

УДК 551.510.5;550.388.2;550.3+551.5/629.78

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ GPS-СЕТЕЙ

© 2012 г. В. И. Захаров, В. Е. Куницын

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

физический факультет, г. Москва

e-mail: zvi\_555@list.ru, atm5571@phys.msu.ru

Поступила в редакцию 30.01.2011 г.

После доработки 05.07.2011 г.

С использованием статистически значимого материала показано, что методика GPS-наблюдений является эффективной для выделения отклика верхней атмосферы на глобальные синоптические процессы корреляционными методами.

Получено, что волновые структуры, детектированные методом GPS-интерферометрии на выбранной наблюдательной сети, географически связаны с местами орографических возмущений. Например, возможна генерация акустико-гравитационных волновых возмущений на береговой линии при ее обтекании воздушными массами, захваченными тайфуном. Установлено, что возбуждение таких волновых структур наиболее эффективно происходит при большой скорости развития или спада тайфуна. При этом резко меняется структура, а именно, параметр спадания спектра волновых возмущений.

Проведенный анализ не выявил статистически значимой связи появления волновых структур непосредственно с ядром (глазом) тайфуна или циклона.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На верхнюю атмосферу и ионосферу Земли оказывают влияние различные группы процессов, протекающих как в околоземном космическом пространстве, так и в нижней атмосфере, в системе литосфера–атмосфера. Механизмы передачи на ионосферные высоты атмосферных воздействий или откликов от атмосферных явлений изучены явно недостаточно. Они представляют собой не связную теорию, но являются набором нескольких физически оправданных и, в ряде случаев экспериментально подтверждаемых, предположений. В этой связи волновой перенос энергии является, пожалуй, наиболее эффективным, но не единственным, механизмом, в котором рассматривают распространяющиеся вверх от поверхности Земли внутренние атмосферные волны, генерируемые определенными источниками. Считается, что волновой отклик ионосферно-термосферной системы на внешние воздействия [Данилов и др., 1987; Казимировский и Кокоуров, 1979; Noske and Schlegel, 1996] может быть также связан и с различными достаточно крупными атмосферными явлениями, такими как грозовая активность, тропические циклоны, тайфуны, ураганы, торнадо и т.п. Обычно детектирование ионосферных возмущений основано на выделении вариаций электронной концентрации, которые исследователи связывают с метеорологическими или иными возмущениями.

С точки зрения “медленных”, или квазистационарных, ионосферных проявлений атмосферных процессов в работе [Ванина-Дарт и др., 2007] рассмотрено понижение электронной концентрации над тропическим циклоном на высотах ~70 км, причем на высотах максимума слоя  $F_2$  влияние циклона не выявлено. Вместе с тем, в работе [Бондур и др., 2008] регистрируется увеличение электронной концентрации в максимуме слоя  $F_2$  при прохождении печально известного урагана KATRINA, что, по мнению авторов, связано с воздействием электрического поля, индуцированного ураганом.

В работе [Bertin et al., 1975] были рассчитаны азимут и горизонтальная скорость нескольких волновых ПИВ (перемещающихся ионосферных возмущений) метеорологического происхождения. Авторы утверждают, что вероятные зоны генерации зарегистрированных ПИВ лежат в тропосфере и совпадают с областями пониженного атмосферного давления в районах формирования циклонов, а сами волновые структуры имеют периоды в диапазоне 20–110 мин. В работе [Huang et al., 1985] на решетке доплеровских установок было проведено исследование параметров ПИВ во время 12-ти тайфунов (1982–1983 гг.), причем лишь для двух событий авторы смогли обнаружить ионосферный отклик в форме квазипериодических вариаций с характерным периодом порядка 15 мин, что близко к периодам, полученным по данным микробарографов. Однако в

более поздней работе [Xiao Zuo et al., 2007] проведен анализ записей метеопараметров вдвое большего количества событий — 24-х сильных тайфунов 1987–1992 гг. и выполнено сравнение с соответствующими данными ионосферных ВЧ-доплеровских сдвигов. Показано, что во время тайфуна часто выявляются среднемасштабные ПИВ, особенно когда сильный тайфун приземляется или находится вблизи побережья.

Ряд наблюдаемых экспериментально явлений в целом согласуется с линейной теорией распространения внутренних, акустико-гравитационных волн (АГВ) в атмосфере [Лайтхилл, 1970; Куницын и др., 2007]. Таким образом, в целом можно считать доказанным, что тайфун (ураган) является одним из важных наземных источников волнообразных возмущений в тропосфере.

В последние пятнадцать лет очень активно развиваются технологии дистанционной диагностики ионосферы с помощью сигналов спутниковой радионавигационной системы GPS. Идеология такого мониторинга была предложена довольно давно [Hoffmann-Wellenhof et al., 1992]. Методика была развита и усовершенствована в целом ряде работ [Ho et al., 1996; Афраймович и Перевалова, 2006; Захаров и Зиенко, 2007; Захаров и др., 2008]. Новые возможности, которые предоставляет идеология пространственного GPS-детектора, могут быть использованы для обнаружения ионосферных возмущений метеорологического происхождения в заданном регионе Земли. Методика анализа данных, получаемых на сетях приемников навигационных сигналов, была протестирована для выявления различных ионосферных феноменов [Ho et al., 1996], связанных с солнечными затмениями, взрывами и землетрясениями, геомагнитными бурями и солнечными вспышками [Афраймович и Перевалова, 2006; Захаров и Зиенко, 2008] и т.п. Вместе с тем, вопрос об эффективности использования GPS-технологий для изучения ионосферных откликов на метеорологические явления оставался открытым. Так, в работе [Афраймович и др., 2008] методами анализа интегральных карт полной электронной концентрации, определяемых по GPS-данным, не выявлен явный отклик на сам тайфун, вместе с тем в уже упоминавшейся работе [Бондур и др., 2008] отмечается крупномасштабное изменение электронной концентрации над областью действия мощного тропического урагана.

В одной из последних на момент написания данной статьи работе [Перевалова и Ишин, 2010] изложены трудности использования GPS-технологии, отмечена “нестабильность” выявления факта влияния циклона на ионосферу методами спектрального анализа вариаций полного электронного содержания, определяемого по GPS-данным. Там же высказано вполне очевидное и

ожидаемое утверждение, что “регистрация тропосферных эффектов в ионосфере связана с трудностями детектирования слабых возмущений, выделения их на общем фоне вариаций и с проблемами идентификации источника таких возмущений, например, на фоне возмущений, связанных с геомагнитной обстановкой”. Вместе с тем, как показывает работа практически того же авторского коллектива [Ишин и др., 2009], ионозонды в целом уверенно позволяют выделять интегральные отклики ионосферы на значительные атмосферные процессы.

Целью данной работы является использование возможностей спутниковой радионавигационной системы GPS для дистанционной диагностики ионосферы, а именно: детектирование методом GPS-интерферометрии волновых атмосферно-ионосферных проявлений нескольких крупнейших атлантических ураганов периода 2004–2009 гг. — IVAN, KATRINA, RITA, WILMA, DEAN, IKE, действовавших на атлантическом побережье США. В работе проводится детальный анализ гео- и гелиофизической обстановки во время действия рассматриваемых циклонов с целью отделить ее проявления в атмосфере от проявлений, связанных с изучаемыми феноменами.

