

УДК 551.465

О СВЯЗИ ПОЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ В МЕКСИКАНСКОМ ЗАЛИВЕ С ПРОЦЕССАМИ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ УРАГАНОВ

© 2021 г. А. Г. Гранков*

*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 19.12.2020 г.

После доработки 08.03.2021 г.

Принята к публикации 14.04.2021 г.

Рассматривается подход к изучению процессов зарождения ураганов в Мексиканском заливе, основанный на анализе группового (усредненного над акваторией залива) отклика общего влагосодержания атмосферы на эти процессы на основе данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений. Проведен анализ пространственно-временной изменчивости влагосодержания в разные годы в периоды зарождения и развития местных тропических ураганов Humberto (2007 г.), Lorenzo (2007 г.), Bret (1999 г.), Katia (2017 г.) со спутников DMSP (радиометры SSM/I и SSMIS) и EOS Aqua (радиометр AMSR-E). Наблюдается дружный отклик влагосодержания атмосферы на процесс развития данных ураганов над обширными областями Мексиканского залива, находящимися на значительном удалении (до 500–700 км) от районов их зарождения. Отмечается общая для ураганов Humberto, Lorenzo, Bret, Katia особенность – усиление в течение нескольких дней пространственной изменчивости общего влагосодержания атмосферы над акваторией Мексиканского залива и дальнейшее ее ослабление (затишье) перед финальной стадией – появлением урагана. Обсуждаются задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: ураганы, Мексиканский залив, влагосодержание атмосферы, спутниковая СВЧ-радиометрия, яркостная температура

DOI: 10.31857/S0002351521040052

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка технологий диагностики характеристик атмосферы и океана в зонах деятельности тропических ураганов (ТУ) на различных стадиях их существования с помощью спутниковых радиофизических средств является актуальной задачей [1, 2]. Одним из перспективных направлений ее решения является использование данных спутниковых измерений интенсивности собственного СВЧ-излучения – яркостной температуры (ЯТ) системы океан–атмосфера в окрестности линии 1.35 см (22.235 ГГц) спектра резонансного излучения (поглощения) водяного пара в атмосфере. В этой области СВЧ-диапазона наблюдаются тесная связь ЯТ с общим (интегральным) содержанием водяного пара в атмосфере – характеристикой, которую точнее было бы называть общим паросодержанием атмосферы, но чаще называют ее влагосодержанием или влагозапасом. Данная характеристика широко используется в исследованиях генезиса и развития тропических ураганов, об этом свидетельствуют, например, работы [3–8], где в [3, 4] исследуется связь спутниковых СВЧ-радиометрических оценок об-

щего влагосодержания атмосферы (ОВА) с тропическим циклогенезом в акваториях Мирового океана, в [5] рассматривается роль тропосферных адвективных потоков скрытого тепла, сосредоточенного в водяном паре, в интенсификации ТУ, в [6] анализируется возможность оценивания скорости переноса водяного пара и локализации источников энергии с помощью СВЧ-радиометрических методов, в [7, 8] демонстрируется возможность использования ОВА и ЯТ в качестве показателей динамики ураганов на различных стадиях их развития.

Целью настоящей работы является исследование связи процессов зарождения ураганов в Мексиканском заливе с пространственно-временной изменчивостью общего влагосодержания атмосферы над его акваторией. Основное внимание сосредоточено на местных ураганах, зародившихся в акватории Мексиканского залива, а не пришедших сюда из Карибского моря, либо Атлантики уже в зрелой форме. Рассмотренные в статье ТУ Humberto (2007 г.), Lorenzo (2007 г.), Bret (1999 г.), Katia (2017 г.) принадлежат к числу многих тропических образований, зародившихся

в акватории Мексиканского залива, например, в период с 1995 по 2017 г. 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.

Уступая последним в интенсивности, 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 интереса к ураганам, зародившимся в Мексиканском заливе, может служить наше предположение о том, что изучение именно этой категории ТУ позволит достичь лучшего понимания региональных механизмов их появления и прогресса в разработке технологий их раннего обнаружения.

Выделенные нами ураганы отражают многообразие циклонических процессов в Мексиканском заливе, их интенсивность сильно варьирует: скорость ветра для ТУ Humberto, Lorenzo, Katia составляет 130–170 км/ч и достигает 230 км/ч для ТУ Bret; что еще более важно, данные ураганы характеризуются различными синоптическими историями.

В статье приведены результаты анализа связи процессов развития местных ураганов в Мексиканском заливе с пространственно-временной изменчивостью полей общего влагосодержания атмосферы над его акваторией на примерах ураганов Humberto, Lorenzo, Bret, Katia. Стимулом для проведения этого исследования послужило наблюдение о существовании дружного отклика СВЧ-излучательных и влажностных характеристик атмосферы на зарождение ураганов Humberto и Lorenzo в обширных областях Мексиканского залива, прилегающих к районам их зарождения [9].

В работе используются архивы NSIDC (National Snow & Ice Data Center) и RSS (Remote Sensing Systems) данных многолетних измерений (и результатов их тематической обработки), полученных с помощью радиометров SSM/I (Scanning Sensor Microwave Imager [10]) и SSMIS (Special Sensor Microwave Imager Sounder) [11] метеорологических спутников DMSP и радиометра AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer [12]) океанографического спутника EOS Aqua.

2. ОТКЛИК ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОБЩЕГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ В МЕКСИКАНСКОМ ЗАЛИВЕ НА ЗАРОЖДЕНИЕ УРАГАНОВ HUMBERTO И LORENZO

Общие сведения о тропических ураганах Humberto и Lorenzo

Ураган Humberto зародился в сентябре 2007 г. в северо-западной части Мексиканского залива и

уже через сутки достиг американского побережья в районе штата Техас. Данное тропическое образование, не отличаясь высокой интенсивностью (1-я категория по шкале Саффира–Симпсона), достигло рекордной скорости его интенсификации от стадии тропической депрессии до стадии урагана, например, увеличение скорости приводного ветра с 45 до 150 км/ч произошло в течение 19 ч (12–13 сентября). Более подробные сведения о синоптической истории развития ТУ Humberto приведены в [13].

ТУ Lorenzo зародился вскоре после урагана Humberto в северо-западной части Мексиканского залива, его синоптическая история описана в [14]. Увеличение скорости приводного ветра с 45 до 130 км/ч здесь произошло в течение 42 ч (25–27 сентября).

Таблица 1 иллюстрирует динамику развития ураганов Humberto и Lorenzo с моментов зарождения их начальных форм (тропических депрессий), перехода в стадии тропического шторма, тропического урагана и дальнейшей диссипации.

