

В.Г. Бондур, С.А. Васякин

Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»,  
Россия, 105064, Москва, Гороховский пер., 4,  
E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

## **КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ГРАНИЦЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА**

### **АННОТАЦИЯ**

Одними из наиболее опасных природных явлений, возникающих на границе атмосферы и океана, являются мезомасштабные вихри тропических широт (тропические циклоны, ураганы, тайфуны). Они приводят к гибели людей и наносят значительный экономический ущерб различным странам. Для изучения и предупреждения этих катастрофических природных процессов перспективно применение методов и систем космического мониторинга.

В настоящей работе представлены результаты исследования распределений температуры поверхности океана и активности тропических циклонов в Атлантической зоне тропического циклогенеза, полученные путем обработки космических изображений, сформированных с помощью аппаратуры MODIS (спутники AQUA и TERRA) за период времени с 2002 по 2010 годы с привлечением подспутниковых данных, полученных с помощью буев, а также информации из баз данных «АЭРОКОСМОС».

На основании результатов выполненных исследований установлено, что начиная с июня 2005 года, в период наибольшей активности тропических циклонов в анализируемом районе мирового океана наблюдались наиболее высокие значения температуры поверхности воды, которые существенно превышали средние значения температуры, характерные для того же периода в иные годы. Эти данные подтверждены результатами подспутниковых измерений, выполненных с помощью буев. В 2005 году возникло наибольшее число тропических циклонов высоких категорий, в том числе, таких как Катрина, Рита и др., которые нанесли серьезный экономический ущерб (миллиарды долларов) прибрежным территориям стран, расположенным вдоль Мексиканского залива и Карибского моря, унеся при этом сотни человеческих жизней.

Таким образом, выявлена связь активности тропических циклонов с температурой поверхности воды. Показано, что аномально высокая температура поверхности океана в 2005 году явилась катализатором небывалой активности разрушительных по силе и масштабам тропических циклонов в Северной Атлантике

Полученные результаты подтвердили эффективность методов космического мониторинга для изучения и предупреждения таких опасных мезомасштабных вихревых процессов на границе океан-атмосфера как тропические циклоны, а также для изучения изменений климата.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время все большую актуальность приобретают методы и технологии космического мониторинга для изучения и прогнозирования масштабных изменений в окружающей природной среде. В первую очередь это относится к возникновению и распространению природных катастроф, которые приводят к гибели людей и серьезному экономическому ущербу [1].

Одними из наиболее разрушительных природных явлений на Земном шаре, представляющих собой серьезную угрозу для человечества, унося множество человеческих жизней и нанося огромный экономический ущерб, являются опасные мезомасштабные процессы на границе раздела атмосферы и гидросферы, такие как тропические циклоны, тайфуны, ураганы) [1–3]. Экономический ущерб, наносимый экономике государств, подверженных воздействиям тропических циклонов (ТЦ), исчисляется от десятка миллионов до миллиардов долларов в год [1]. Так, например, только обрушившийся на побережье США ураган «Катрина» унес более 1800 жизней, а ущерб составил около 175 миллиардов долларов [1, 4].

В связи с этим важнейшей задачей для обеспечения социальной, экономической и экологической безопасности государств является разработка современных методов исследования и прогнозирования таких мезомасштабных вихревых процессов на границе атмосферы и океана, как ТЦ. Наиболее эффективным способом решения этой проблемы является создание комплексных систем непрерывного мониторинга, важное место среди которых занимают космические средства [1, 5]. Основными достоинствами современных средств космического мониторинга являются: широкий пространственный охват, высокое разрешение и оперативность получения данных, возможности регистрировать множество параметров окружающей среды [1, 5]. Одним из наиболее важных среди таких параметров, используемых при изучении тропических циклонов, является температура поверхности океана (ТПО).

Цель настоящей работы – исследование взаимосвязи ТПО с активностью мезомасштабных вихревых процессов на границе атмосферы и океана в североатлантической зоне тропического циклогенеза на основании космических данных, полученных аппаратурой MODIS, установленной на спутниках TERRA и AQUA, а также подспутниковой и архивной информации.

