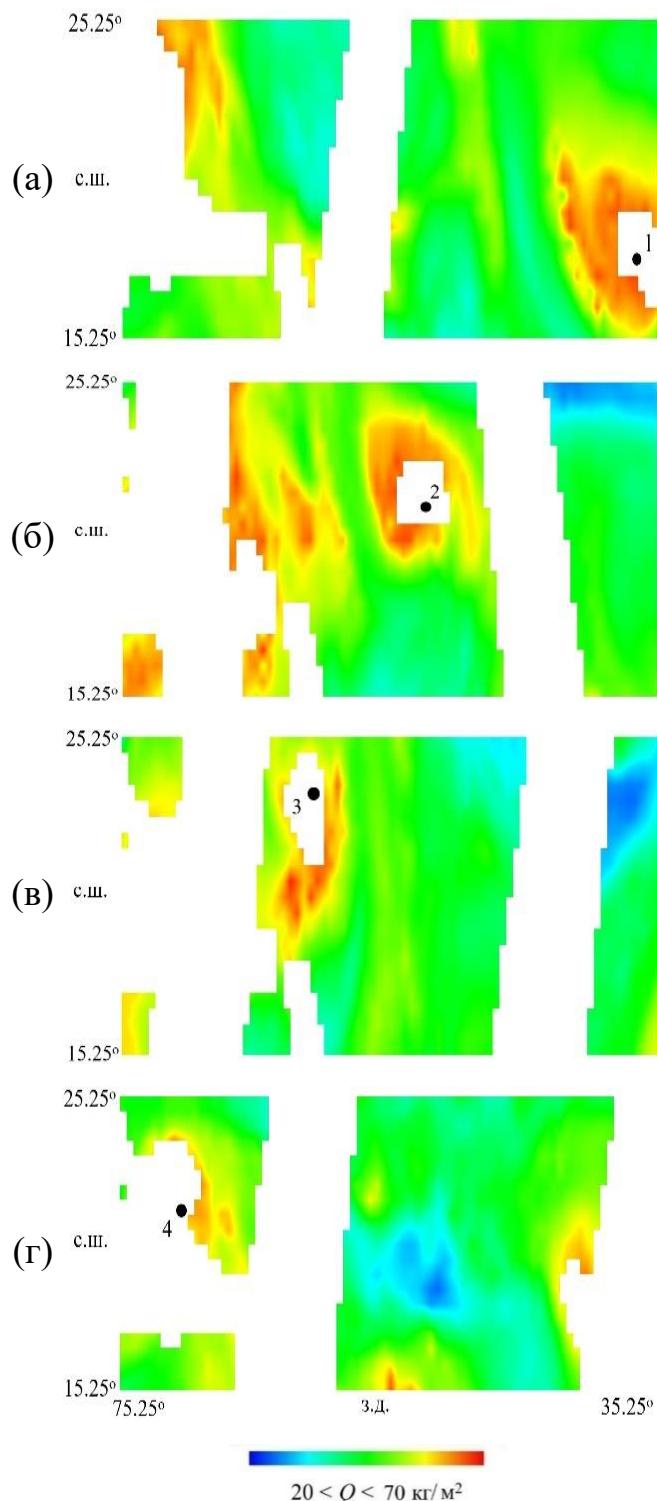


Рис. 6. Эволюция поля ОВА (Q) в тропической части Северной Атлантики и траектории ТУ Ike (1, 2, 3, 4): (а) – 01.09, 6 ч; (б) – 03.09, 18 ч; (в) – 05.09, 6 ч; (г) – 07.09, 6 ч; 1 – стадия тропической депрессия; 2, 3, 4 – стадии тропического урагана.

Белым цветом выделены области, для которых данные об ОВА отсутствуют.

Заключение

Анализ многолетних данных Национального центра ураганов США позволил установить, что районы зарождения ураганов в тропической части Северной Атлантики локализуются преимущественно на границах (разломах земной коры) между Северо-Американской, Южно-Американской, Карибской и Африканской литосферными плитами.