Изменчивость СВЧ-излучательных и влажностных характеристик атмосферы в районах зарождения ураганов Humberto и Lorenzo

Получены оценки изменчивости суточных значений яркостной температуры системы океан–атмосфера на длине волны 1.35 см, общего влагосодержания атмосферы и общего (интегрального) водозапаса облаков в районах зарождения Humberto (29.5° с.ш., 94.48° з.д.) и Lorenzo (20.5° с.ш., 96.3° з.д.) на основе анализа временных рядов параметров $T_{1.35}^{\text{я}}$, Q , W на следующих интервалах:

– предшествующих зарождению тропических образований Humberto (7–12.09.2007) и Lorenzo (17–25.09.2007);

– включающих все стадии существования (от зарождения до диссипации) тропических образований Humberto (12–14.09.2007) и Lorenzo (25–28.09.2007).

Результаты представлены на рис. 1.

Из иллюстрации следует, что появление и развитие ТУ Humberto и Lorenzo сопровождается ростом общего влагосодержания атмосферы и яркостной температуры в их очагах, а ослабление ураганов – их снижением. Отмечается также сильное уменьшение значений параметров Q и $T_{1.35}^{\text{я}}$ в период времени, предшествующий появлению ТУ Humberto и Lorenzo. Одновременно в районах их зарождения наблюдается известный для тропических ураганов факт конденсации атмосферного водяного пара в жидкокапельную влагу облаков на стадии тропической депрессии.

Таблица 1. Траектории и стадии развития ТУ Humberto и Lorenzo (сентябрь 2007 г.) [13, 14]

ТУ Humberto					
Дата/время (по Гринвичу)	Широта (° N)	Долгота (° W)	Атмосферное давление (мб)	Скорость ветра морской узел (км/ч)	Стадия
12/0600	27.3	95.0	1009	25 (46.25)	Депрессия
12/1200	27.8	95.1	1006	35 (64.75)	Шторм
12/1800	28.3	95.0	1001	45 (83.25)	
13/0000	28.8	94.8	997	55 (101.75)	
13/0600	29.5	94.4	985	80 (148.00)	Ураган
13/1200	30.3	93.6	989	65 (120.25)	
13/1800	31.0	92.9	1000	35 (64.75)	Шторм
14/0000	31.7	92.3	1006	25 (46.25)	Депрессия
14/0600	32.4	91.3	1009	20 (37.00)	
14/1200	32.7	90.2	1012	20 (37.00)	
ТУ Lorenzo					
25/1800	21.8	94.8	1009	25 (46.25)	Депрессия
26/0000	21.7	95.2	1008	25 (46.25)	
26/0600	21.2	95.0	1007	25 (46.25)	
26/1200	21.0	94.7	1008	30 (55.5)	
26/1800	21.2	94.4	1009	30 (55.5)	
27/0000	21.2	94.7	1008	30 (55.5)	
27/0600	20.8	94.8	1009	30 (55.5)	
27/1200	20.6	95.1	1006	45 (83.25)	Шторм
27/1800	20.5	95.7	1001	60 (111.00)	
28/0000	20.5	96.3	990	70 (129.50)	Ураган
28/0600	20.5	97.1	993	65 (120.25)	
28/1200	20.5	98.0	1002	30 (55.5)	Депрессия
28/1800	20.7	98.7	1008	20 (37.00)	

Примечание. Выделенные области соответствуют времени достижения ураганами суши.

Отклик СВЧ-излучательных и влажностных характеристик атмосферы на зарождение ураганов Humberto и Lorenzo в акватории Мексиканского залива

Проведен анализ изменчивости суточных значений ЯТ по данным спутниковых СВЧ-радиометрических измерений в Мексиканском заливе в период развития ураганов Humberto и Lorenzo в районах расположения буйковых станций наблюдательной сети NDBC (National Buoy Data Center) NOAA. Станции сети, расположенные вблизи бе-

реговой линии залива, исключены из рассмотрения, чтобы избежать искажений оценок ЯТ, обусловленных попаданием суши в поле зрения антенн спутниковых радиометров.

В качестве примера на рис. 2 представлены вариации ЯТ на длине волны 1.26 см (23.8 ГГц) в спектральной области излучения водяного пара в атмосфере на вертикальной поляризации в период зарождения и развития тропического образования Humberto для ряда буйковых станций, прилегающих к району его зарождения.

