

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021»

Анализ связи радиотепловых и метеорологических полей с процессами зарождения и развития ураганов в Мексиканском заливе

А.Г. Гранков, А.А. Мильшин, Е.П. Новичихин, Н.К. Шелобанова

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

На основе данных спутниковых СВЧ-радиометрических измерений проведен анализ пространственно-временной изменчивости яркостной температуры в спектральной области резонансного излучения водяного пара атмосферы, а также метеорологических параметров в Мексиканском заливе в период зарождения и развития тропических ураганов Humberto и Lorenzo в сентябре-октябре 2007 г. Результаты анализа указывают на участие в формировании отклика яркостной температуры на зарождение ураганов обширных областей Мексиканского залива. Оценивается роль пространственной дисперсии влагозапаса атмосферы над акваторией Мексиканского залива как количественного индикатора процессов зарождения и развития ураганов Humberto и Lorenzo.

Ключевые слова: ураганы, водяной пар атмосферы, СВЧ-радиометрия, яркостная температура.

Analysis of the relationship of radiothermal and meteorological fields with the processes of the origin and development of hurricanes in the Gulf of Mexico

A.G.Grankov, A.A.Milshin., E.P.Novichikhin., N.K.Shelobanova

Fryazino Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS

On the basis of satellite microwave radiometric measurements, the spatial and temporal variability of brightness temperature in the band of resonant radiation of atmospheric water vapor, as well as meteorological parameters in the Gulf of Mexico during the origin and development of tropical hurricanes Humberto and Lorenzo in September-October 2007 was analyzed. The results of the analysis indicate the participation of large areas of the Gulf of Mexico in the formation of the brightness temperature response to the origin of hurricanes. The role of spatial dispersion of atmospheric moisture content over the Gulf of Mexico as a quantitative indicator of the processes of origin and development of hurricanes Humberto and Lorenzo is evaluated.

Keywords: hurricanes, atmospheric water vapor, microwave radiometry, brightness temperature.

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 в 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 (ОВА), – 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 общего 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 влагозапаса атмосферы над его акваторией. На предположении о существовании такой связи основана идея использования изменчивости полей ОВА в заливе для локализации места и времени зарождения ураганов по данным спутниковых измерений на длине волны 1.35 см посредством аппарата сопряженных уравнений [9]. Водяной пар рассматривается здесь как турбулентно-диффузионная примесь атмосферы подобно пассивным примесям (загрязнениям) в Азовском море, для локализации источника которых с помощью спутникового сканера MODIS такой подход успешно использован в [10].

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 и Lorenzo принадлежат к числу немногих тропических образований, зародившихся в акватории Мексиканского залива, – например, 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; в период с 1995 по 2017 годы 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 статье приведены результаты анализа характеристик пространственно-временной изменчивости в Мексиканском заливе яркостной температуры в резонансной области излучения водяного пара атмосферы, а также влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в периоды зарождения и развития ураганов Humberto и Lorenzov сентября-октябре 2007 г. Оценивается значимость пространственной дисперсии влагозапаса атмосферы над акваторией залива как количественного индикатора процессов зарождения и развития данных ураганов.

Отклик яркостной температуры в Мексиканском заливе на зарождение ТУ Humberto

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 25 до 80 морских узлов произошло в течение 19 часов (12-13 сентября). Более подробные сведения о синоптической истории развития ТУ Humberto приведены в [11].

Нами проведен анализ изменчивости суточных значений ЯТ по данным спутниковых СВЧ-радиометрических измерений в Мексиканском заливе в период развития ТУ Humberto в районах расположения буйковых станций наблюдательной сети NOAA (рис. 1). Станции сети, расположенные вблизи береговой линии залива, исключены из рассмотрения, чтобы избежать искажений оценок ЯТ, обусловленных попаданием суши в поле зрения антенн спутниковых радиометров.

Используется архив RSS (RemoteSensingSystems) данных измерений многоканального сканирующего СВЧ-радиометра AMSR-Ена восходящих и нисходящих витках спутника EOSAqua (AdvancedMicrowaveScanningRadiometer), представленных в виде сеточных значений ЯТ для квадратов $0.25 \times 0.25^\circ$ поверхности земного шара с временным разрешением 12 часов. Радиометр AMSR-Е представляет собой сканирующую шестичастотную систему, измеряющую яркостную температуру собственного СВЧ-излучения COA под углом наблюдения 52° на горизонтальной и вертикальной поляризациях в полосе обзора 1400 км, и обеспечивающую глобальное покрытие Земли за трое суток, а неполное за сутки[12]. Рабочие частоты двух каналов радиометра 23.8 ГГц (1.26 см) и 18.7 ГГц (1.6 см) соответствуют спектральной области резонансного поглощения (излучения) водяного пара атмосферы.