Эту закономерность обосновывается в статье на примере Северо-Атлантического разлома на границе между Северо-Американской и Африканской плитами существованием областей с высокими значениями общего влагосодержания атмосферы (до $70 \text{ кг}/\text{м}^2$), приход которых в зону разлома совпадает с началом развития ураганов.

Установлено, что траектории перемещения областей высокого влагосодержания атмосферы к районам зарождения тропических ураганов и далее – к районам их последующего развития – хорошо согласуются с траекториями движения тропических (африканских) волн.

Приход тропических волн в зону Северо-Атлантического разлома сопровождается усилением тепловых процессов на поверхности океана и в атмосфере; на ряде примеров показано, что в это время наблюдается интенсификация вертикальных турбулентных потоков скрытого и явного тепла на поверхности океана, а также общего влагосодержания атмосферы.

Таким образом, процессы тропического циклогенеза в районах тектонических разломов формируются в условиях воздействия двух факторов: а) тропических волн, приносящих массы теплого и влажного воздуха в эти районы; б) глубинной дегазации дна океана. Второй фактор согласно [5], может приводить к притоку тепловой энергии от геотермальных источников в интерфейс системы океан-атмосфера и его прямому нагреву восходящими потоками газов (в виде пузырьков) и дополнительному – за счет дальнейшего их подъема в стратосферу, где они взаимодействуют с озоном, вызывая усиление нисходящих потоков инфракрасного и ультрафиолетового излучения. В дальнейшем представляет интерес проверка этой гипотезы путем оценки

тепловых эффектов выхода подводных гидротерм на поверхность океана и изменений состояния озонового слоя в рифтовых зонах тропической части Северной Атлантики с помощью данных прямых и спутниковых измерений.

Автор благодарен Е.П. Новицкихину, Н.К. Шелобановой и Д.А. Гранкову за помощь в обработке спутниковых данных.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Sharkov E.A. Global tropical cyclogenesis / 2nd Ed. Berlin, Heidelberg, L., N.Y. etc.: Springer/PRAXIS. – 2012.
2. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф. Космический мониторинг тропических циклонов. Москва: Научный мир. – 2014.
3. Горяинов И.Н., Казакова В.Е., Смекалов А.С. Проецирование на поверхность океана выходов подводных гидротерм // Отечественная геология. – 1996. – №2. – С. 50-53.
4. Грамберг И.С. и др. Пузырьковый механизм сообщения дна океана с атмосферой. // Докл. Академии наук. – 2001. – Т. 381. – №3. – С. 409-411.
5. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. – М., ООО «Геоинформцентр». – 2002.
6. Гранков А.Г. Динамика поверхностных тепловых потоков в тропической зоне Атлантики в периоды зарождения ураганов // Докл. РАН. Науки о Земле. 2024. – Т 518. – № 9. – С. 179-184.
7. Гранков А.Г. Об использовании поверхностных тепловых потоков в качестве предвестников тропического циклогенеза) // Метеорология и гидрология. – 2025. – №3. – С. 111-117.
8. Thorncroft C., K. Hodges K. African easterly wave variability and its relationship to Atlantic tropical cyclone activity // J. Climate. – 2001. – V. 14. – P. 1166-1179.
9. Andersson, A., et al. The Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data – HOAPS-3, Earth Syst. Sci. Data, 2. – 2010. – P. 215-234.

10. Лаппо С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. – Л., Гидрометеоиздат. – 1990.
11. Pasch R.J., Brown D.P. Tropical Cyclone preliminary Report: Hurricane Erin, 1–15 September 2001. Miami: National Hurricane Center, 20 November 2001.
12. Berg R. Tropical Cyclone preliminary Report: Hurricane Ike, 1–14 September 2009. Miami: National Hurricane Center, 4 February 2009 (updated 4 February 2009, 18 March 2009, 3 May 2010, 10 August 2011, 18 March 2014).

Для цитирования:

Гранков А.Г. Применение спутниковых СВЧ-радиометрических данных для анализа закономерностей формирования ураганов в рифтовых зонах тропической Атлантики. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.13>