## 2. РАССМОТРЕННЫЕ СОБЫТИЯ – КРУПНЕЙШИЕ АТЛАНТИЧЕСКИЕ УРАГАНЫ

В работе проведен анализ ионосферных проявлений нескольких наиболее крупных по определенным параметрам тропических ураганов, наблюдавшихся в Атлантике за последние 5 лет. Данные о них взяты из INTERNET источников [<http://weather.unisys.com>; <http://www.stormpulse.com>; <http://en.wikipedia.org>, там же см. более подробную библиографию] и приведены для удобства обсуждения в табл. 1, а траектории движения ураганов представлены на рис. 1. Все события относятся к крупнейшей 5-ой категории по шкале Саффира–Симпсона [<http://en.wikipedia.org>]. Исключение составляет ураган IKE, действовавший 1–14 сентября 2008 г. Во время его существования был зафиксирован самый крупный за всю (правда, довольно недолгую) историю систематических GPS-наблюдений размер воздушных вихрей, вовлеченных в ураган, т.е. диаметр урагана. В рассмотренном случае он почти вдвое превышал “обычные” значения для подобных явлений. Именно из-за своего размера он по причиненным в США разрушениям уступает только урагану KATRINA.

Рассмотренные ураганы примечательны тем, что все из них поставили определенные синоптические “рекорды” и имеют уникальные характеристики даже в своей категории.

**Таблица 1.** Рассматриваемые в статье крупнейшие атлантические ураганы 2004–2008 гг. и их характеристики

№ п/п	Имя	Дата	Область шторма, км	$P_{\min}$ , мБар	$V$ , км/ч	$Kp/Dst$
1	IVAN	(2–24).09.2004 г.	680	910	270	5.5/–50 и более
2	KATRINA	(23–30).08.2005 г.	780	902	280	9/достиг –216 нТл 24.08
3	RITA	(17–24).09.2005 г.	750	895	285	Менее 4/–50 и более
4	WILMA	(15–26).10.2005 г.	680	882	295	Менее 4.5/Более –40, до +30
5	DEAN	(13–23).08.2007 г.	600	905	280	Менее 1.5/Более –15, до +15
6	IKE	(1–14).09.2008 г.	900–1450*	935	230	3.5/более 50 нТл

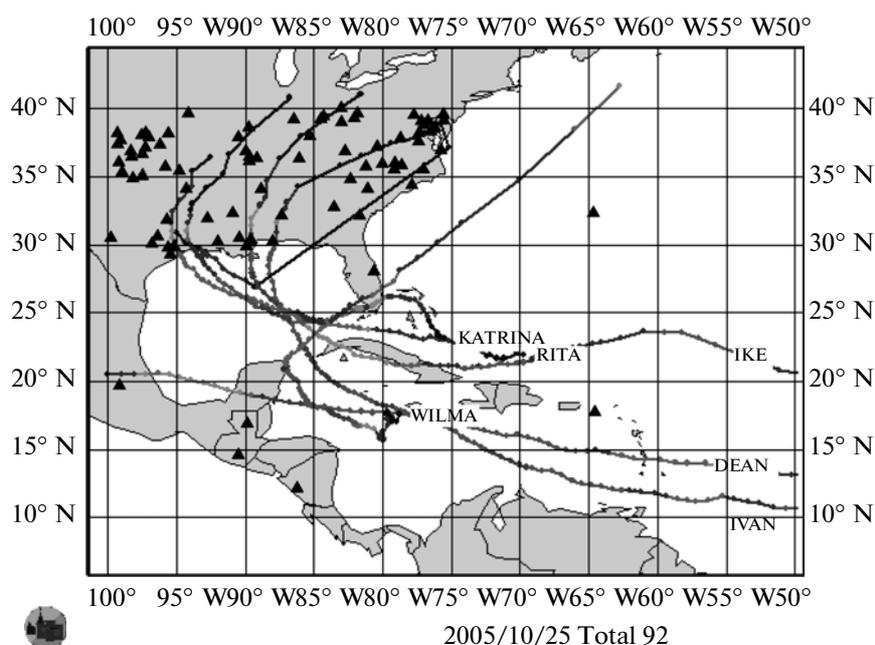
*Примечания:* В таблице приведены минимальное давление при прохождении ( $P_{\min}$ , мБар) и максимальная зафиксированная скорость ветра. Последний столбец – максимальные значения планетарного индекса  $Kp$  и  $Dst$ , нТл, через разделитель “/” соответственно, приведены за период действия урагана. \* – по разным оценкам.

Например, длительность урагана IVAN составила 19 дней, почти вдвое больше, чем обычно. В урагане RITA были зафиксированы порывы ветра скоростью до 380 км/ч, в то время как среднечасовая скорость ветра в нем достигла ~285 км/ч. Ураган WILMA поставил рекорд падения атмосферного давления при своем прохождении: за 12 ч оно упало на 90 мБар, причем скорость ветра за 16 ч возросла более чем вдвое, от 120 до 270 км/ч.

Ураган DEAN, обладающий среди прочих ураганов 5-ой категории “среднеенькими” показателями, “вышел” на сушу будучи на пике своего развития. Он уникален по интенсивности выпавших на территории США осадков в истории GPS-наблюдений. Дополнительные детальные сведения

по каждому из ураганов будут приведены по мере их рассмотрения.

Поскольку далее мы обсуждаем возможное влияние указанных в таблице крупнейших тропических ураганов (циклонов) на ионосферу, то при интерпретации наблюдаемых ионосферных эффектов нужно учитывать гелиогеофизические условия и их влияние на ионосферу. Эти сводные данные по материалам [<http://www.spider.ngdc.noaa.gov>] представлены в последнем столбце табл. 1. Проведенный анализ показывает, что за исключением урагана KATRINA, все рассмотренные события развивались на фоне умеренно или слабо возмущенной геомагнитной обстановки, и потому резкие изменения свойств ионосферных неоднородностей, зарегистрированные в изучаемые периоды времени, не могут быть объяснены, насколько



**Рис. 1.** Расположение наблюдательных станций в регионе (треугольники) и треки всех обработанных событий – наиболее крупных ураганов периода 2005–2009 гг, треки движения которых приведены на карте.

сейчас известно, вариациями только гелио- и геомагнитных условий.

### 3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ СИСТЕМЫ GPS

В последние пятнадцать лет активно развиваются технологии дистанционной диагностики ионосферы с помощью сигналов спутниковой радионавигационной системы GPS. Идеология такого мониторинга была предложена довольно давно [Hoffmann-Wellenhof et al., 1992]. Созданные глобальные наблюдательные GPS-сети дают новые возможности обнаружения ионосферных возмущений метеорологического происхождения в заданном регионе.

Так, использование сигналов навигационной системы GPS позволяет выделять возмущения в ионосфере на фоне регулярных изменений в этой среде на основе фазовых измерений [Hoffmann-Wellenhof et al., 1992; Ho et al., 1996; Афраймович и Перевалова, 2006], регистрируемых наблюдательной GPS-сетью. Идея метода основана на использовании комбинации регистрируемых фаз  $L_1$  и  $L_2$  на двух рабочих частотах в виде

$$L_1 \equiv L_1 - L_2 \sim \text{STEC} + \text{err}_I,$$

где  $\text{STEC}$  – наклонный (по лучу зондирования) интеграл полного электронного содержания ТЕС (Total Electron Content), определенный с ошибкой  $\text{err}_I$ .

Наклонный ТЕС ( $I$ ), измеренный в ТЕС-Units, определяется как

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2 + \delta L + \text{const}],$$

где  $L_1 \lambda_1$  и  $L_2 \lambda_2$  – приращения фазового пути на соответствующей рабочей частоте  $f_1$  и  $f_2$  с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , м,  $\delta L$  – ошибка фазовых измерений и  $\text{const}$  – неопределенность разности фаз наблюдений на разных частотах. Данные различных исследователей [Hoffmann-Wellenhof et al., 1992; Ho et al., 1996; Афраймович и Перевалова, 2006] показывают, что в системе GPS ошибка в определении изменения ТЕС в спокойных геомагнитных условиях не превышает 1% (при неопределенном начальном значении). Временное разрешение основной массы регистраций составляет 30 с, что позволяет исследовать атмосферные процессы соответствующих периодов. Ряды ТЕС фильтруются для получения отклонений от средних значений. Величина окна фильтра подбирается экспериментально и составляет обычно 5 мин.