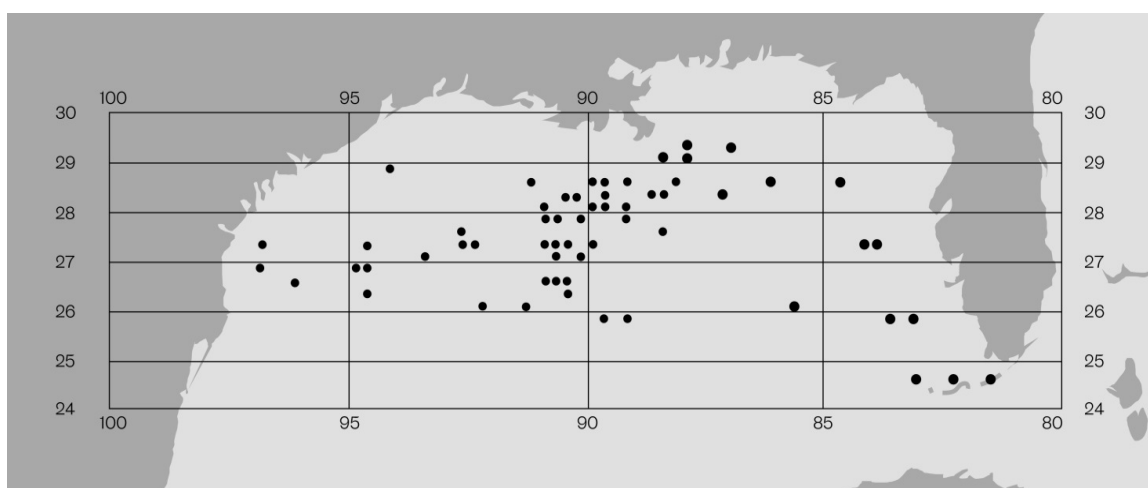


Рис. 1. Схема расположения буйковых станций в Мексиканском заливе. По вертикальной оси – градусы с. ш., по горизонтальной – градусы з. д.

В архиве RSS предусмотрена селекция и отбраковка данных отдельных измерений ЯТ, испытавших влияние подсвета радиоизлучения Солнца, внешних радиопомех, зон мощных осадков [13]; для устранения пропусков нами проведена интерполяция данных в таких фрагментах архива.

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 на стадии тропической депрессии.

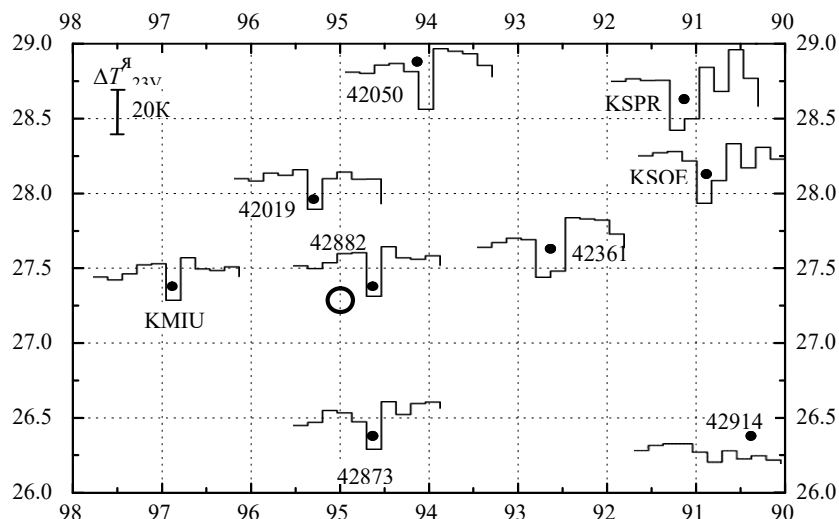


Рис. 2. Вариации ЯТ в период развития ТУ Humberto (5-15 сентября 2007 г.) в районах расположения станций, ближайших к району его зарождения (отмечен кружком). По вертикальной оси – градусы с.ш., по горизонтальной – градусы з. д.

Наблюдается дружный отклик ЯТ на зарождение ТУ Humberto в областях Мексиканского залива, находящихся на значительном удалении (до 300–500 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-Е на длине волны 1.6 см (18.7 ГГц) в области излучения водяного пара, который также реагирует на оба этих атмосферных параметра.

Отклик общего влагосодержания атмосферы и скорости приводного ветра в Мексиканском заливе на зарождение ТУ Lorenzo

ТУ Lorenzo зародился вскоре после урагана Humberto в северо-западной части Мексиканского залива (20.5°с.ш., 96.3°з.д.), его синоптическая история описана в [14]. Увеличение скорости приводного ветра с 25 до 80 морских узлов здесь произошло в течение 42 часов (25-27 сентября).