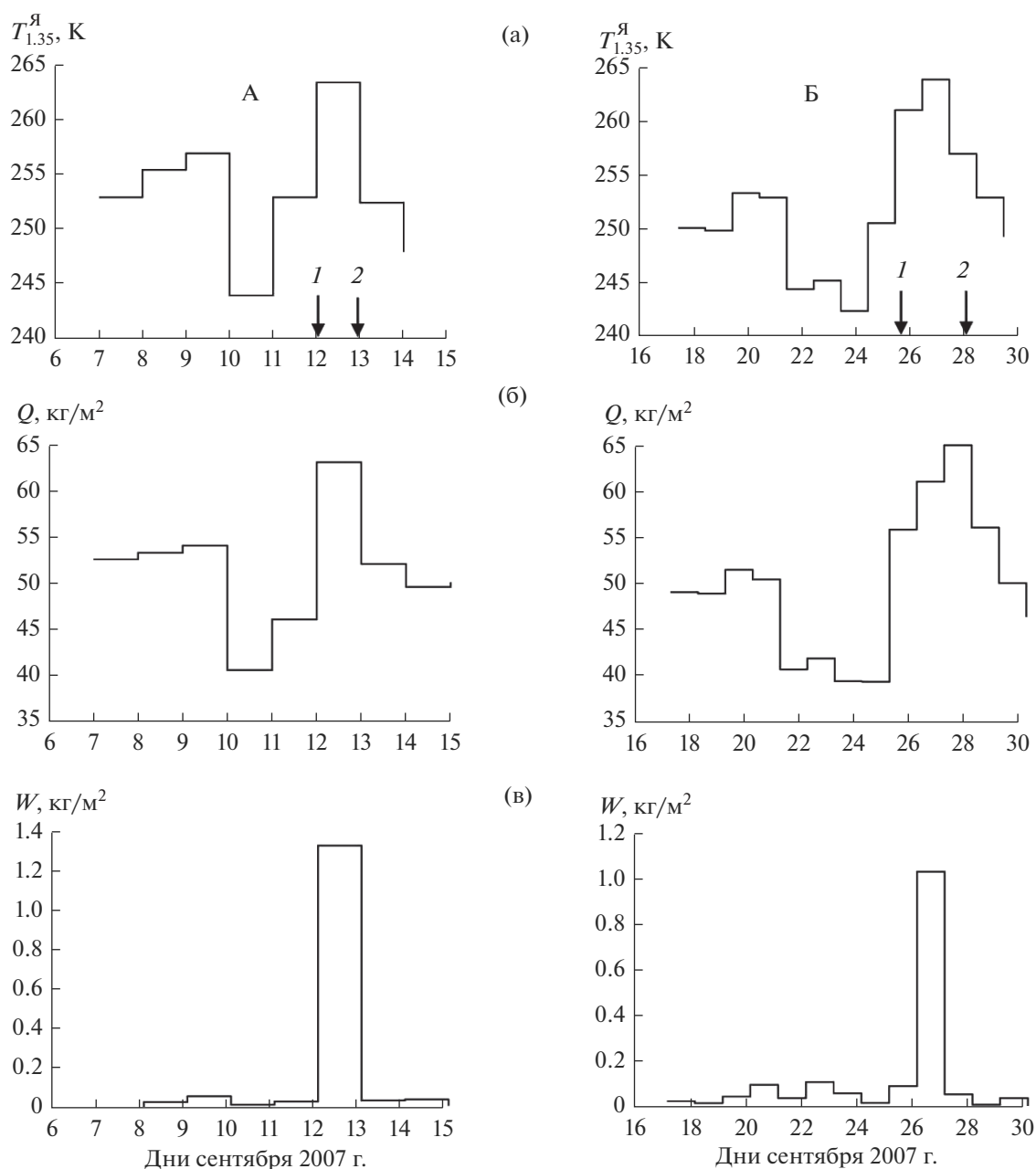


Рис. 1. Вариации яркостной температуры $T^{\text{Я}}$, общего влагосодержания атмосферы Q и интегрального водозапаса облаков W в районах зарождения ТУ Humberto (А) и Lorenzo (Б): (а) – данные измерений ЯТ радиометром SSMIS спутника F17 на длине волны 1.35 см на вертикальной поляризации с 24-часовым разрешением (архив RSS); (б) и (в) – оценки среднесуточных значений параметров Q и W из архива NSIDC по данным радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua. Стрелками отмечены моменты начала тропических депрессий (1) и начала перехода тропических образований в стадию урагана (2).

Наблюдается дружный отклик ЯТ на зарождение ТУ Humberto в областях Мексиканского залива, находящихся на значительном удалении (до 500–700 км) от района его зарождения. По данным анализа в этих областях за несколько дней до интенсификации тропического образования Humberto до стадии урагана (13 сентября) отмечается снижение величины $T_{1.26}^{\text{Я}}$ на 15–20 К на вертикальной

поляризации. Еще более сильные вариации ЯТ на этой длине волны (30–40 К) отмечаются на горизонтальной поляризации, где величина $T_{1.26}^{\text{Я}}$ чувствительна не только к влагосодержанию атмосферы, но и к скорости ветра в приводном слое атмосферы. Отчетливый сигнал на зарождение ТУ Humberto дает также канал радиометра AMSR-E на длине волны 1.6 см (18.7 ГГц) в обла-

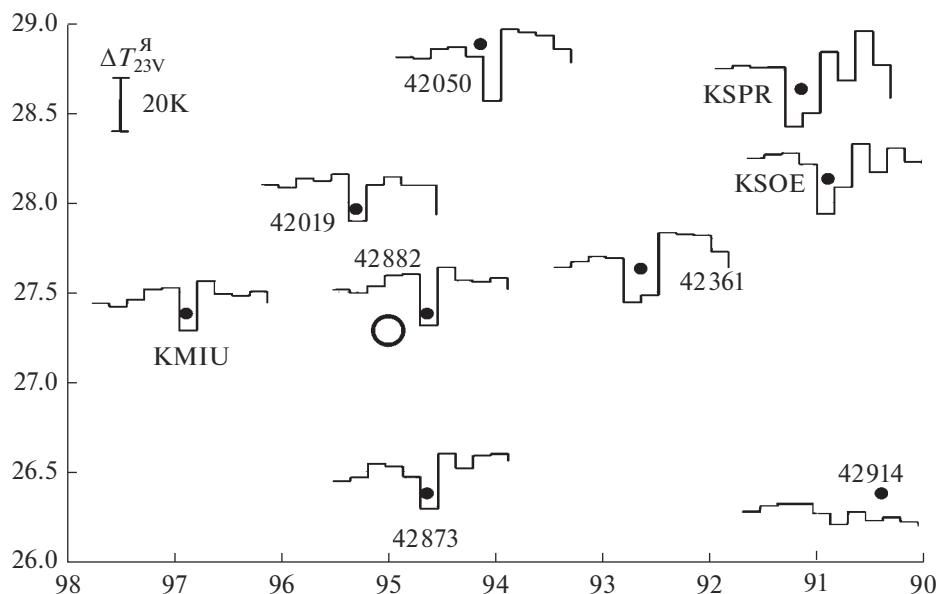


Рис. 2. Вариации ЯТ в период развития ТУ Humberto (5–15 сентября 2007 г.) в районах расположения станций, ближайших к району его зарождения (отмечен кружком). По вертикальной оси – градусы северной широты, по горизонтальной – градусы западной долготы. Точки обозначают местоположение станций.

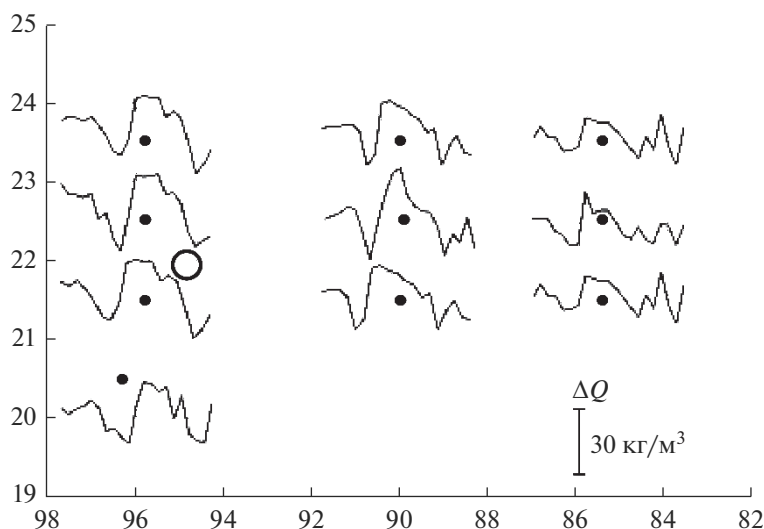


Рис. 3. Вариации ОВА в районе зарождения урагана Lorenzo в период 15 сентября–5 октября 2007 г. По вертикальной оси – градусы северной широты, по горизонтальной – градусы западной долготы. Кружком выделен район зарождения тропической депрессии. Точки обозначают местоположение станций.