В нашей работе использована и производная регистрируемой фазы частоты  $L_1$ , поскольку у нее меньше фазовый шум, а амплитуда излучаемого на этой частоте сигнала системы GPS больше, чем у второй рабочей частоты. Указанная методи-

ка доказала свою работоспособность [Захаров и Зиенко, 2007; Захаров и др., 2008].

Итак, на основе корреляционной обработки в навигационном сигнале определяют отклик от неоднородных структур в средах. Подчеркнем, что речь идет не о регулярных параметрах сред, а именно об их неоднородных, флуктуационных, структурах и параметрах их движения – направлении и векторе скорости. Поскольку шумовые колебания маскируют “полезный сигнал” ионосферного отклика, и амплитуда исследуемого сигнала соизмерима с амплитудой фоновых шумовых колебаний, то крайне важна разработка специальных методик анализа и фильтрации полезного сигнала на уровне шумов, в том числе и при наличии сбоев [Захаров и Зиенко, 2007].

Так, для идентификации волновой структуры и определения ее параметров в широко распространенном подходе [Афраймович и Перевалова, 2006] предлагается использовать статистические методики, которые имеют очевидные ограничения при региональном мониторинге больших площадей из-за ракурсного характера выделения волновых структур самими методами GPS-интерферометрии. В данной работе для идентификации волновых структур используется кластерный анализ, довольно часто и весьма успешно применяемый в современной геофизике для структуризации данных по выделенным признакам [Дюран и Оделл, 1977; Gvishiani and Dubois, 2002; Захаров и Будников, 2012]. В нашем случае признаками выделяемых структур являются локализация волнового возмущения (вернее, координаты проекции пересечения волнового вектора структуры с плоскостью, расположенной на высоте максимума слоя  $F_2$ ) и направление движения структуры. Признаки определяемого кластера связаны с потенциальной точностью используемой нами методики и составляют порядка  $\pm 0.5^\circ$  по географическим координатам и  $\pm 15^\circ$  по направлению. Дальнейшая обработка заключается в следующем. Если некоторое число выделяемых в ходе предварительного анализа структур группируется вокруг некоторого центра с заданными выше характеристиками, то они считаются одной структурой, географические координаты которой определяются как координаты центра тяжести всех волновых структур, входящих в этот выделенный кластер, а параметры движения такой структуры являются результатом статистической обработки (например, определяется среднее значение и дисперсия вектора скорости структуры). По сути, применение алгоритмов кластеризации позволяет в нашем случае эффективно осуществить многомерную фильтрацию данных путем задания уровня – числа структур, входящих в кластер.

#### 4. РЕГИОНАЛЬНАЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ СЕТЬ МЕКСИКАНСКОГО ЗАЛИВА

Идея GPS-наблюдательной сети [Афраймович и Перевалова, 2006; Захаров и др., 2008] заключается в отборе станций, квазиравномерно заполняющих регион мониторинга. В случае с атмосферными феноменами, обычно зарождающимися и развивающимися над океанами, этот подход связан с очевидными трудностями.

Регион мониторинга в нашей работе имеет размеры более чем  $30^\circ \times 30^\circ$  и составляет по площади свыше 5 млн. км<sup>2</sup>. Нами отобраны и проанализированы данные с 92-х станций сети IGS [http://www.sopac.ucsd.edu] (см. рис. 1), географически расположенных вокруг Мексиканского залива и севернее, на территории США. Географическое расположение указанных станций сети таково, что несколько из них взято на п-ове Флорида, часть – на латиноамериканском побережье Мексиканского залива и остальные – на северном побережье Южной Америки. Станции крайне неравномерно расположены в регионе, во время прохождения ураганов неоднократно отмечались сбои в работе, или станции вообще не предоставляли данных. Чтобы получать статистически значимые оценки параметров волновых структур более чем от 30-ти измерительных ячеек, мы обрабатывали избыточные данные. Термин “статистические оценки” применен не случайно – в ряде случаев приходится использовать измерительные ячейки с большими базами и получать оценки параметров волновых структур.

#### 5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Выбранная конфигурация наблюдательной сети позволяет получить информацию о локализации и параметрах движения волновых структур. В анализе использованы данные общей продолжительностью 75 дней, ~140000 ч наблюдений фазы с интервалом 30 с (свыше 33-х млн. индивидуальных отсчетов фазы обеих частот). Полученные результаты в целом являются статистически значимыми, несмотря на сбои на некоторых станциях в период усиления ураганов. Приведенные далее результаты и выводы отражают ряд общих тенденций проявления атмосферных возмущений на ионосферных высотах.

1. На рисунке 2а представлено развитие тропического урагана DEAN. Видно, что 17 августа 2007 г. ураган резко усилился со 2-ой до 4-ой категории. Назовем волновой активностью отношение количества волнообразных структур, наблюдаемых в заданный период времени (на рисунке взято 6 ч), к максимальной величине за весь период наблюдений (на рисунке этому соответствует время с 6:00 до 12:00 17 августа 2007 г.). Проведенный нами анализ динамики появления волновых структур

показывает, что определенная для 17 августа волновая активность увеличивается почти на ~20% по сравнению со следующим днем (см. рис. 2б, пропуск на рисунке – отсутствие данных) и более чем на 30% относительно среднего значения в период с 13 по 24 августа 2007 г.

Отметим, что волновые структуры, порожденные циклоном, часто имеют компоненту скорости, совпадающую с направлением его движения с востока на запад, причем обычно в этом районе детектируются волновые структуры с направлением распространения с севера на юг и юго-восток. Отмеченное нами направление с востока на запад совпадает с движением терминатора, однако проводимый временной анализ позволяет идентифицировать компоненту скорости, связанную с движением самого атмосферного феномена.

Более того, детальный анализ спектров выделенных АГВ-структур показывает, что именно в период прохождения урагана, при его усилении или на спаде, изменяется параметр спадания  $\alpha$  волнового спектра  $S(k) \sim k^\alpha$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – характерный размер волнового возмущения [Гершман и др., 1984].

Для урагана DEAN нами получено (см. рис. 3), что численно величина  $\alpha$  достигла значения  $-2.8$  против среднего значения  $-1.27$  за интервал с 13 по 24 августа. Это отклонение значительно превосходит дисперсию за данный временной интервал, составляющую 0.24. Иными словами, в период резкого усиления тропического урагана в ионосфере регистрируются волновые структуры, отличающиеся от “равновесных, фоновых” условий и, как правило, такие структуры имеют большую (до 2-х раз) скорость, достигающую 1.2–1.5 км/с.

Полученные результаты не связаны с геомагнитной активностью: в период 13–23 августа 2007 г. абсолютная величина  $Dst$  не превышала 20 нТ, а индекс  $Kp$  не превышал значения 1.5.

Несколько иное поведение волновых структур наблюдалось для урагана IVAN. Часто в англоязычной литературе это событие называют “IVAN Great” (“Иван Великий”) из-за его силы и длительности. Ураган начался в ночь на 2 сентября 2004 г. с тропической депрессии, которая к 2:00 3 сентября переросла в шторм. Ураган стремительно, менее чем за 15 ч, развился до 4-ой категории (на 00:00 6 сентября). Далее произошло его ослабление до 2-ой и последующий рост до 5-ой категории, соответственно 7 и 9 сентября. В период с 9 по 17 сентября сила урагана колебалась между 4-ой и 5-ой категориями. Затем последовало довольно быстрое, менее чем за 20 ч, окончание урагана и его вырождение в тропическую депрессию.