## **ВЫБОР РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ**

К тропическим циклонам относят атмосферное возмущение с пониженным давлением воздуха и штормовыми скоростями ветра, возникающее, как правило, в тропических широтах [1-4]. Тропики являются накопителями энергии, а ТЦ переносят ее в высокие широты, не давая перегреваться этим регионам Земли. Таким образом, ТЦ являются важным связующим звеном между различными широтными поясами Земли [2, 8].

Тропические зоны глобальной системы атмосфера-океан имеют важное значение в эволюции климатических и метеорологических процессах [6, 7]. Поскольку ТЦ черпают энергию из перегретой поверхности океана, то становится необходимым восстановления взаимосвязи колебания температур на поверхности океана с активностью тропических циклонов [9].

При выборе объекта исследования в настоящей работе была проанализирована активность опасных мезомасштабных явлений на границе атмосферы и гидросферы в шести зонах тропического циклогенеза (см. рис. 1), а также особенности теплового баланса и циркуляции Мирового океана.

Поскольку тропический циклогенез непосредственно связан с общим теплообменом на нашей планете, то необходимо внимательно рассмотреть взаимодействие всех факторов в системе «океан-атмосфера», от которых зависит, в частности, распределение тепла в глобальном масштабе. При этом, одним из главных среди таких факторов является влияние Мирового океана [1, 10]. Воды Мирового океана при их высокой теплоемкости, которая в 4 раза больше, чем у воздуха, поглощают солнечной энергии в среднем около  $90 \text{ ккал/см}^2$  в год, в то время как суша – только  $50 \text{ ккал/см}^2$  в год. Очевидно, что в Мировом океане, помимо солнечной радиации, других более или менее значительных источников тепла нет [10].

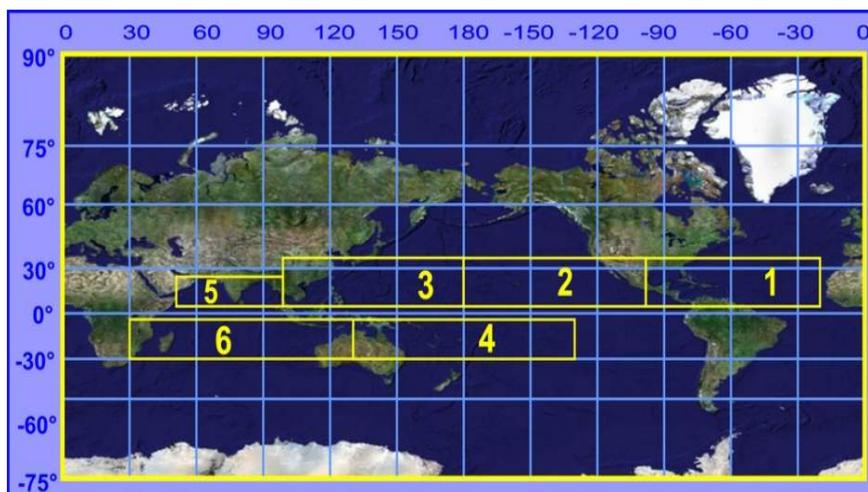


Рис 1. Зоны тропического циклогенеза: 1 – Атлантическая, 2 – Тихоокеанская северо-восточная, 3 – Тихоокеанская северо-западная, 4 – Тихоокеанская юго-западная и Австралийская, 5 –Индийская северная, 6 – Индийская юго-западная.

В результате исследований, проведенных за периоды времени с 1966 по 1975 гг. и с 1976 по 1988 гг., было установлено, что температура поверхности Тихого океана в зоне от 10° до 40° с.ш. понизилась на 0,5°С. В то же время показано, что в северной части Атлантического океана она повысилась на ту же величину по спутниковым данным за период с 1980 по 1990 гг. [7, 10]. Наблюдение, контроль и прогноз относительно коротких межгодовых и сезонных изменений, происходящих в ключевых районах возникновения и развития ТЦ, имеют важное значение при проведении регионального мониторинга.