сти излучения водяного пара, который также реагирует на оба этих атмосферных параметра.

Выполнен анализ изменчивости суточных значений общего влагосодержания атмосферы Q в отдельных областях Мексиканского залива с временным разрешением 24 ч на основе данных архива NSIDC – результатов тематической обработки данных измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua.

Рисунок 3 иллюстрирует изменчивость суточных значений ОВА в области 19° – 25° с.ш.,

82° – 98° з.д. Мексиканского залива для ряда точек в окрестности зарождения урагана Lorenzo.

Рисунок демонстрирует дружный отклик водяного пара атмосферы на зарождение ТУ Lorenzo в различных точках Мексиканского залива, находящихся на удалении от района его зарождения до 500–700 км. Наблюдается заметное снижение величины Q на 15–20 кг/м² в прилегающих к точке зарождения урагана областях в течение 5–7 дней на начальной стадии урагана (тропической депрессии) и сильный рост на 20–25 кг/м² в течение по-

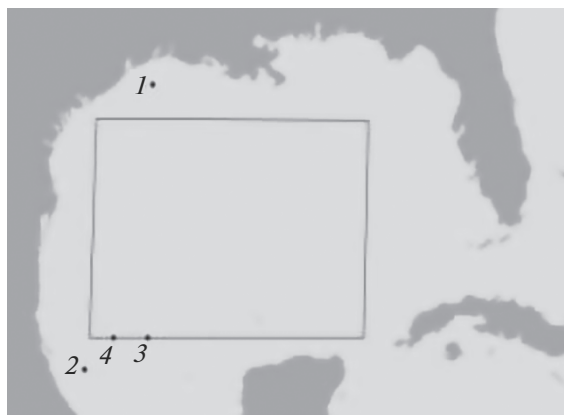


Рис. 4. Положение выбранной области в Мексиканском заливе и районов зарождения тропических образований Humberto (1), Lorenzo (2), Bret (3), Katia (4) в моменты их перехода из стадии тропического шторма в стадию урагана.

следующих 4–5 дней при интенсификации тропического образования Lorenzo до стадии урагана (28 сентября).

Приведенные примеры указывают на то, что формирование ТУ Humberto и Lorenzo сопровождается отчетливой реакцией общего влагосодержания атмосферы и яркостной температуры в спектральной области резонансного излучения атмосферного водяного пара не только в районах зарождения этих ураганов, но и в прилегающих к ним обширных акваториях Мексиканского залива.

3. ГРУППОВОЙ ОТКЛИК ОБЩЕГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ В МЕКСИКАНСКОМ ЗАЛИВЕ НА ТУ HUMBERTO, LORENZO, BRET, KATIA

Согласованность откликов величин $\Delta T_{1,26}^a$ и Q на зарождение ТУ Humberto и Lorenzo в различных областях Мексиканского залива с их откликом в районах зарождения данных ураганов наводит на мысль о целесообразности изучения группового (формируемого всей акваторией залива) отклика этих характеристик и их связи с историей возникновения и развития этих и других ураганов.

Проведен анализ статистических характеристик пространственной изменчивости общего влагосодержания атмосферы в области $21.75^\circ\text{--}28^\circ$ с.ш., $85.5^\circ\text{--}95.75^\circ$ з.д. Мексиканского залива в периоды зарождения и развития ТУ Humberto и Lorenzo, а также более мощных ураганов Bret и Katia с “пропиской” в Мексиканском заливе (рис. 4).

Ураган Bret образовался из тропической депрессии в заливе Кампече (южной части Мексиканского залива) 18 августа 1999 г. [15]. Утром 22 августа Bret, набрав максимальную силу, стал приближаться к южному побережью Техаса со скоростью ветра около 230 км/ч, что соответ-

ствует 4-й категории интенсивности по шкале Саффира–Симпсона.

Ураган Katia зародился в виде тропической депрессии в полдень 5 сентября 2017 г. в заливе Кампече [16]. Утром 6 сентября достиг статуса тропического шторма и вечером того же дня трансформировался в ураган, распространяющийся к мексиканскому побережью со скоростью около 170 км/ч.

С помощью данных архива NSIDC проведен анализ статистических характеристик пространственной изменчивости общего влагосодержания атмосферы Q (дисперсии и средних значений) в выбранной области Мексиканского залива в периоды времени, охватывающие синоптические истории ТУ Humberto, Lorenzo, Bret и Katia. Для данной области, покрывающей значительную часть залива, сформированы массивы данных в виде матриц 42×26 , элементами которой являются суточные значения параметров Q и W в пространственных ячейках $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

Результаты анализа показывают общую для этих тропических образований особенность – усиление в течение нескольких дней пространственной дисперсии ОВА над акваторией Мексиканского залива и дальнейшее ее ослабление перед финальной стадией – появлением урагана (рис. 5).

Отметим, что сходству откликов параметра σ_0 на развитие данных ураганов не препятствует различие их синоптических историй. Действительно, причиной образования ТУ Humberto послужил местный фактор – перемещение атмосферного жлоба от южного побережья Флориды к северо-западной части Мексиканского залива [13], а зарождение ТУ Lorenzo произошло вследствие прихода в Мексиканский залив тропической волны с западного побережья Африки [14]. В зарождении ураганов Bret и Katia сыграли важную роль тропические волны, пришедшие из Атлантики, но синоптиче-