Выполнен анализ изменчивости суточных значений общего влагосодержания атмосферы Q и скорости ветра в ее приводном слое V в отдельных областях Мексиканского залива с помощью архива NSIDC (National Snow & Ice Data Center), представленных на пространственной сетке $0.25 \times 0.25^\circ$ с временным разрешением 24 часа на основе результатов тематической обработки данных измерений радиометра AMSR-Е спутника EOS Aqua.

Рис. 3 иллюстрирует и изменчивость суточных значений ОВА в области 19–25°с.ш., 82–98°з.д. Мексиканского залива для ряда точек в окрестности зарождения урагана Lorenzo.

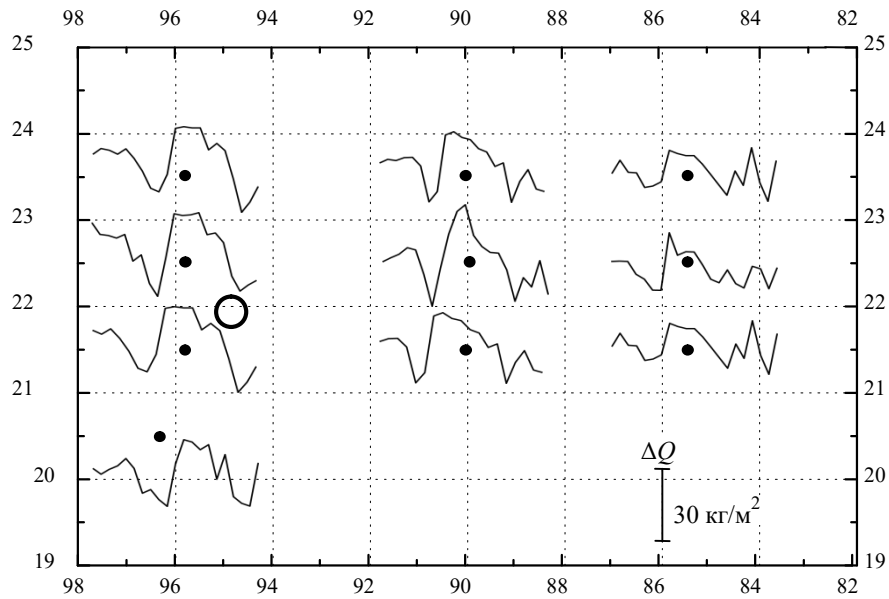


Рис. 3. Вариации ОВА в районе зарождения урагана Lorenzo в период 15 сентября – 5 октября 2007 г. Кругком выделен район зарождения тропической депрессии.

Рисунок демонстрирует дружный отклик водяного пара атмосферы на зарождение ТУ Lorenzo в различных точках Мексиканского залива, находящихся на удалении от района его зарождения до 300–500 км. Наблюдается заметное снижение величины Q на $15\text{--}20\text{ кг/м}^2$ в прилегающих к точке зарождения урагана областях в течение 5–7 дней на начальной стадии урагана (тропической депрессии) и сильный рост на $20\text{--}25\text{ кг/м}^2$ в течение последующих 4–5 дней при интенсификации тропического образования Lorenzo до стадии урагана (28 сентября).

На рис. 4 представлены результаты анализа изменчивости суточных значений скорости ветра в приводном слое атмосферы на различных стадиях развития урагана Lorenzo для ряда точек области $19\text{--}22^\circ\text{с.ш.}$, $95\text{--}98^\circ\text{з.д.}$ Мексиканского залива, прилегающей к району его зарождения.

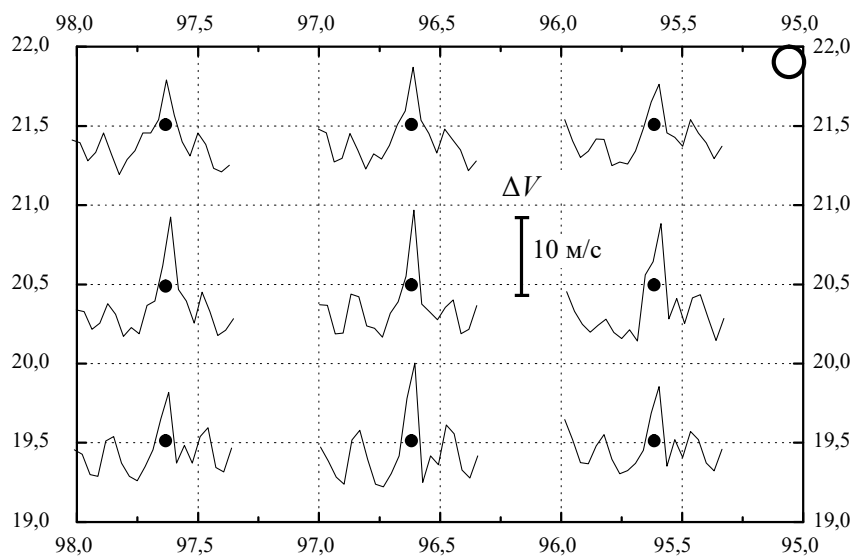


Рис. 4. Вариации скорости приводного ветра V в окрестности зарождения урагана Lorenzo в период 15 сентября – 5 октября 2007 г. Кругком выделен район зарождения тропической депрессии.