Для выбора района исследования были проанализированы архивы первичных данных о тропическом циклогенезе, а также информация, содержащаяся в базе данных НИИ «АЭРОКОСМОС». Такие архивы содержат подробные данные обо всех прошедших ТЦ, а также об их параметрах по всем акваториям Мирового океана (<http://www.nhc.noaa.gov/>). Анализ этих баз данных показал, что с 1995 по 2005 гг. наблюдалось резкое изменение характеристик ураганов в Северной Атлантике, включая их число, интенсивность, продолжительность, области возникновения, особенности траекторий. Так за сезон 2005 года возникло 28 тропических циклонов (среднегодовая норма 9-10), причем 14 из них стали ураганами (норма 5-6), а четверем из них была присвоена V, высшая, категория опасности. В то же время, за период с 1970 по 1999 гг. в этом регионе возникало в среднем 13 ТЦ.

На рисунке 2 представлено распределение по годам экономического ущерба от ТЦ для США за период с 2000 по 2010 гг. [1, 4]

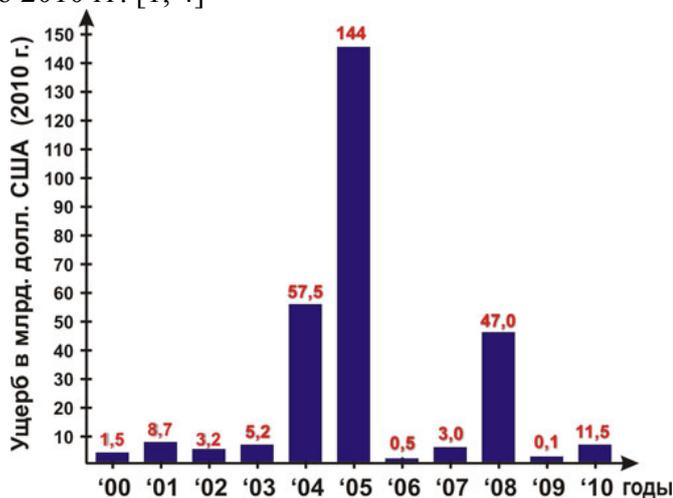


Рис. 2. Статистика полного ущерба от ТЦ, нанесенного экономике США с 2000 по 2010 гг.

Анализ рисунка 2 показал, что наибольший урон принесли ТЦ в 2005 году.

В Атлантическом океане ТЦ наиболее часто возникают в районе Бермудского треугольника, где теплое северное пассатное течение изменяет свое направление, и, сливаясь с Гвианским течением, переходит в Антильское течение, а потом — в Гольфстрим.

На основе анализа результатов сопоставления особенностей теплового баланса Мирового океана, температурных трендов, а также статистической информации об активности ТЦ, в качестве района для проведения исследований была выбрана одна из самых энергоактивных зон – Северо-Атлантическая зона тропического циклогенеза.

## **ВЫБОР КОНТРОЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА**

По современным представлениям существует несколько механизмов, объясняющих причины возникновения тропических циклонов, из которых следует, что для этого необходимо выполнение нескольких условий [1-4]:

- температура воды в слое океана от поверхности до глубин порядка 50 м должна быть выше 26°C. Это обуславливает энергетический ресурс циклона;
- атмосфера должна обладать неустойчивой стратификацией, обеспечивающей быстрый подъем насыщенного воздуха с выделением большого количества тепла конденсации для развития циклона;
- область зарождения циклона должна быть не ближе 500 км от экватора, так как вблизи экватора отклоняющая сила вращения Земли (сила Кориолиса) слишком мала, чтобы могла развиться сильная циклоническая циркуляция;
- необходимо зарождение незначительного первоначального вихря, который может играть роль спускового механизма.

Таким образом, в последнее время тропический циклогенез рассматривается с позиции исследования энергообмена в системе «океан-атмосфера» [1-4, 11, 12].

Общую картину формирования ТЦ представить следующим образом [3, 8, 11]. После зарождения первоначального вихревого возмущения вблизи его оси возникает небольшая область пониженного давления, в которую начинает втягиваться теплый влажный воздух. Далее этот воздух поднимается вверх, вызывая конденсацию водяных паров. Выделяющееся тепло конденсации прогревает столб атмосферы, вызывая еще большее падение атмосферного давления у поверхности океана и, таким образом, реализуется работа тепловой машины с положительной обратной связью, осуществляющей дальнейшее развитие ТЦ. При этом ТЦ берет свою основную энергию посредством изъятия тепла из перегретой поверхности океанов.