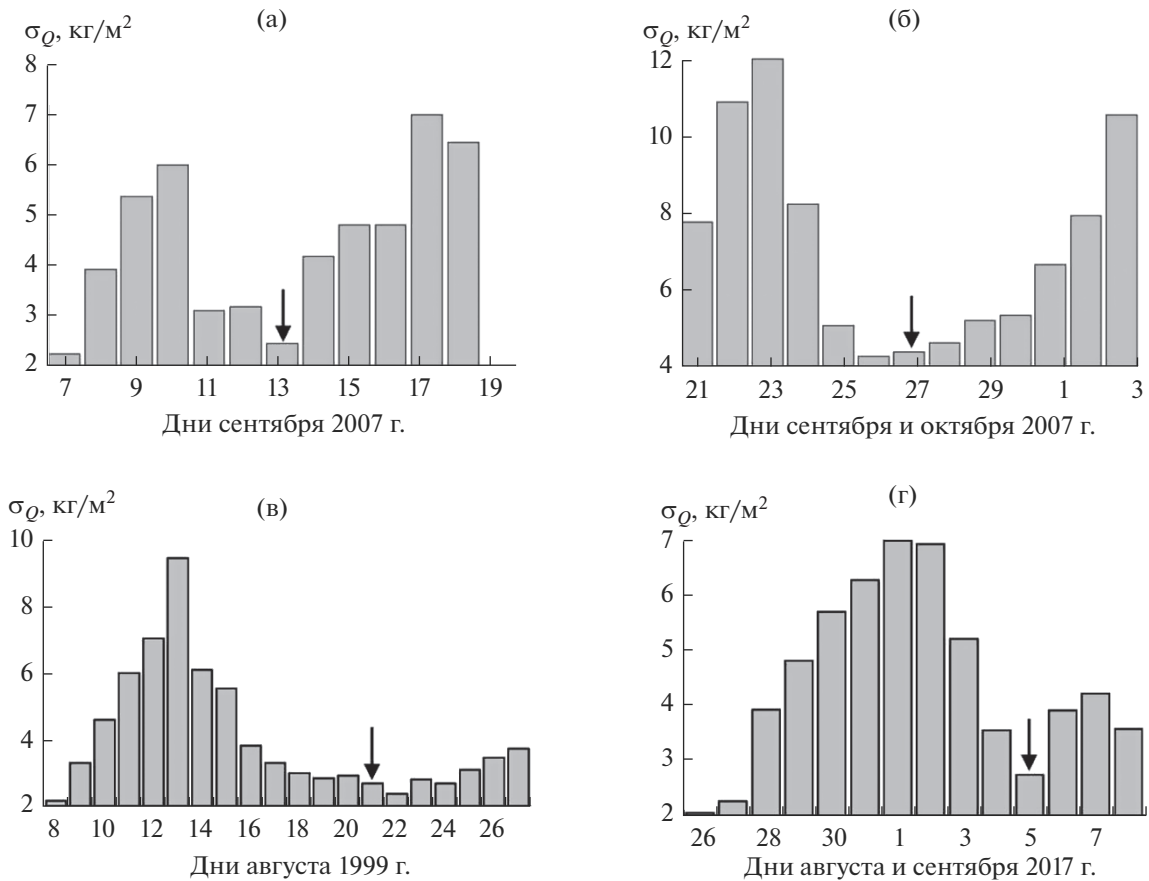


Рис. 5. Стандартные отклонения общего влагосодержания атмосферы σ_Q от среднесуточных значений в Мексиканском заливе в периоды зарождения и развития ТУ Humberto (а), Lorenzo (б), Bret (в) и Katia (г). Стрелкой отмечен момент перехода тропического образования в стадию урагана.

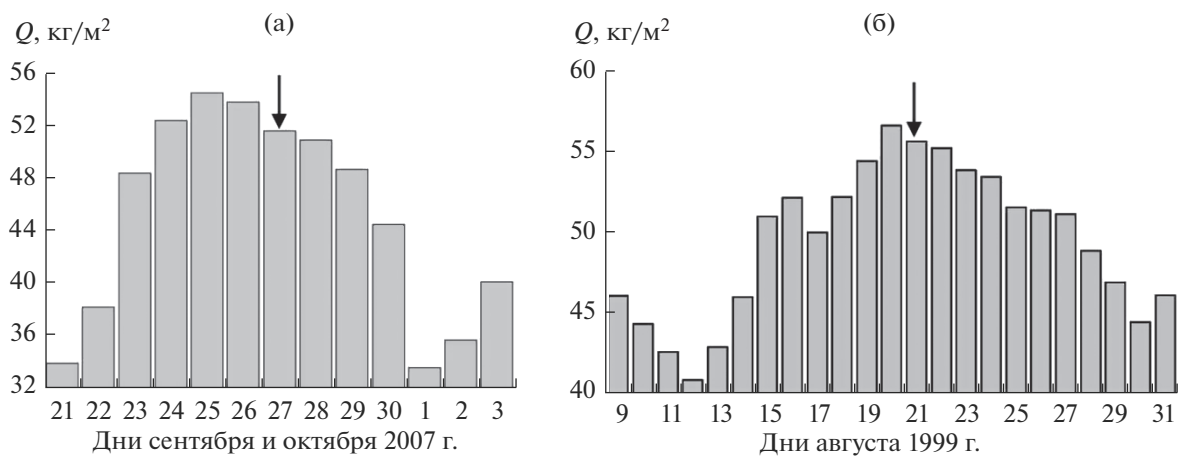


Рис. 6. Вариации среднесуточных значений общего влагосодержания атмосферы Q в Мексиканском заливе в периоды зарождения и развития ТУ Lorenzo (а) и Bret (б). Стрелками отмечены моменты перехода тропических образований в стадию урагана.

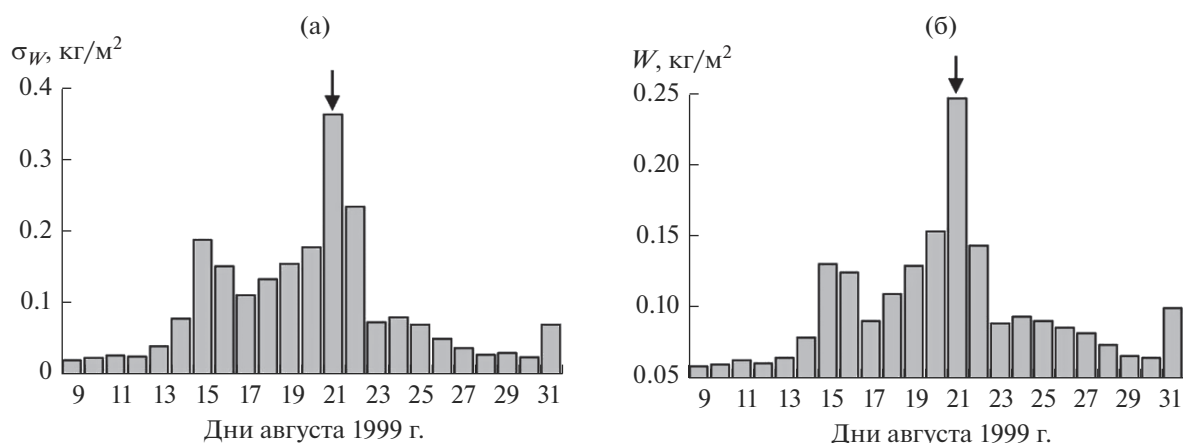


Рис. 7. Вариации стандартных отклонений σ_w (а) и средних значений W (б) общего водозапаса облаков W над Мексиканским заливом в период зарождения и развития ТУ Bret. Стрелкой отмечен момент перехода тропического образования в стадию урагана.