Во всех выделенных точках данной области интенсификация тропического образования Lorenzo до стадии урагана сопровождается резким всплеском скорости приводного ветра (с 2–3 до 10–15 м/с).

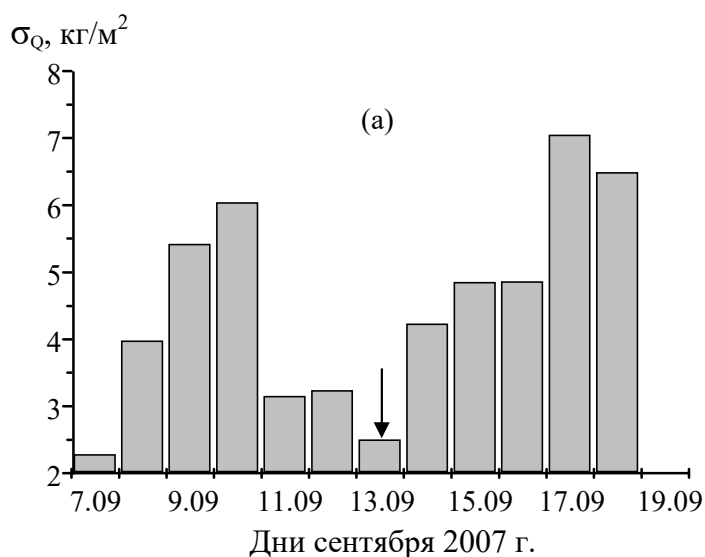
Приведенные примеры указывают на то, что формирование ТУ Humberto и Lorenzo сопровождается отчетливой реакцией общего влагосодержания атмосферы, скорости приводного ветра и яркостной температуры в спектральной области резонансного излучения атмосферного водяного пара не только в районах зарождения этих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

Групповой отклик влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков в Мексиканском заливе на ТУ Humberto и Lorenzo

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 очагах зарождения этих ураганов наводит на мысль о целесообразности изучения группового (формируемого всей акваторией залива) отклика этих характеристик и их связи с историями и предысториями возникновения и развития этих ураганов.

С помощью данных архива NSIDC проведен анализ статистических характеристик пространственной изменчивости общего влагосодержания атмосферы Q и водозапаса облаков W в области 21.75° – 28° с.ш., 85.5° – 95.75° з.д. Мексиканского залива в период 1 сентября - 5 октября 2007 г., полностью охватывающий синоптические истории ТУ Humberto и Lorenzo, а также их предыстории. 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 $0.25 \times 0.25^\circ$.

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).



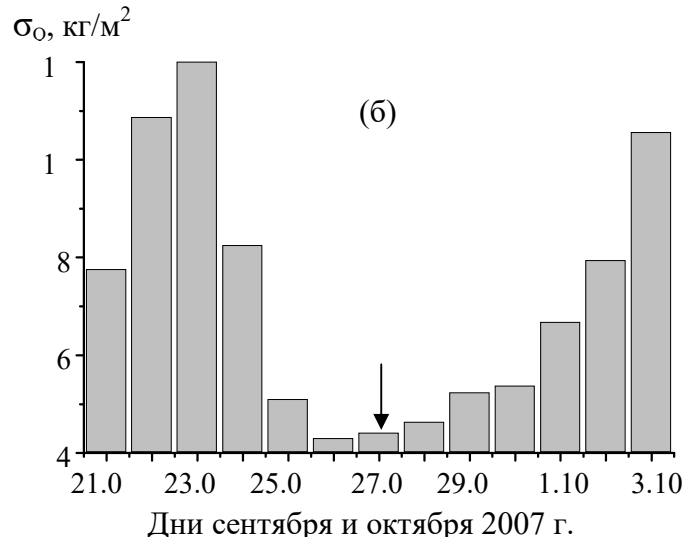


Рис. 5. Стандартные отклонения общего влагосодержания атмосферы σ_0 в Мексиканском заливе в периоды зарождения и развития ТУ Humberto (а) и Lorenzo (б). Стрелками отмечены моменты перехода тропических образований в стадию урагана.

Аналогичный результат наблюдается при анализе группового отклика на зарождение ТУ Humberto и Lorenzo пространственной дисперсии общего водозапаса облаков (содержания капельной влаги) в Мексиканском заливе (рис. 6).