Поиск физических механизмов, адекватно описывающих возникновение тропических циклонов как крупномасштабных неустойчивостей и их дальнейшее развитие, является важнейшей физической проблемой. Главный вопрос генезиса этого катастрофического явления состоит в источнике энергии [1, 8, 9, 11–14]. Поскольку ТЦ черпают энергию из перегретой поверхности океана, то становится необходимым восстановления взаимосвязи колебания температур на поверхности океана с активностью тропических циклонов

В рамках последних исследований получены результаты, подтверждающие интенсификацию активности ураганов вследствие глобального потепления [1, 6, 15, 16]. В настоящее время устоявшимися являются общетеоретические представления об усилении интенсивности ураганов с ростом средних глобальных температур. Начиная с середины 70-х годов наблюдается более продолжительное время жизни ураганов, а так же их большая интенсивность [1, 2, 6]. При этом температура поверхности океана в зонах тропического циклогенеза может отражать хорошо документированные климатические сигналы, связанные с глобальным потеплением и усилением активности тропических циклонов. Исследования показывают, что только часть наблюдаемого роста энергии диссипации в ТЦ напрямую связана с увеличением температуры приповерхностной среды. Остающаяся часть может

быть объяснена изменением других факторов, в частности, значения уходящей длинноволновой радиации, которая в значительной степени определяет динамику активности ураганов в системе «океан-атмосфера» [16, 17].

Учитывая сказанное, физическим параметром среды, используемом в настоящем исследовании, была выбрана температура поверхности океана (ТПО), регистрируемая с помощью современных космических систем.

## **ФОРМИРОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Одним из основных климатических факторов, существенно определяющих динамику мезомасштабных вихревых процессов в системе на границе атмосферы и океана, является уходящее длинноволновое излучение [1, 16]. Детектирование климатических проявлений глобальных энергетических процессов и выявление их взаимосвязей с аномальными природными явлениями базируется на данных временных рядов космических наблюдений исследуемых параметров [1, 9, 15].

Космическими радиометрами измеряют интенсивность излучения, испускаемого поверхностью океана в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра. Тепловые съемки позволяют проводить исследование ТПО как в региональном, так и в глобальном масштабах [1, 5]. Это важно также и для исследования комплекса факторов, влияющих на глобальное изменение климата [1, 6, 7].

В настоящей работе используются космические данные, полученные с помощью сканирующих спектрорадиометров MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), которые установлены на спутниках TERRA и AQUA. Эти космические средства позволяют оперативно регистрировать информацию о различных параметрах изучаемой среды в 36 каналах электромагнитного спектра. Данные, полученные с помощью аппаратуры MODIS общедоступны, и могут быть получены через Интернет: [www.modis.gsfc.nasa.gov](http://www.modis.gsfc.nasa.gov), [www.oceancolor.gsfc.nasa.gov](http://www.oceancolor.gsfc.nasa.gov).

Измерения ТПО осуществляются в дальнем ИК диапазоне электромагнитного спектра, где излучательная способность воды близка к единице (0.95 - 0.97) и практически не зависит от состояния водной поверхности. Определение температуры поверхности океана по ее ИК-излучению основано на регистрации лучистой энергии, испускаемой поверхностным слоем воды в окне прозрачности атмосферы 8-13 мкм, где поглощение излучения водяными парами и газами атмосферы минимально [5, 18]. В этом окне прозрачности сканирующий спектрорадиометр MODIS имеет 2 спектральных канала в ИК-области спектра (10.780-11.280 мкм, 11.770-12.270 мкм), которые пригодны для определения ТПО [18, 19]. Эти спектральные каналы соответствуют области максимума теплового излучения при температуре черного тела 300 К. Они используются для реализации двуканального метода определения ТПО, который основывается на использовании синхронных измерений спектральной плотности энергетической яркости направленного вверх ИК-излучения [1, 18].

По измерениям, выполненным спектрорадиометром MODIS, рассчитываются физические параметры, необходимые для мониторинга океана и атмосферы. Они составляют так называемые информационные продукты MODIS. Для исследования были выбраны следующие информационные продукты - Sea Surface Temperature (SST): MOD28 - температура поверхности океана (ТПО) [19, 20]. При этом были выбраны 6 месяцев в каждом году - с июня по ноябрь (период активизации тропического циклогенеза в Северной Атлантике). Эти данные систематизировались за период с 2002 по 2010 год.