Скорость ветра, когда ураган достигал 4-ой и 5-ой категории, составляла до 90 м/с, а давление

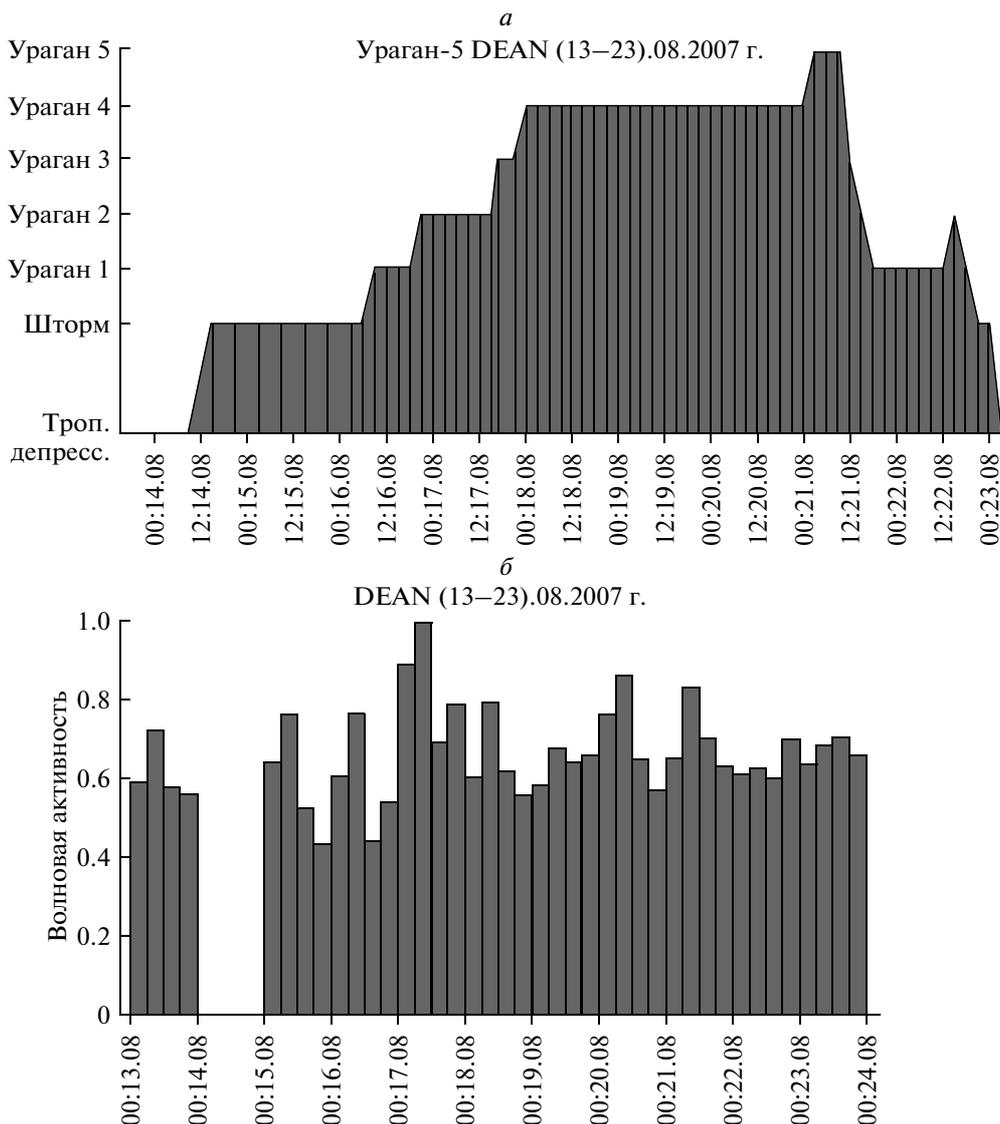


Рис. 2. Эволюция урагана DEAN (а). Относительная волновая активность в период действия урагана DEAN (б). Пропуск – отсутствие данных, нормировка на максимальное значение.

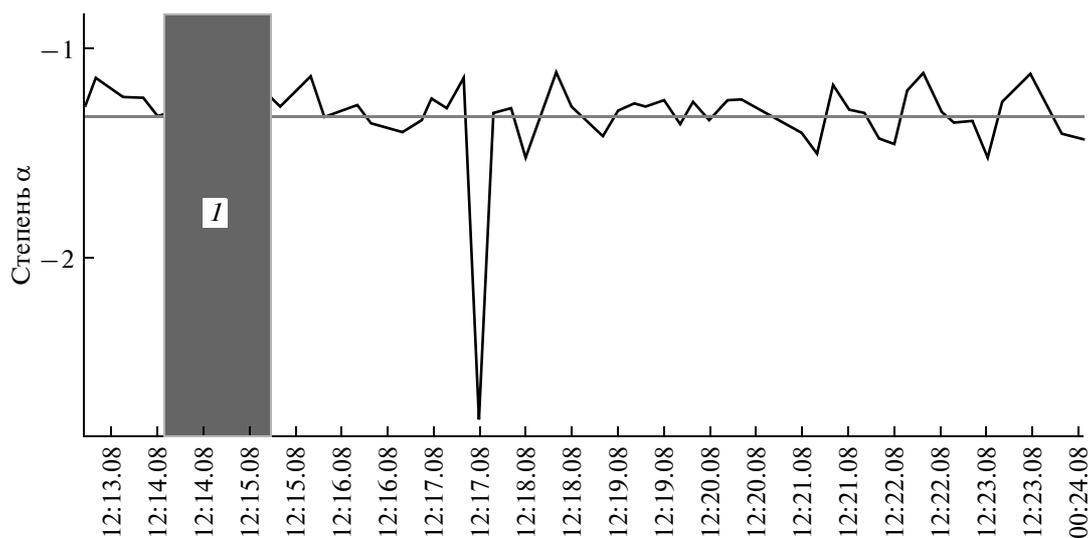
опустилось до 910 мБар. Для сравнения, в фазе тропической депрессии скорость ветра не превышала 15–20 м/с. Величины временных перепадов давления и скорости ветра составляли от –12 до 5 мБар/ч и  $\pm 5$  м/с<sup>2</sup> соответственно.

Проведенный анализ волновых спектров выделенных структур показывает, что в этом случае резкое изменение поведения параметра  $\alpha$  произошло в период с 15 до 18 августа, достигнув величины –1.9 против среднего значения –1.2 при дисперсии 0.12, т.е. превысив среднее значение в ~1.6 раза, см. рис. 4. Этот временной интервал соответствует спаданию урагана с 5-ой категории до тропической депрессии. В этот период геомагнитные вариации были малы, т.е. величина индекса  $Dst$  не превышала –40 нТл. Одновременно,

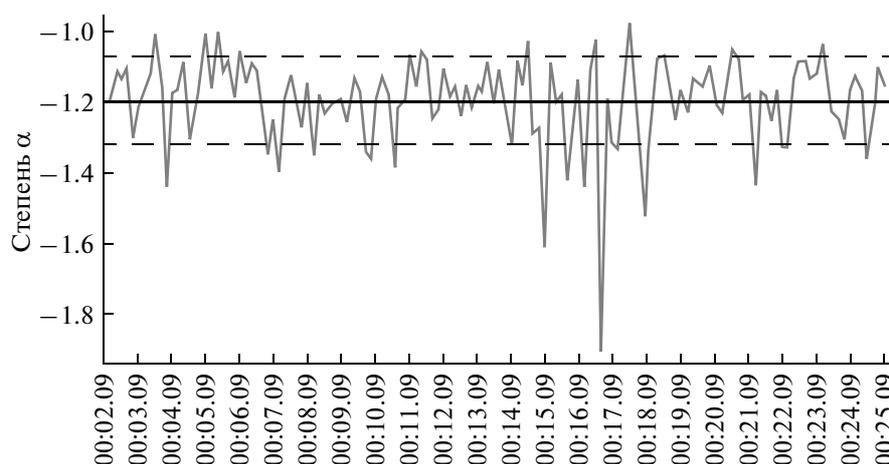
индекс  $Kp$  был умеренно возмущенным. Тогда же не отмечено и значительных солнечных возмущений [<http://www.spider.ngdc.noaa.gov>]. Иными словами, одной из наиболее вероятных причин наблюдавшегося поведения волновых структур является ураган.