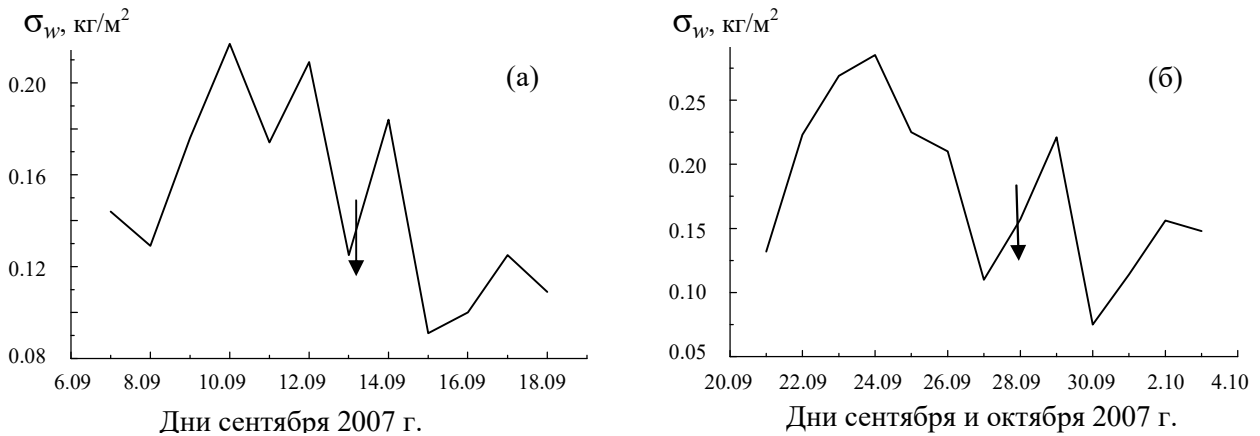


Рис. 6. Стандартные отклонения общего водозапаса облаков σ_w от средних значений в Мексиканском заливе в периоды зарождения и развития ТУ Humberto (а) и Lorenzo (б). Стрелками отмечены моменты перехода тропических образований в стадию урагана.

При этом временная динамика средних значений параметра W имеет сходные черты с динамикой изменений параметра σ_w в периоды развития обоих ураганов (рис. 7).

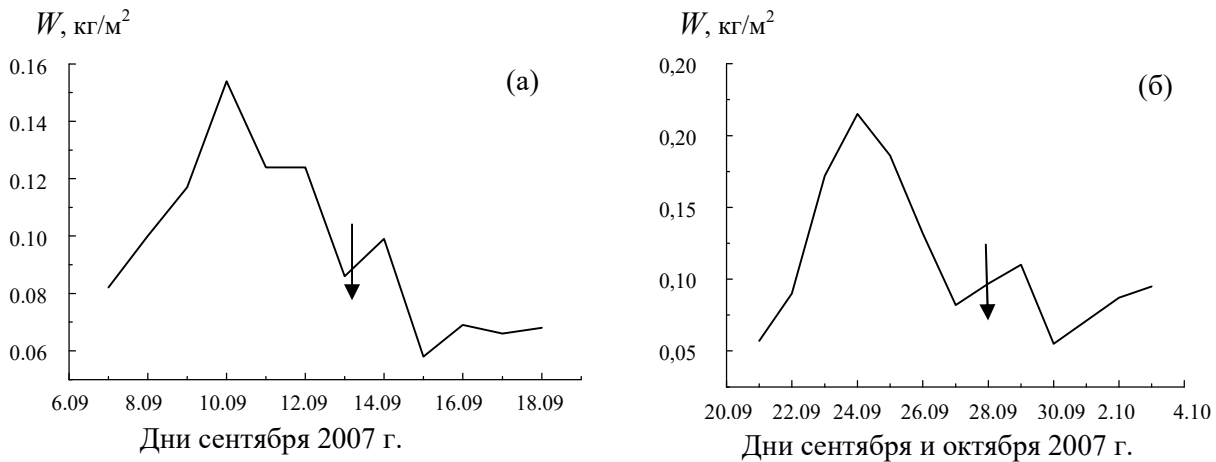
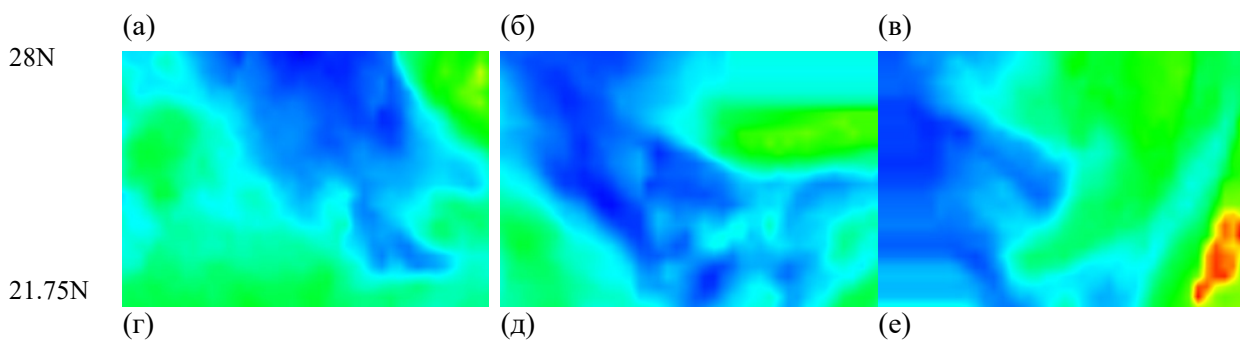


Рис. 7. Средние значения общего водозапаса облаков W в Мексиканском заливе в периоды зарождения и развития ТУ Humberto (а) и Lorenzo (б). Стрелками отмечены моменты перехода тропических образований в стадию урагана.