Для проведения анализа использовались уровни обработки Level3 с пространственным разрешением 4 км с интервалом осреднения в 1 месяц.[19, 20].

Глобальные распределения ТПО формировались с помощью программного комплекса ENVI. Сформированные данные в формате HDF-EOS поступали в zip-архивы. Каждый архив имел свое название, соответствующее типу, виду и временному интервалу осреднения композитных данных.

На рисунке 3 в качестве примера представлено визуализированное изображение глобальных распределений ТПО в программном комплексе ENVI.

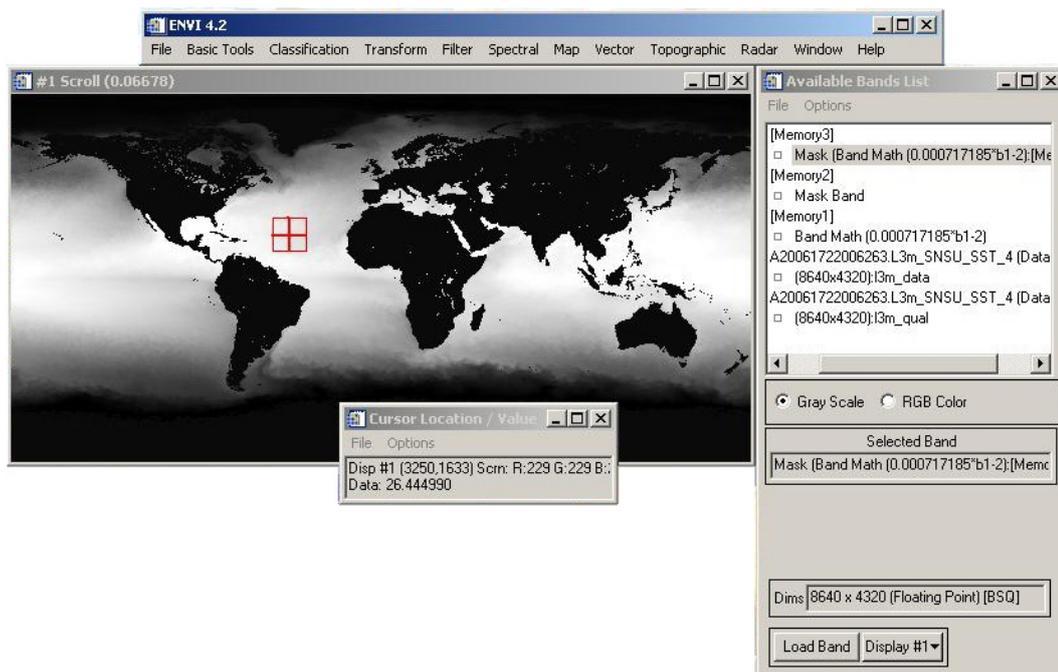


Рис. 3. Визуализация глобальных распределений ТПО (окно программы ENVI). Красный крестик указывает на пиксель в Северной Атлантике, который имеет температуру 26,44°C.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ, ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ

Методика проведения исследований состояла в реализации ряда последовательных этапов:

- на основе накопленных в базе данных «АЭРОКОСМОС» статистических сведений об опасных мезомасштабных явлениях в Атлантической зоне тропического циклогенеза определялся год наибольшей активности зафиксированных ТЦ высоких категорий;
- из базы данных «АЭРОКОСМОС» были выбирались многоспектральные космические данные, содержащие информацию о распределении ТПО, полученные с помощью приборов MODIS, установленных на спутниках AQUA и TERRA в период с 2002 по 2010 гг.;
- проводилось извлечение продуктов MODIS из архивов, их систематизация, предварительная обработка по алгоритмам восстановления сжатых данных, привязка и получение глобальных распределений ТПО;
- для выбора координат участка исследований ТПО в Северной Атлантике рассматривались траектории движения тропических циклонов за 2002-2010 годы, места их зарождения и наибольшего скопления (см. рис. 4);
- проводилась обработка глобальных распределений ТПО для получения региональных распределений ТПО в выбранном районе исследования;
- рассчитывалась средняя температура изучаемого района за месяц;
- на основе средних значений ТПО разрабатывалась цветокодированная шкала и строились цветные карты распределений ТПО по месяцам в Атлантической зоне тропического циклогенеза для визуального анализа;
- проводилась верификация полученных результатов о колебаниях температуры путем сравнения с подспутниковыми данными, полученными с помощью наводных буев NOAA;