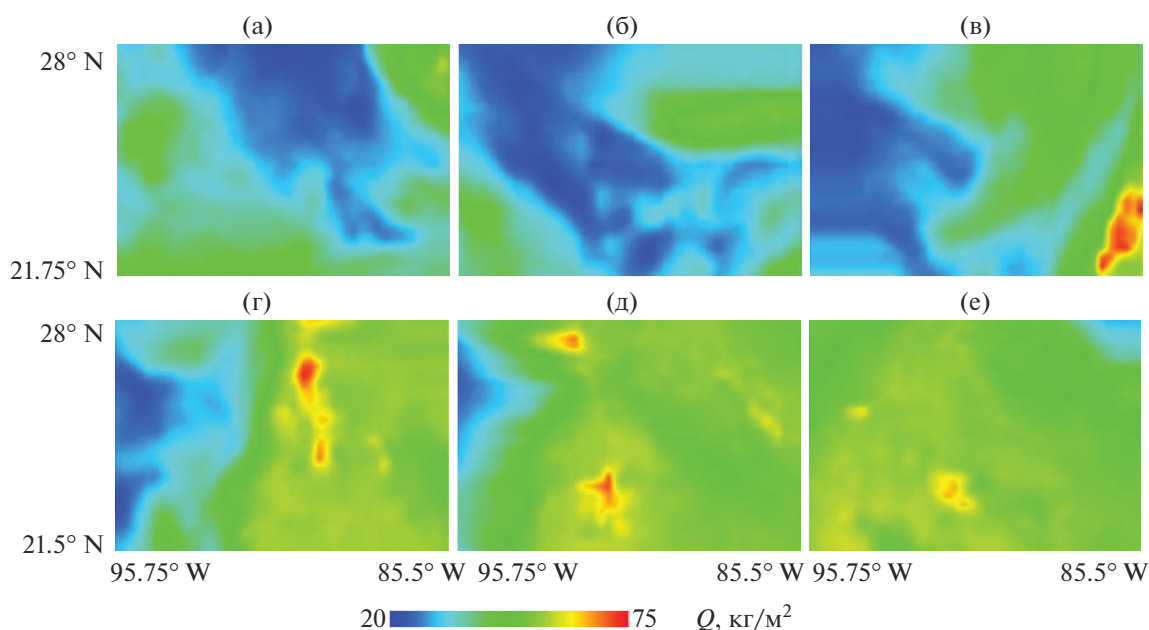


Рис. 8. Ураган Humberto: эволюции пространственного распределения ОВА в Мексиканском заливе в период 20 (а), 21 (б), 22 (в), 23 (г), 24 (д), 25 (е) сентября.

ские истории их формирования в Мексиканском заливе сильно различались [15, 16].

Проведен анализ группового отклика общего влагосодержания атмосферы на зарождение и развитие ТУ Humberto, Lorenzo, Bret и Katia в виде вариаций его усредненных в акватории залива среднесуточных значений. Выявлены общие для данных тропических образований особенности: “накачка” атмосферы водяным паром в период, предшествующий зарождению ураганов, монотонный рост величины Q за 5–8 сут до достиже-

ния стадии урагана и последующее снижение (примеры для ТУ Lorenzo и Bret приведены на рис. 6).

Выполнен анализ статистических характеристик общего (интегрального) водозапаса облаков в Мексиканском заливе в периоды зарождения и развития ТУ Humberto, Lorenzo, Bret и Katia. Его результаты указывают на следующую особенность: процесс пространственно-временной изменчивости данного параметра близок к классу процессов с постоянным коэффициентом вариации (отноше-