Отметим, что сходству откликов параметров σ_Q и σ_w на активность ТУ Humberto и Lorenzo не препятствует различие их синоптических историй. Причиной образования первого послужил местный фактор – перемещение атмосферного желоба от южного побережья Флориды к северо-западной части Мексиканского залива [11], а зарождение ТУ Lorenzo произошло вследствие прихода в Мексиканский залив тропической волны с западного побережья Африки [14].

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 может служить временные эволюции полей ее общего влагосодержания атмосферы, водозапаса облаков, скорости приводного ветра. В качестве примера на рис. 8 представлена серия изображений распределения ОВА в заливе в период времени, предшествующий зарождению ТУ Lorenzo. Данная иллюстрация дает достаточно цельную картину эволюций ОВА в этот период, несмотря на то, что ее фрагменты построены по данным измерений спутника EOSAQuas временным разрешением 24 часа. Для полей общего водозапаса облаков и скорости ветра в приводном слое атмосферы, характеризующихся более высокой пространственно-временной изменчивостью по сравнению с полями водяного пара, при этом временном разрешении такой цельности достичь не удастся.



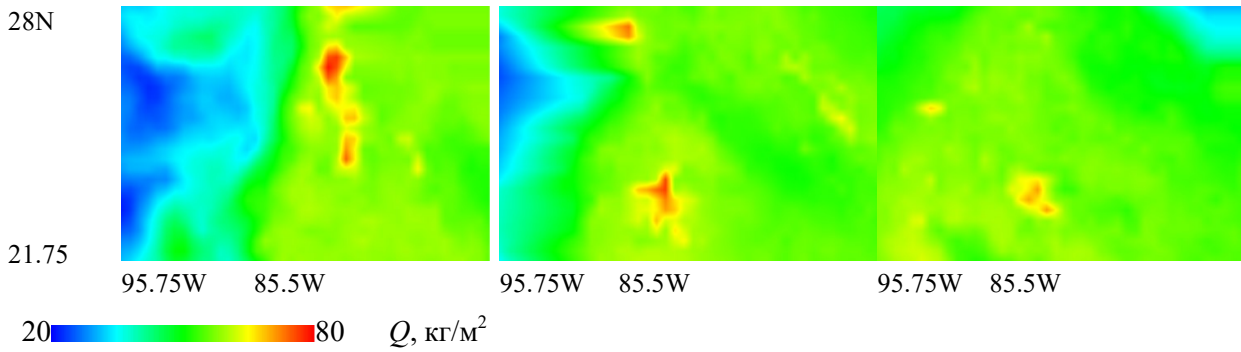
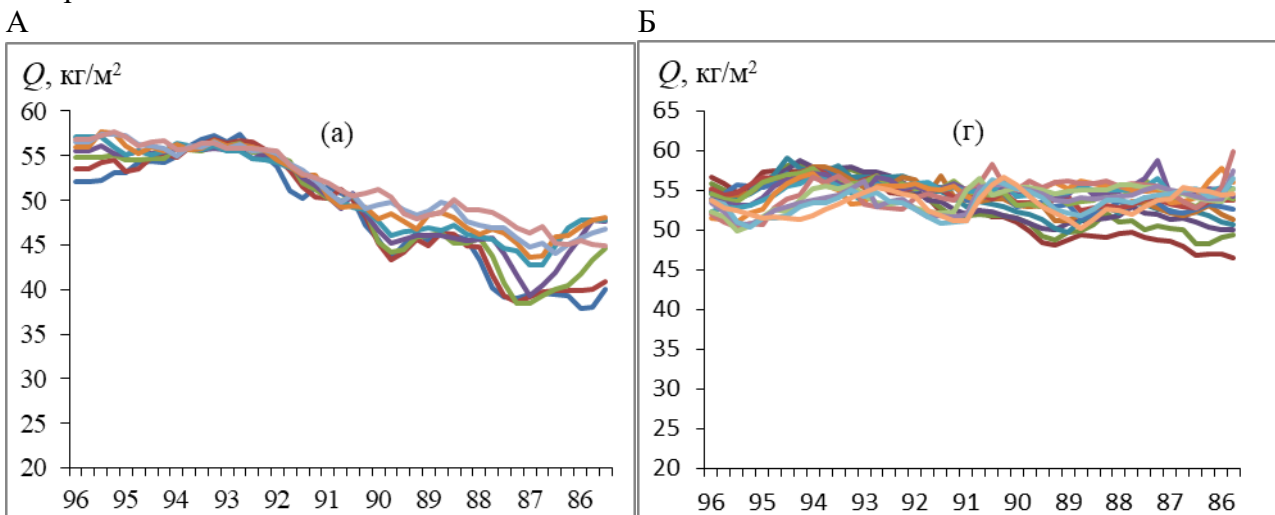