- исследовалась взаимосвязь температуры поверхности океана и активностью ТЦ в Атлантической зоне тропического циклогенеза.
- строились диаграммы колебаний ТПО и активности ТЦ по месяцам с 2002 по 2010 годы;
- производилось сопоставление активности ТЦ и полученных данных о распределениях ТПО, и делались необходимые выводы по результатам работы.

На рисунке 4 представлены траектории ТЦ за 2005 и 2010 годы. Как уже отмечалось выше, 2005 год был пиковым по активности ТЦ за последние 10 лет. Кроме того, в 2005 году наблюдались большое число ТЦ высоких категорий (в том числе, катастрофический ураган «Катрина»), которые нанесли большой ущерб прибрежным территориям Карибского моря и Мексиканского залива.

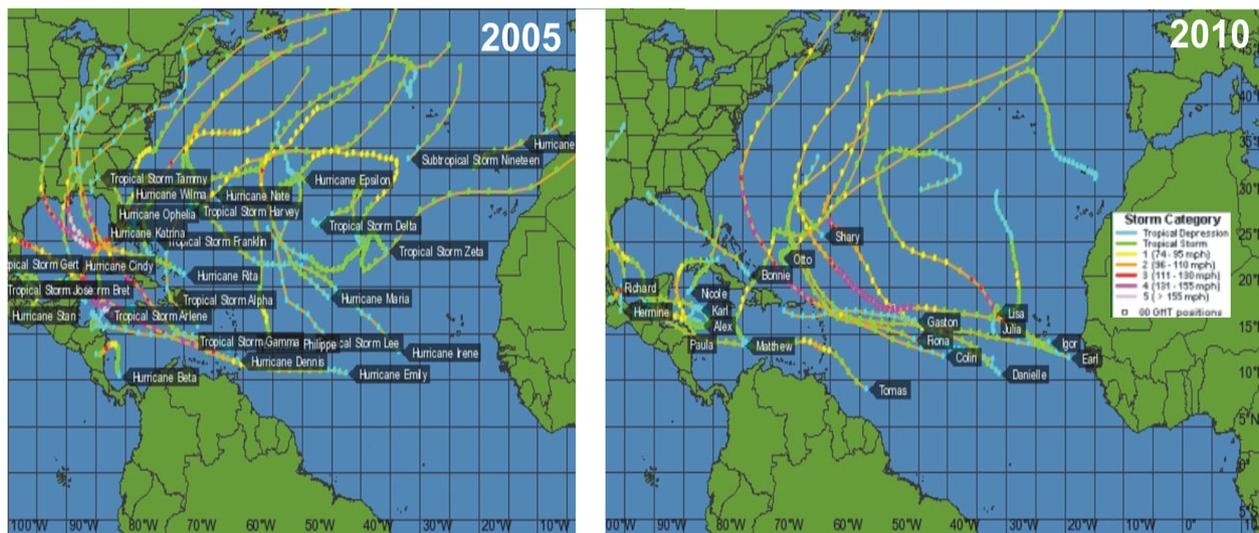


Рис. 4. Траектории тропических циклонов в северной Атлантике за 2005 год (слева) и 2010 год (справа). (<http://www.weatherunderground.com/>)

Из рисунка 4 видно также, что традиционное место зарождения тропических циклонов расположено в районе побережья Африки – выше  $7^{\circ}$  с.ш. и восточнее  $30^{\circ}$  з.д.

В 2005 году большая часть ураганов высоких категорий зарождалась в Саргассовом море близ Багамских островов, в Карибском море близ побережья Южной Америки. Это позволило выделить район для проведения исследований динамики ТПО; в качестве которого был выбран прямоугольный район между  $10^{\circ}$  и  $30^{\circ}$  с.ш. и  $90^{\circ}$  и  $55^{\circ}$  з.д. (см. рис. 5). Для выбора таких границ района использовались результаты изучения траекторий движения тропических циклонов за 2002–2010 годы.