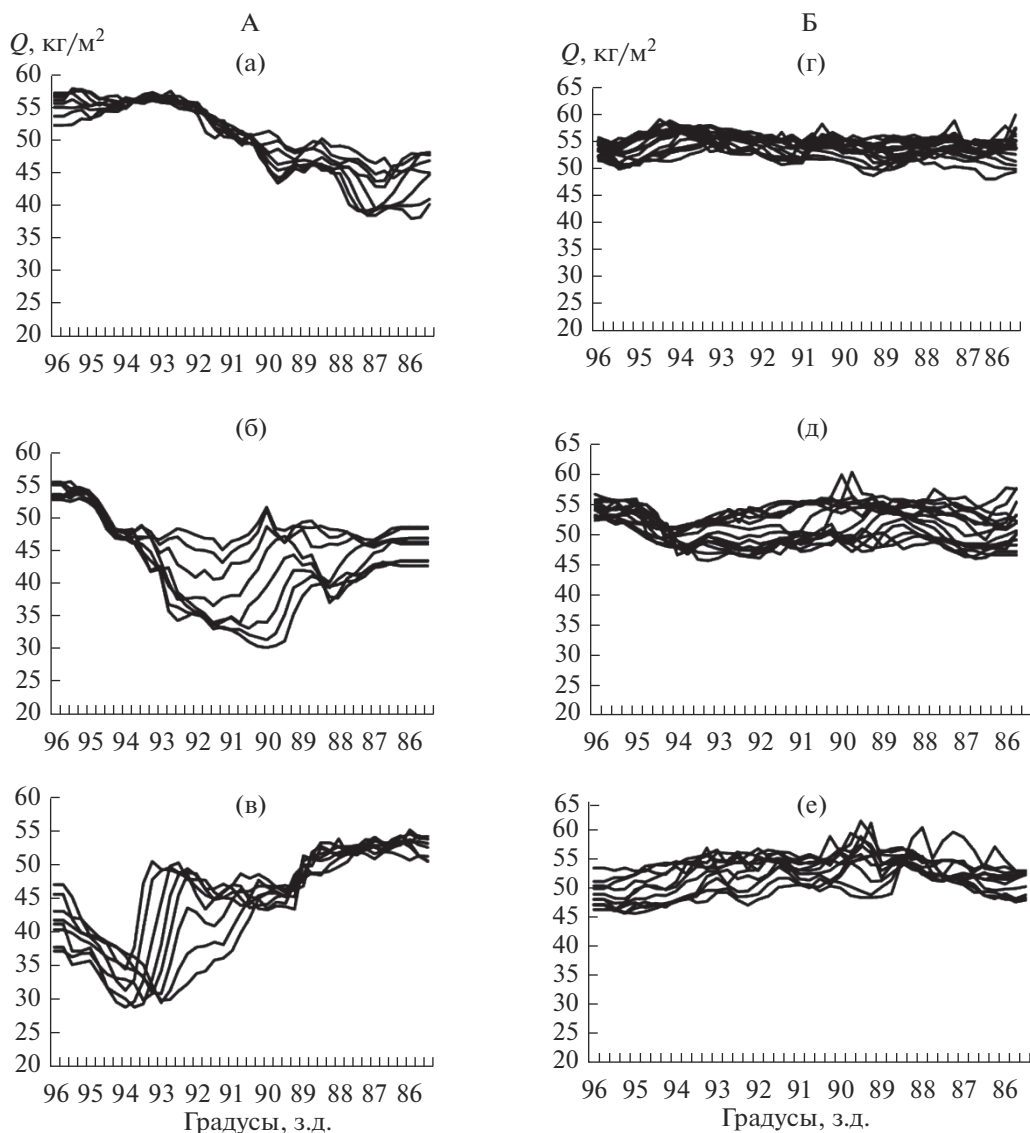


Рис. 9. Ураган Humberto: горизонтальные разрезы ОВА в северной (А) и южной (Б) частях Мексиканского залива: (а), (г) – 8.09.2007 г.; (б), (д) – 9.09.2007 г.; (в), (е) – 10.09.2007 г.

нием стандартного отклонения σ_w к среднему значению W). Отмеченная особенность иллюстрируется на рис. 7 на примере урагана Bret.

4. ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ РАЙОНОВ МЕКСИКАНСКОГО ЗАЛИВА ПО ЭВОЛЮЦИЯМ ПОЛЕЙ ВОДЯНОГО ПАРА В ПЕРИОД, ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ ЗАРОЖДЕНИЮ МЕСТНЫХ УРАГАНОВ

Наглядными характеристиками отклика атмосферы в акватории Мексиканского залива на процесс образования ураганов могут служить временные эволюции полей ее общего влагосодержания атмосферы (рис. 8).

Иллюстрация хорошо отражает приход в область зарождения ТУ Lorenzo теплой тропической волны с северо-восточного направления, динамику ее распространения, сопровождающуюся увеличением ОВА над заливом в период, предшествующий образованию урагана. Также наблюдаются резкое снижение дисперсии ОВА в период 23–25 сентября перед зарождением Lorenzo.

Возможность использования суточных отчетов для индикации эволюций ОВА в виде горизонтальных разрезов его пространственного распределения в Мексиканском заливе в период, предшествующий зарождению ТУ Humberto, демонстрирует также рис. 9.

Здесь представлены пространственные вариации параметра Q на сетке $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ в северной

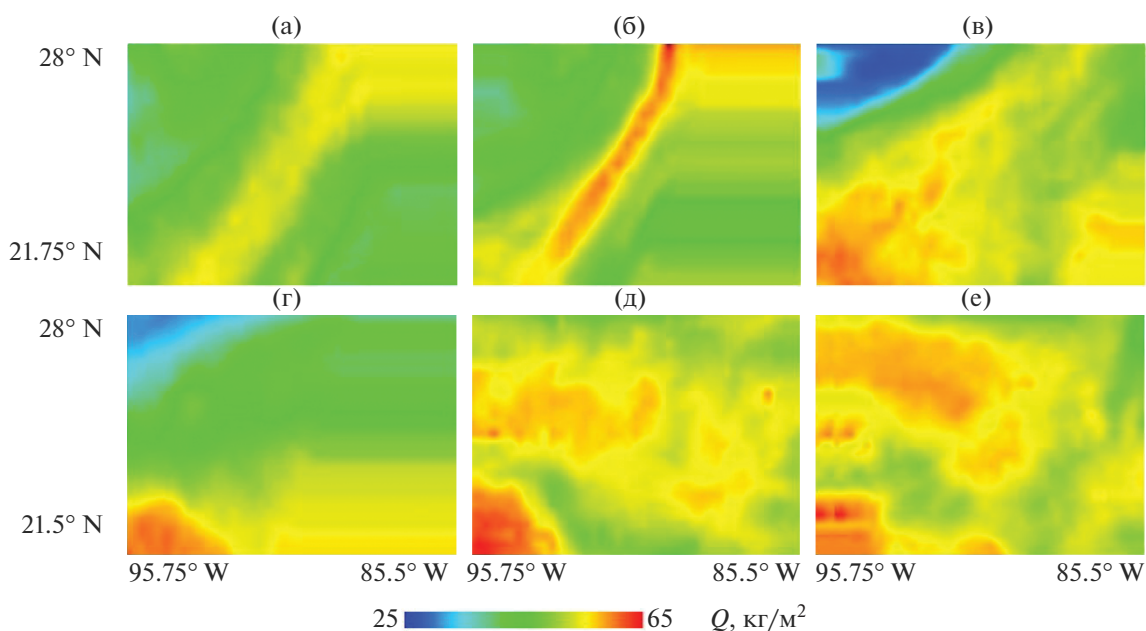


Рис. 10. Ураган Katia: эволюции пространственного распределения ОВА в Мексиканском заливе в период 20 (а), 21 (б), 22 (в), 23 (г), 24 (д), 25 (е) сентября по данным измерений радиометра SSM/I спутника F15 (20.09), радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua (30.09, 01.10, 04.10, 05.10) и радиометра SSMIS спутника F17 (02.10).

части залива (26° – 28° с.ш., 85.5° – 95.75° з.д.) и южной части (21.75° – 26° с.ш., 85.5° – 95.75° з.д.) в период 8–10 сентября, предшествующий возникновению тропической депрессии 13 сентября, трансформировавшейся впоследствии в ураган Humberto. Этот процесс, как видно из рис. 9, сопровождается сильной перестройкой поля ОВА исключительно в северной части Мексиканского залива, ограниченной атмосферным желобом у южного побережья Флориды и районом зарождения урагана у побережья Техаса. Несмотря на невысокую регулярность спутниковых измерений, наблюдение данного процесса в течение 3 сут позволяет выделить области с высокой дисперсией ОВА и зафиксировать их перемещение от атмосферного желоба к району зарождения ТУ Humberto.

Еще один пример мониторинга эволюций полей общего влагосодержания атмосферы в Мексиканском заливе иллюстрирует рис. 10, где представлена серия полученных с помощью спутников F15, F17 и EOS Aqua изображений пространственного распределения ОВА в период времени 29 сентября–5 октября 2017 г., предшествующий зарождению ТУ Katia в окрестности точки 21.8° с.ш., 95.2° з.д.