Рассмотрим, наконец, изменения параметра  $\alpha$  во время развития урагана IKE, рис. 5. Напомним, что хотя это – единственный из всех рассмотренных ураган 4-ой категории, размеры его синоптического вихря (область шторма) в 1.5–2 раза превышают аналогичные значения для других ураганов рассматриваемого периода 2004–2009 гг.

Выполненный нами анализ показывает, что и в этом случае непосредственно во время действия



**Рис. 3.** Изменения параметра спада волнового спектра во время действия урагана DEAN в период (13–24).08.2007 г. Область *I* – данные отсутствуют. Штриховыми линиями обозначено дисперсионное отклонение от среднего (толстая сплошная линия).



**Рис. 4.** Изменения параметра спада волнового спектра во время действия урагана IVAN в период (02–25).09.2004 г.

урагана величина параметра резко меняется (см. рис. 6) в диапазоне от  $-1.45$  до  $-0.8$  при среднем значении  $-1.06$  и дисперсии  $0.11$ . Подчеркнем, что геомагнитная обстановка в рассмотренный период была умеренно возмущенной, что также позволяет связать полученные вариации спектра волновых структур с действием урагана.

**2.** Для удобства сравнения все полученные при анализе спектра волновых структур результаты объединены в табл. 2. Видно, что для всех исследуемых событий наблюдается резкое уменьшение параметра  $\alpha$  непосредственно во время действия урагана или при наиболее резком изменении его силы: увеличении или спаде. Величина вариаций параметра  $\alpha$  относительно среднего значения в период действия урагана и 5 дней до и после него составила от 1.3 до 2.2 раз, что значительно пре-

восходит дисперсию вариаций относительно среднего значения. Для 5-ти рассмотренных событий геомагнитная активность в период действия урагана была низкой или слабо возмущенной. Исключение составляет ураган KATRINA, во время действия которого была сильно возмущенная гео- гелиофизическая обстановка, что затрудняет однозначную интерпретацию полученных вариаций параметра  $\alpha$ , превышающую и в этом случае среднее его значение более чем вдвое и имеющую описанные выше особенности поведения параметра  $\alpha$ .

Отметим, что изложенный характер изменения указанного параметра в целом подобен проявлениям магнитных бурь в спектре ионосферных неоднородностей [Захаров и др., 2008]. В обоих случаях происходит резкое изменение

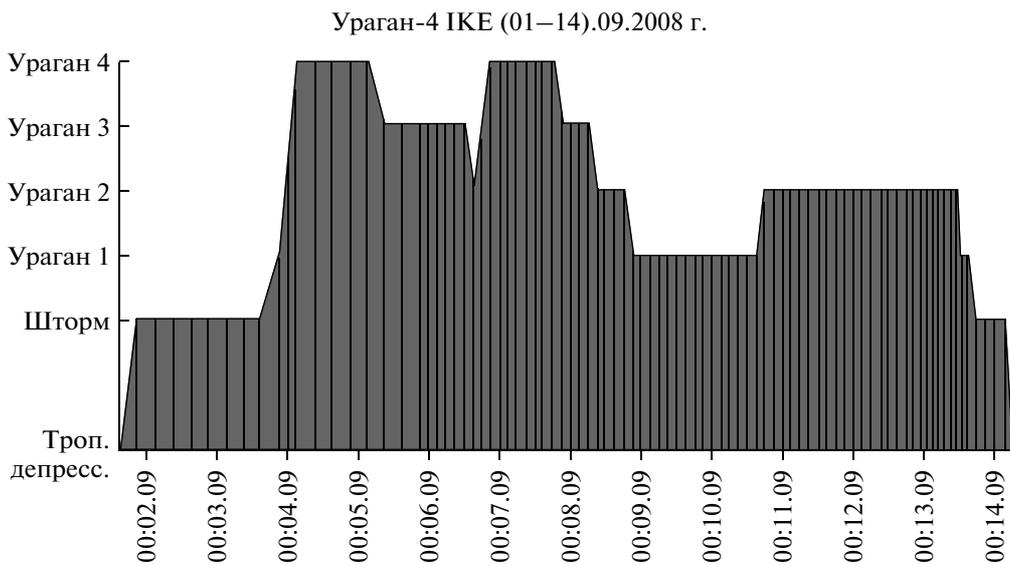


Рис. 5. Развитие урагана IKE.