Рис. 8. Эволюции пространственного распределения ОВА в Мексиканском заливе в период 20 (а), 21 (б), 22 (в), 23 (г), 24 (д), 25 (е) сентября.

Рис. 8 хорошо отражает приход в область зарождения ТУ Lorenzотеплой 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 отсчетов 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 $0.25 \times 0.25^\circ$ в северной части залива ($26-28^\circ$ с.ш., $85.5-95.75^\circ$ з.д.) и южной части ($21.75-26^\circ$ с.ш., $85.5-95.75^\circ$ 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-х суток позволяет выделить области с высокой дисперсией ОВА и зафиксировать их перемещение от атмосферного желоба к району зарождения ТУ Humberto.



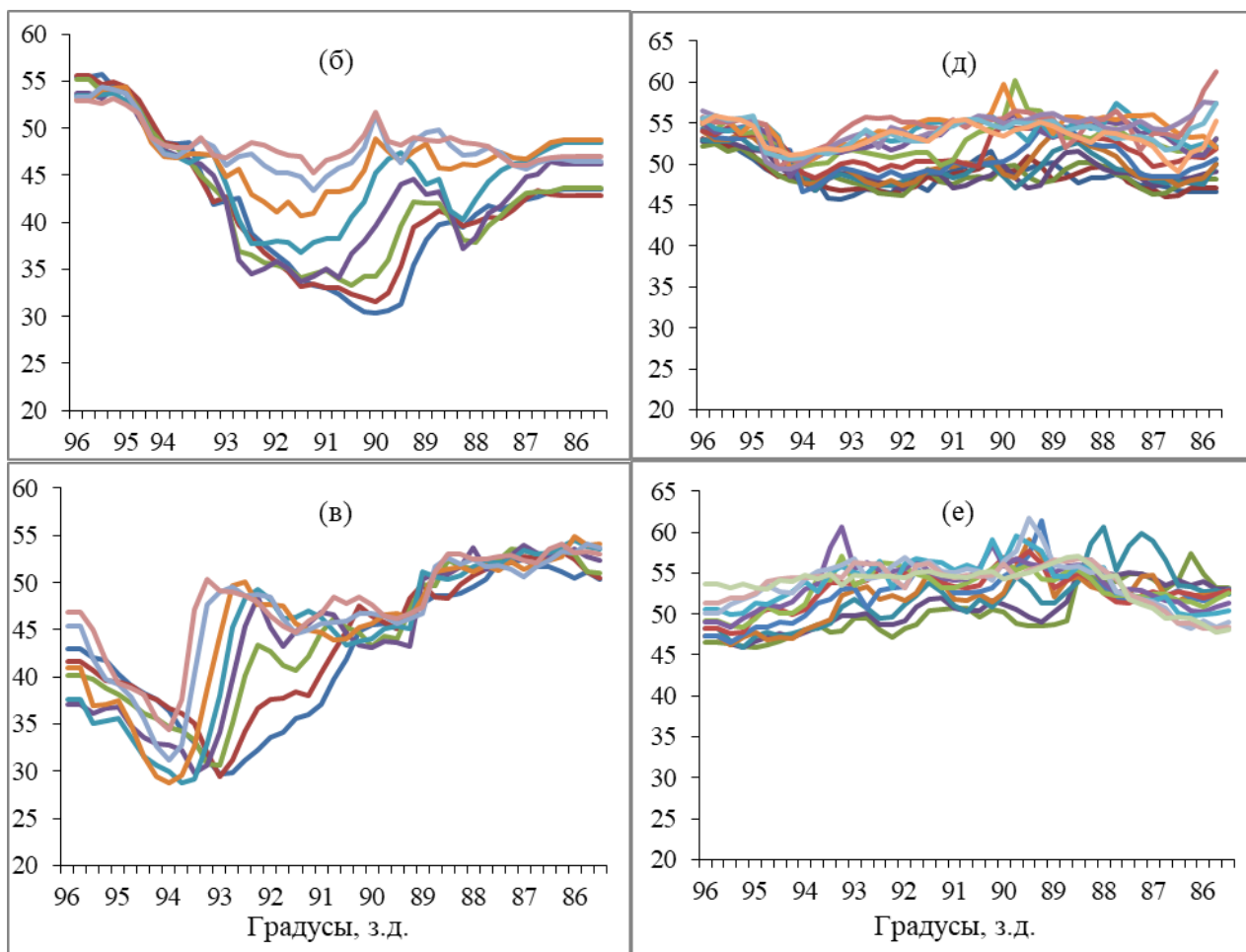


Рис. 9. Горизонтальные разрезы ОВА в северной (А) и южной (Б) частях Мексиканского залива: (а), (г) – 8.09.2007 г.; (б), (д) – 09.09.2007 г.; (в), (е) – 10.09.2007 г.