Из иллюстрации видно, что формирование ТУ Katia на начальной стадии 20–22 сентября сопровождается процессами адвективного переноса скрытого тепла в атмосфере. По данным [5], данный фактор играет также важную роль в интенсификации тропических образований на стадии зрелого урагана.

фикации тропических образований на стадии зрелого урагана.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАДАЧИ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты анализа пространственно-временной динамики радиоярких и влажностных характеристик атмосферы над Мексиканским заливом по данным измерений радиометра AMSR-E спутника EOS Aqua и радиометров SSM/I, SSMIS спутников DMSP указывают на существование значительных вариаций общего влагосодержания атмосферы (десятки $\text{кг}/\text{м}^2$) на различных стадиях образования и развития тропических образований Humberto, Lorenzo, Bret, Katia. Еще за несколько дней до их интенсификации до стадии урагана фиксируются заметные возмущения величины ОВА, сохраняющиеся даже после перемещения ураганов из Мексиканского залива на сушу.

Данные особенности проявляются не только в районах зарождения ураганов Humberto, Lorenzo, Bret, Katia, но и в областях Мексиканского залива, находящихся на значительном удалении (до 500–700 км) от них. Отмечается общая для ураганов Humberto, Lorenzo, Bret, Katia закономерность – усиление в течение нескольких дней пространственной изменчивости ОВА над акваторией Мексиканского залива и дальнейшее ее ослабление (затишье) перед финальной стадией – появле-

нием урагана. Наблюдается также “накачка” атмосферы водяным паром в период, предшествующий зарождению ураганов, монотонный рост величины ОВА за 5–8 сут до достижения стадии урагана и последующее снижение.

Эти наблюдения могут служить важными предпосылками для разработки технологий ранней диагностики зарождения ураганов в Мексиканском заливе на основе мониторинга пространственно-временной изменчивости общего влагосодержания атмосферы спутниковыми СВЧ-радиометрическими методами.

О возможности постановки такой задачи свидетельствует существование и повторяемость группового отклика поля общего влагосодержания атмосферы в Мексиканском заливе к процессам зарождения и развития местных ураганов. В дальнейшем, по-видимому, предстоит дать ответ на вопрос: является ли информация об эволюциях полей ОВА в Мексиканском заливе достаточной для определения времени зарождения тропических ураганов и местоположения их очагов, является ли при этом необходимым знание о пространственно-временной изменчивости скорости ветра и других параметрах приводного слоя атмосферы.

Можно констатировать, что современный арсенал зарубежных и отечественных спутниковых СВЧ-радиометрических средств, обладающих пространственным разрешением 20–30 км и регулярностью обзора 6–12 ч, обеспечит решение данных задач.

Автор выражает признательность своим коллегам А.А. Мильшину, Н.К. Шелобановой и Е.П. Новичихину за сотрудничество и полезные обсуждения.

Исследование проведено в ходе выполнения государственного задания № 0030-2019-0008 (шифр “Космос”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф. Космический мониторинг тропических циклонов. Москва: Научный мир, 2014. 508 с.
2. Шарков Е.А. Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
3. Покровская И.В., Шарков Е.А. Дистанционные исследования пространственных полей влагосодержания в тропической атмосфере в процессе циклогенеза // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 6. С. 18–27.
4. 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.
5. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. Роль тропосферных адвективных потоков скрытого тепла в интенсификации тропических циклонов // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 4. С. 3–15.
6. Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А., Покровская И.В. Поиск источника энергии при интенсификации ТЦ Katrina по данным микроволнового спутникового зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 47–56.
7. Grankov A.G., Marechek S.V., Milshin A.A., Novichikhin E.P., Golovachev S.P., Shelobanova N.K., Shutko A.M. Elaboration of Technologies for Diagnosis of Tropical Hurricanes Beginning in Oceans with Remote Sensing Methods, Chapter in collective monograph “Hurricane Researches”. InTech Publ. House, 2012. P. 23–41.
8. 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 // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 3. С. 228–239.
9. 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. // Докл. МНТОРЭС им. А.С. Попова. Материалы Международного симпозиума. Вып. XIV. Сер.: Пробл. экоинформатики. МНТОРЭС. 2020. С. 200–204.
10. Hollinger P.H., Peirce J.L., Poe G.A. SSM/I instrument evaluation // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing. 1990. V. 28. P. 781–790.
11. Kunkel D., Boucher D., Poe G., Swadley S. Design and evaluation of the first special sensor Microwave Imager/Sounder // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2008. V. 46. № 4. P. 863–883.
12. Kawanishi T, Sezai T, Imaoka K. et al. The advanced microwave scanning radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA’s contribution to the EOS for global energy and water cycle studies // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. № 48. P. 173–183.
13. Blake E.S. Tropical Cyclone Report: Hurricane Humberto, 12–14 September 2007. National Hurricane Center, 28 November 2007.
14. Franklin J.L. Tropical Cyclone Report: Hurricane Lorenzo, 22–28 September 2007. National Hurricane Center, 18 October 2007.
15. Lawrence M.B., Kimberlain T.B. Tropical Cyclone Report: Hurricane Bret, 18–25 August 1999. Miami: National Hurricane Center (Revised 26 February 2001).
16. Avila L.A. Tropical Cyclone Report: Hurricane Katia, 5–9 September 2017. Miami: National Hurricane Center, 14 February 2019.

On the Relationship of the Atmosphere Humidity Fields in the Gulf of Mexico with the Processes of Hurricane Origin and Development

A. G. Grankov*

*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*

An approach to the study of the processes of hurricane formation in the Gulf of Mexico is considered, based on the analysis of the group (averaged over the Gulf) response of the total atmospheric moisture content to these processes based on satellite microwave radiometric measurements. The spatial and temporal variability of the moisture content in different years during the periods of origin and development of local tropical hurricanes Humberto (2007), Lorenzo (2007), Bret (1999), Katia (2017) from the DMSP (SSM/I and SSMIS radiometers) and EOS Aqua (AMSR-E radiometer) satellites was analyzed. There is a cooperative response of the moisture content of the atmosphere to the process of development of these hurricanes over vast areas of the Gulf of Mexico, located at a considerable distance (up to 500–700 km) from the areas of their origin. There is a common feature for hurricanes Humberto, Lorenzo, Bret, Katia – an increase in the spatial variability of the total moisture content of the atmosphere over the Gulf of Mexico over several days and its further weakening (calm) before the final stage – the appearance of a hurricane. The tasks of further researches are discussed.

Keywords: hurricanes, Gulf of Mexico, atmospheric moisture content, microwave radiometry, brightness temperature