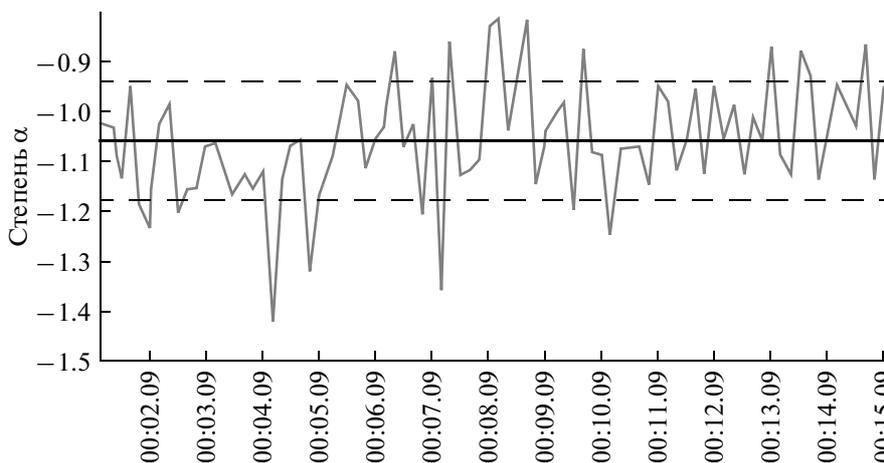


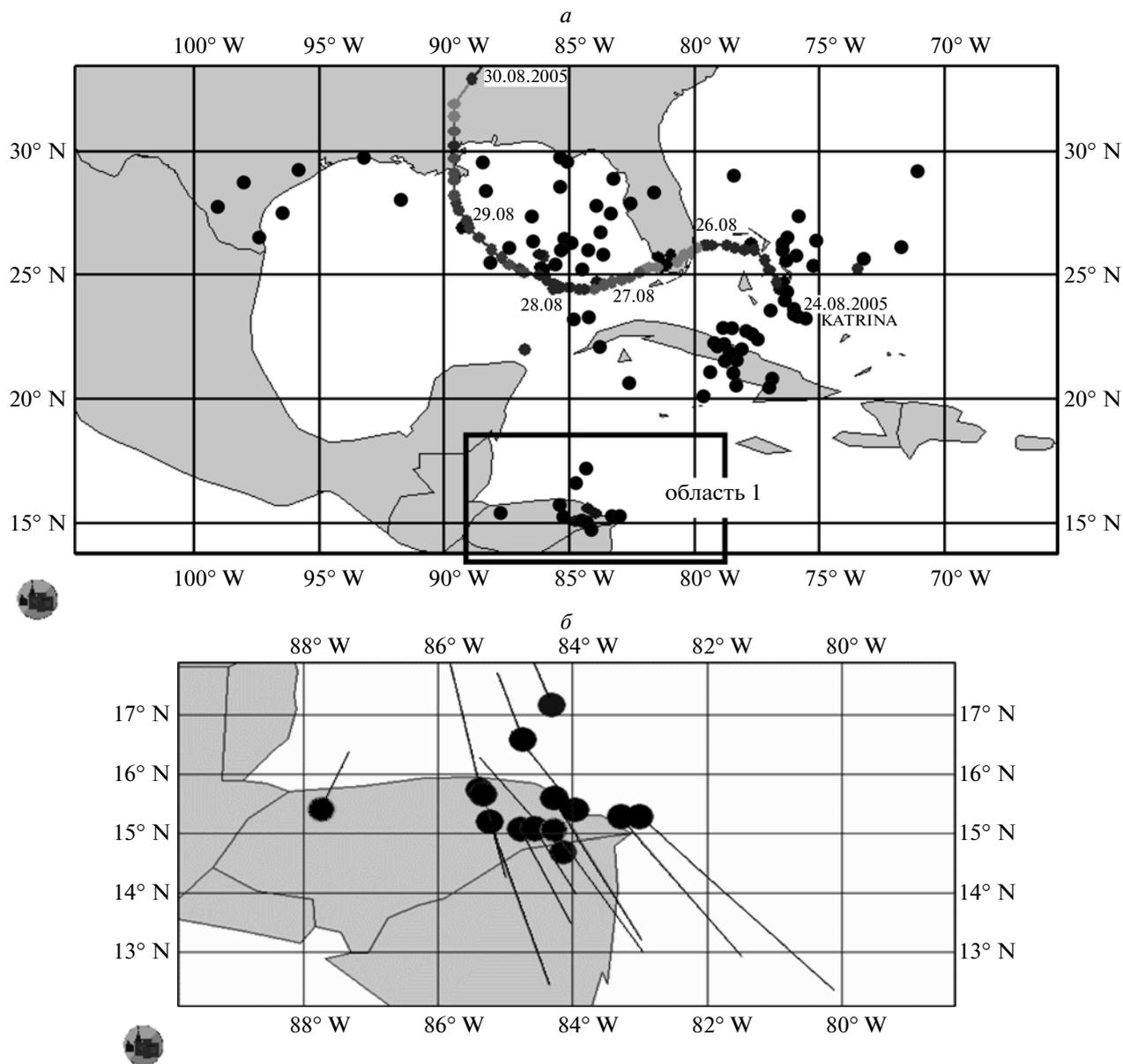
Рис. 6. Изменения параметра спада волнового спектра во время действия урагана IKE в период (02–15).09.2008 г.

параметра спада спектра, т.е. по сути в результате воздействия происходит изменение степени турбулизации среды. Указанное обстоятельство связано, на наш взгляд, с волновой передачей

энергии в верхнюю атмосферу, несмотря на разные энергетические источники такого воздействия, расположенные соответственно в нижней атмосфере и магнитосфере Земли.

Таблица 2. Изменение параметра спада волнового спектра во время действия крупнейших атлантических ураганов 2004–2008 гг.

№ п/п	Ураган	Дата	$\alpha_{cp} \pm \sigma_{\alpha}$	$\alpha_{min}$	Период
1	IVAN	(2–24).09.2004 г.	$-1.20 \pm 0.12$	-1.9	Спад с 5-ой категории до депрессии
2	KATRINA	(23–30).08.2005 г.	$-1.05 \pm 0.11$	-2.15	Время действия
3	RITA	(17–24).09.2005 г.	$-1.26 \pm 0.15$	-1.64/-0.85	Рост от шторма до 3-ей категории
4	WILMA	(15–26).10.2005 г.	$-1.28 \pm 0.11$	-1.72	Время действия
5	DEAN	(13–23).08.2007 г.	$-1.24 \pm 0.12$	-2.8	Рост со 2-ой до 4-ой категории
6	IKE	(1–14).09.2008 г.	$-1.08 \pm 0.12$	-1.42	Время действия

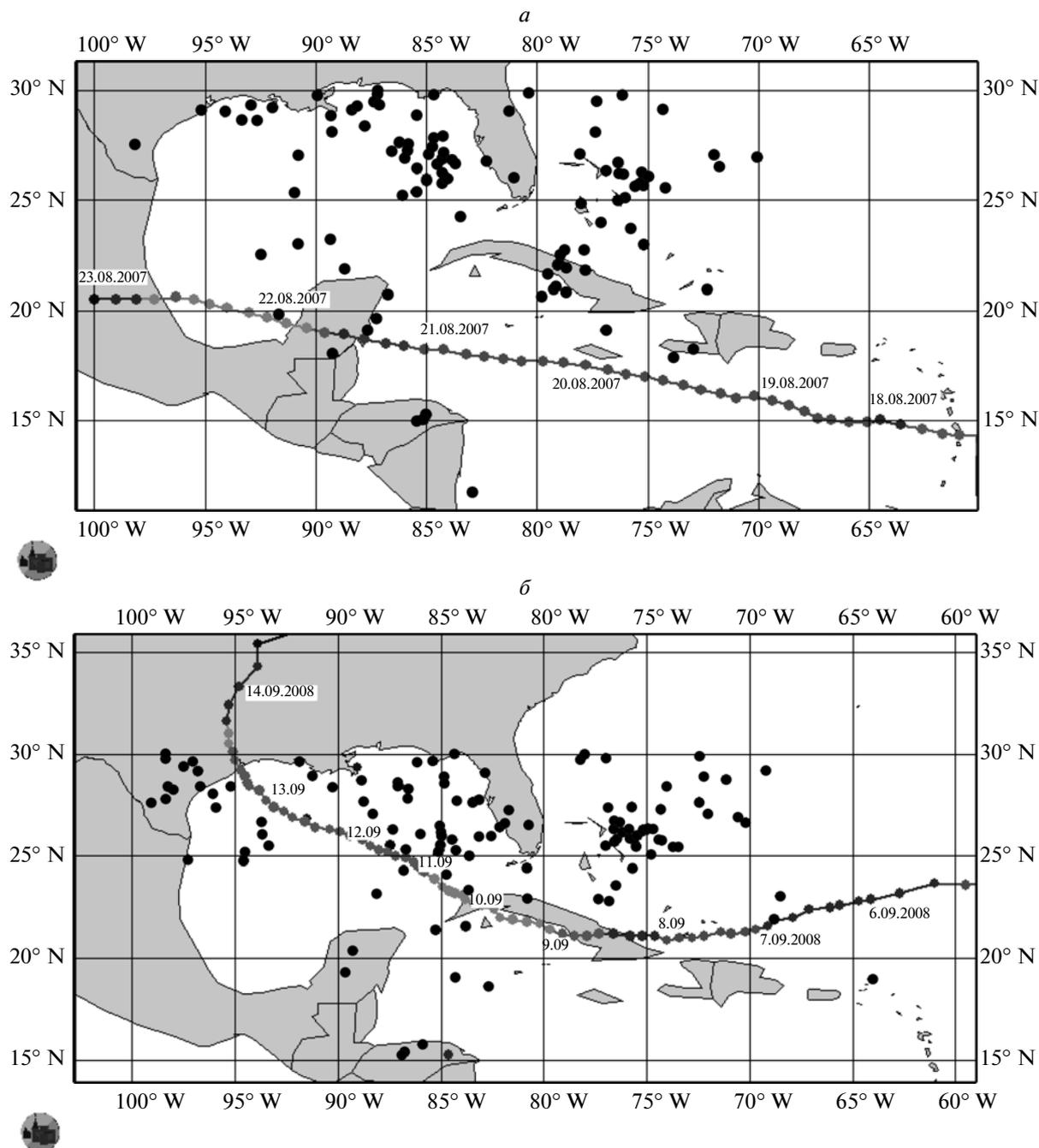


**Рис. 7.** *a* – Положение подионосферных точек для кластеров выделенных волновых структур, возникающих в период прохождения тропического урагана KATRINA. Сплошная линия – трек урагана. *б* – То же, что и на рис. *a*, для укрупненной области 1. Направление луча задает движение выделенной структуры в кластере, длина луча пропорциональна скорости.