Обсуждение результатов и задачи дальнейших исследований

Проведенный анализ связи процессов зарождения ураганов Humberto и Lorenzo в Мексиканском заливе с пространственно-временной изменчивостью СВЧ-излучательных и метеорологических характеристик атмосферы над его акваторией на основе данных измерений радиометра AMSR-E спутника EOSAqua позволяет выделить несколько результатов:

1. Наблюдаются сильные вариации яркостной температуры (десятки Кельвинов), измеряемые каналами 23.8 ГГц (1.26 см) и 18.7 ГГц (1.6 см) радиометра в спектральной области резонансного излучения водяного пара атмосферы, а также спутниковых оценок вариаций общего влагосодержания атмосферы на различных стадиях образования и развития тропических образований Humberto и Lorenzo. Еще за несколько дней до их интенсификации до стадии ураганов фиксируются заметные возмущения СВЧ-излучательных и метеорологических характеристик атмосферы, сохраняющиеся даже после их перемещения из Мексиканского залива на сушу, – впоследствии данные характеристики возвращаются к своим прежним (невозмущенным) значениям.

2. Отмеченные выше особенности эволюций СВЧ-излучательных и метеорологических характеристик атмосферы на разных стадиях образования ураганов Humberto и Lorenzo проявляются не только в районах их зарождения, но и в областях Мексиканского залива, находящихся на значительном удалении (до 300–500 км) от

них. Это позволяет в частности говорить о возможности существовании кооперативного (группового) эффекта для различных частей залива в формировании отклика влагосодержания атмосферы и яркостной температуры на процессы зарождения и развития ураганов в заливе.

3. Существование кооперативного эффекта облегчает задачу слежения за эволюциями полей атмосферного водяного пара в заливе на различных стадиях образования ураганов Humberto и Lorenzo, которая может казаться проблемной из-за невысокой регулярности спутниковых измерений.

Можно наблюдать отчетливую реакцию влажностных характеристик атмосферы над акваторией Мексиканского залива на образование ураганов Humberto и Lorenzo с общей для них особенностью – усиление пространственной дисперсии общего содержания водяного пара в атмосфере в течение нескольких дней и дальнейшее ее ослабление (затишье) перед финальной стадией – появлением урагана. Отмечается также всплеск количества капельной влаги в атмосфере, характеризуемого общим водозапасом облаков, за несколько суток до зарождения ураганов.

В задачи дальнейших исследований входит валидация перечисленных результатов на материалах других ураганов с "пропиской" в Мексиканском заливе в разные годы и повышение временного разрешения спутниковых оценок яркостной температуры и метеорологических характеристик атмосферы от 24 до 6–12 часов путем комплексирования данных со спутника EOSAqua (радиометр AMSR-E) и спутников серии DMSP (радиометры SSM/I и SSMIS).

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

Литература

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 // Исследование 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". In Tech Publ. House. 2012. P. 23–41.
8. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Новичихин Е.П., Шелобанов Н.К. Использование спутниковых радиометрических СВЧ-измерений для анализа влагосодержания атмосферы при развитии тропических ураганов // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. №9. С. 959–966.

9. Гранков А.Г. Тропические ураганы: перспективные подходы для изучения их зарождения со спутников / Под ред. Мкртчяна Ф.А. Доклады НТОРЭС им. А.С. Попова. Материалы Международного симпозиума. Вып. X. Сер.: Инженерная экология. МНТОРЭС. 2017. С. 47-50.
10. Кочергин В.С., Кочергин С.В., Станичный С.В. Использование метода сопряженных уравнений при идентификации источников загрязнения в Азовском море // Совр. пробл. дист. зондир. Землиизкосмоса. 2017. Т. 14. № 1.С. 50–57.
11. Blake E.S. Tropical Cyclone Report: Hurricane Humberto, 12-14 September 2007. National Hurricane Center, 28 November 2007.
12. Kawanishi T, Sezai T, Ito 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. RSS Technical Document 07032014SSMI: RSS SSM/I Version-7 Brightness Temperature Data Set netCDF File Format Specification. Version-7, Release 0, July 3, 2014.
14. Franklin J.L. Tropical Cyclone Report: Hurricane Lorenzo, 22-28 September 2007. National Hurricane Center, 18 October 2007.