**3.** Перейдем теперь к анализу мест географической привязки волновых структур, т.е. рассмотрим вопрос о том, где расположен источник регистрируемых на ионосферных высотах акустико-гравитационных волновых возмущений. Отметим, что методическая точность локализации подионосферных точек волновых структур составляет обычно не хуже 50–100 км для измерительных ячеек с размерами до 100 км [Афраймович и Перевалова, 2006].

На рисунке 7*a* приведены карты географического расположения подионосферных точек для

кластеров волновых структур (отдельные точки), выделенных во время действия урагана KATRINA, траектория движения которого представлена сплошной линией. Видна привязка структур к орографическим возмущениям на пути урагана – островам и горным массивам. Например, на о-ве Куба, оказавшемся в непосредственной близости к глазу урагана, большое количество ионосферных возмущений, как показывает анализ, связано с горным массивом Сиерра-де-Тринидад в центре острова (крупнейшая вершина – г. Сан-Хуан, 1156 м). Аналогичная ситуация и с побережьем



**Рис. 8.** Географическое местоположение источников акусто-гравитационных возмущений, выделяемых методами GPS-интерферометрии во время действия крупных атлантических ураганов – *a* – IKE, *б* – DEAN, *в* – IVAN, *г* – WILMA соответственно. Для классификации возмущений использован кластерный анализ.

Гондураса – там источники возмущений идентифицируются как береговая кромка и горный массив на юге страны, на границе с Никарагуа. Довольно много сигналов зафиксировано от Багамских о-вов, находившихся в непосредственной близости от области глаза урагана.

Отметим, что на рис. 7б приведена укрупненная часть карты для побережья и южной части

Гондураса. На тоновой карте длина луча пропорциональна средней скорости структур в соответствующем кластере, а направление совпадает с направлением движения данной структуры. При сравнении нашей карты с топографической картой региона привязка выделенных кластерным анализом структур к побережью и горным массивам явно прослеживается.

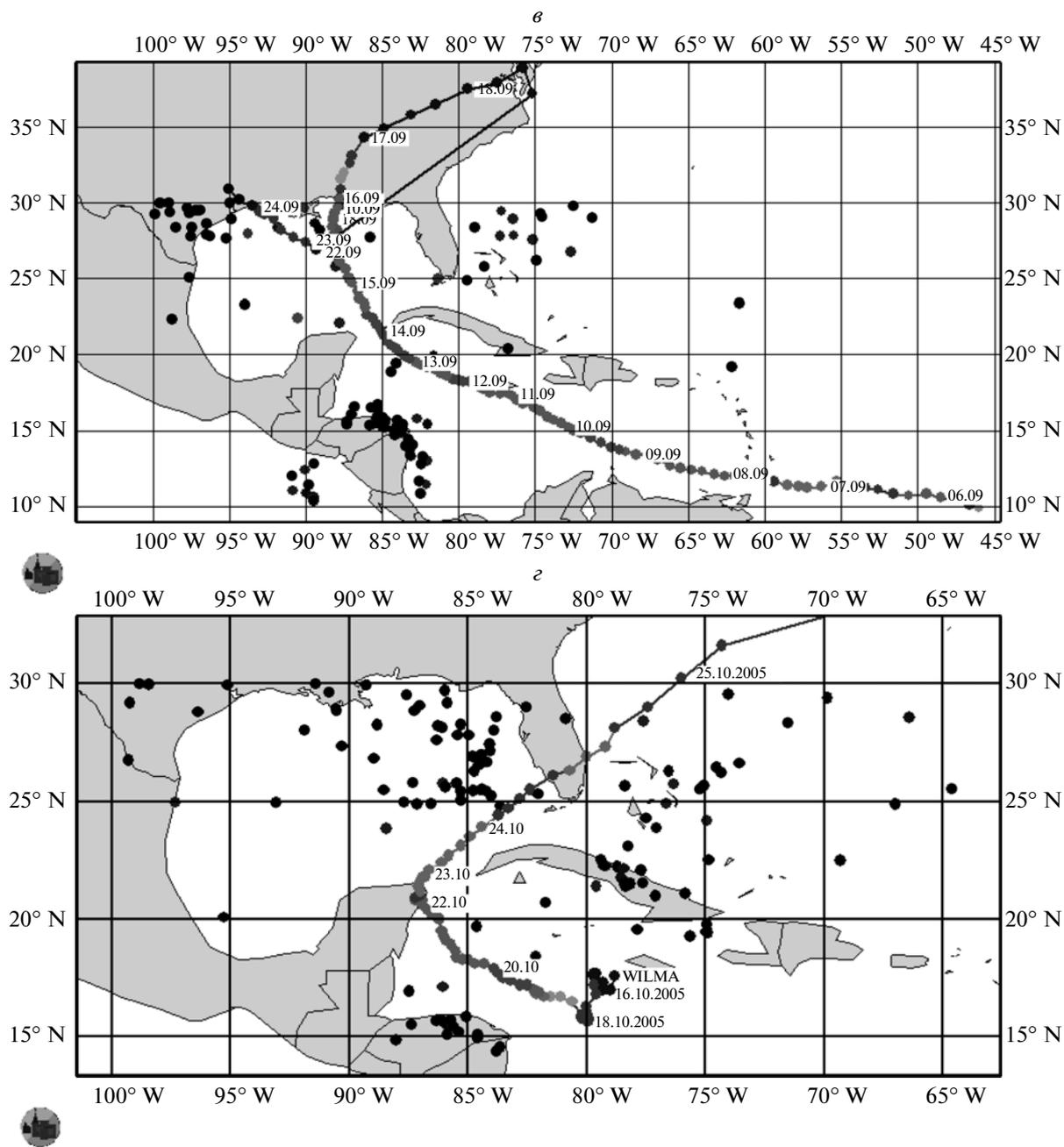


Рис. 8. Окончание.

Аналогичная ситуация наблюдается и в других случаях (см. коллаж рисунков 8а–з). Так, для ураганов DEAN, IKE, WILMA в качестве источников возмущений выделяются области о-ва Куба, Багамских о-вов и береговой кромки п-ова Юкатан. Ураган IVAN дает ярко выраженную область побережья и горного массива в Гондурасе и не показывает возмущений от о-ва Куба.

Наш анализ показывает, что не всякое горное образование порождает орографические возмущения на ионосферных высотах. Так, во всех рас-

смотренных случаях нам не удалось связать локализацию подионосферных точек возмущений с горным массивом на о-ве Гаити, высота которого более чем вдвое превосходит высоту горного массива на о-ве Куба, который в нашей интерпретации являлся источником атмосферных возмущений. Примечательно, что во всех рассмотренных случаях (кроме урагана IVAN) в качестве источника атмосферных возмущений уверенно выделяется область мелководья в Мексиканском заливе восточнее п-ова Флорида.

Полученные результаты не выявили статистически значимой связи появления волновых структур непосредственно от ядра (глаза) тайфуна или циклона.

Обнаруженные факты имеют весьма простое качественное объяснение.

Так, волновые возмущения возникают при обтекании орографических возмущений воздушными массами, движущимися с ураганом, причем их возбуждение эффективно при резких изменениях силы урагана — его усилении или затухании, что в целом ожидаемо. Возникновение областей генерации, связанных с береговой кромкой, также наблюдалось ранее, хотя и без использования GPS-методик [Bertin et al., 1975]. Устойчивая генерация волн в этом случае, вероятно, связана с возникновением вихревых структур в атмосфере в области обтекания орографического препятствия. Ясно, что распространяющиеся волновые структуры должны иметь частоты, совпадающие с собственными частотами внутренних колебаний в свободной атмосфере, т.е. соответствовать периодам несколько мин — несколько часов, что позволяет применять данные GPS-наблюдений длительностью до 4 ч для их выявления. Область устойчивой генерации возмущений на мелководье Мексиканского залива, вероятно, связана с нагонными явлениями и волнами на мелководье и обтеканием или взаимодействием с этими создаваемыми ураганом типично топографическими образованиями.

## 6. ВЫВОДЫ

Впервые на статистически значимом уникальном материале показано, методика GPS-наблюдений оказывается эффективной для выделения корреляционными методами отклика верхней атмосферы на глобальные синоптические процессы.

Получено, что волновые структуры, обнаруженные методом GPS-интерферометрии на выбранной наблюдательной сети, географически связаны с местами орографических возмущений. Например, возможна генерация акустико-гравитационных волновых возмущений на береговой линии при ее обтекании воздушными массами, захваченными тайфуном. Установлено, что возбуждение таких волновых структур наиболее эффективно проходит при большой скорости развития или спада тайфуна. Также при этом резко меняется параметр спадания спектра волновых возмущений. Характер изменения указанного параметра в целом подобен проявлениям магнитных бурь в спектре ионосферных неоднородностей [Захаров и др., 2008], что связано, прежде всего, с волновым характером воздействия на ионосферу в обоих случаях, несмотря на разные энергетические источники такого воздействия,

расположенные соответственно в атмосфере и магнитосфере Земли.

Проведенный нами анализ не выявил статистически значимой связи появления волновых структур непосредственно с ядром (глазом) тайфуна или циклона.

Волновые структуры, порожденные циклоном, часто имеют компоненту скорости, совпадающую с направлением его движения. Так, обычно в этом районе детектируются волновые структуры с направлением распространения с севера на юг и юго-восток. В период развитого урагана или циклона возникает северная и восточная компоненты вектора скорости распространения волн, причем ряд возмущений двигается строго на север или на восток. Отмеченное направление с востока на запад совпадает с движением терминатора, однако проводимый временной анализ позволяет уверенно идентифицировать компоненту скорости, связанную с движением самого атмосферного феномена.

Итак, получено, что циклон оказывает значительное влияние на режимы генерации и распространения волновых структур в ионосфере, и использование GPS-сетей позволяет выявлять это влияние. Наблюдаемые явления могут быть связаны с возбуждением внутренних и акустических гравитационных волн в нижней атмосфере и их распространением до ионосферных высот. Частоты возбуждаемых колебаний совпадают с собственными частотами свободных колебаний атмосферы, что безусловно затрудняет их выделение и интерпретацию полученных результатов на фоне развития “собственных” (или равновесных) волновых структур в системе геосфер. Вместе с тем, использование корреляционных методов обработки в ряде случаев позволяет преодолеть указанную трудность.

С методической точки зрения можно считать принципиально важным и эффективным использование возможностей спутниковой радионавигационной системы GPS для детектирования методом GPS-интерферометрии волновых атмосферно-ионосферных проявлений крупнейших ураганов.

Работа выполнена при частичной поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы, мероприятие 1.2.1, Госконтракт П167.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— *Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Ишин А.Б., Перевалова Н.П., Ружин Ю.Я.* Вариации полного электронного содержания во время мощного тайфуна 5–11 августа 2006 г. у юго-восточного побережья Китая // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 48. № 5. С. 703–708. 2008.

- *Афраймович Э.Л., Первалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: СО РАМН. 480с. 2006.
- *Бондур В.Г., Пулинец С.А., Узунов Д.* Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Катрина // Исслед. Земли из космоса. № 6. С. 3–11. 2008.
- *Ванина-Дарт Л.Б., Шарков Е.А., Покровская И.В.* Исследования взаимодействия нижней экваториальной ионосферы с тропическими циклонами по данным дистанционного и ракетного зондирования // Исслед. Земли из космоса. № 1. С. 1–9. 2007.
- *Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я.* Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 392 с. 1984.
- *Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вегасова Г.В., Хачикян Г.Я.* Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеоздат, 267 с. 1987.
- *Дюран Б, Оддел П.* Кластерный анализ. М.: Статистика, 128 с. 1977.
- *Захаров В.И., Зиенко А.С.* Метод статистического анализа вейвлет-спектров ионосферных сигналов системы GPS // Вестн. МГУ. Сер.3. Физика, астрономия. № 2. С. 44–49. 2007.
- *Захаров В.И., Зиенко А.С., Куницын В.Е.* Распространение радио сигналов GPS при различной солнечной активности // Эл. магн. волны и электрон. сист. № 8. С. 51–57. 2008.
- *Захаров В.И., Будников П.А.* Использование кластерного анализа для обработки данных GPS-интерферометрии // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. № 1. С. 25–32. 2012.
- *Ишин А.Б., Воейков С.В., Первалова Н.П., Зализовский А.В., Сопин А.А.* Вариации ионосферных параметров, наблюдавшиеся во время мощных ураганов 2005 г. вблизи атлантического побережья США // Совр. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. Т. 6. № 2. С. 274–279. 2009.
- *Казимировский Э.Л., Кокоуров В.Д.* Движения в ионосфере. Новосибирск: Наука, 344 с. 1979.
- *Куницын В.Е., Сураев С.Н., Ахмедов Р.Р.* Моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. № 2. С. 59–63. 2007.
- *Лайтхилл М. Дж.* Нелинейная теория распространения волн. М.: Мир. 232 с. 1970.
- *Первалова Н.П., Ишин А.Б.* Эффекты тропических циклонов в ионосфере по данным зондирования сигналами спутниковой радионавигационной системы GPS // Исслед. Земли из космоса. № 3. С. 49–61. 2010.
- *Bertin E., Testud Y., Kersley L.* Medium scale gravity waves in the ionospheric F-region and their possible origin in weather disturbances // Planet. Space Sci. V. 23. P. 493–507. 1975.
- *Gvishiani A., Dubois J.O.* Artificial intelligence and dynamic systems for geophysical applications. Berlin: Springer. 347 p. 2002.
- *Ho C.M., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Pi X., Tsurutani B.T.* Global ionosphere perturbations monitored by the worldwide GPS network // Geophys. Res. Lett. V. 23. № 22. P. 3219–3222. 1996.
- *Hocke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophysicae. V. 14. P. 917–940. 1996.
- *Hoffmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J.* Global Positioning System : Theory and Practice. N.-Y.: Springer-Verlag Wien. 1061 p. 1992.
- *Huang Y.-N., Cheng K., Chen S.-W.* On the detection of acoustic-gravity waves generated by typhoon by use of real time HF Doppler frequency shift sounding system // Radio Sci. V. 20. P. 897–906. 1985.
- *Xiao Zuo, Xiao Sai-guan, Hao Yong-qiang, Zhang Dong-he* Morphological features of ionospheric response to typhoon // J. Geophys. Res. A. V. 112. № A04304/1-A04304/5. 2007.
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Tropical\\_cyclon\\_meteorology](http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Tropical_cyclon_meteorology)
- <http://weather.unisys.com/hurricane/>
- <http://www.sopac.ucsd.edu>
- <http://www.spider.ngdc.noaa.gov>
- <http://www.stormpulse.com>