Для верификации данных о температуре поверхности океана (ТПО) были использованы данные с буев и стационарных станций (платформ NOAA) в выбранном районе Атлантики. Действующая сеть буев и станций позволила получать лишь точечные данные, однако информации о локальном состоянии поверхности океана и различные метеорологические параметры предоставлялись достаточно подробно. Каждая станция (платформа) измеряет такие параметры, как направление ветра, скорость ветра, атмосферное давление, температуру воздуха и температуру океана на глубине 1 м. Эти данные получались через Интернет на сайте [www.ndbc.noaa.gov](http://www.ndbc.noaa.gov). В настоящей работе использовались данные с платформ и станций, имеющих обозначения 42056, 42057, 42058, MGIP4, LTBV3, которые располагались в пределах исследуемого района (см. рис. 5).

Поскольку при проведении исследований использовались спутниковые данные с осреднением месяц, то по всем ежедневным значениям температуры океана, полученных с платформ NOAA, также рассчитывались среднемесячные значения.

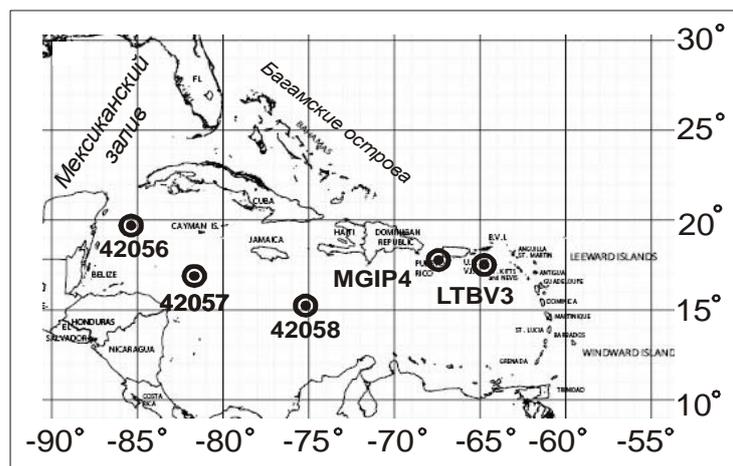


Рис. 5. Схема расположений буев и станций в исследуемом районе (Карибское море).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Средние значения ТПО, полученные в результате обработки данных космического мониторинга, проведенного в исследуемой зоне тропического циклогенеза, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Средние значения ТПО в исследуемом районе Северной Атлантике, полученные по космическим данным.

Месяц	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	T, °C								
VI	27,58	27,42	27,49	28,18	27,84	27,68	26,90	27,61	28,44
VII	28,22	28,07	28,29	28,81	28,16	28,45	28,25	28,14	28,69
VIII	29,01	28,77	28,89	29,49	28,87	28,92	28,90	28,63	29,41
IX	29,07	29,02	28,88	29,46	29,33	29,11	28,89	29,09	29,14
X	28,76	28,86	28,62	28,66	28,78	28,54	28,40	28,75	28,27
XI	27,87	27,80	27,17	27,44	27,52	27,04	27,18	27,60	27,05

На рисунке 6 приведены среднемесячные значения ТПО в исследуемом районе Северной Атлантике, полученные по космическим данным (аппаратура MODIS) для каждого проанализированного года (отличаются цветами). Анализ данных, приведенных в таблице 1 и на рис. 6 показывает, что в 2005 г. в исследуемом районе регистрировались максимальные температуры, которые в июле, августе и сентябре на 0,5-0,7 °C превышали соответствующие среднемесячные температуры в другие годы.

На рисунке 7 приведено количество ТЦ с категориями от I до V по месяцам за исследуемый период с 2002 по 2010 годы. Представленные данные показывают, что ТЦ наибольшей силы возникали в 2005 году в июле, августе, сентябре и октябре.

Для подтверждения данных о ТПО, полученных с помощью космического спектрорадиометра MODIS в исследуемой зоне тропического циклогенеза, использовались данные о температуре воды (Water Temperature), измеренные со станций и буев NOAA, расположенных в Карибском море.

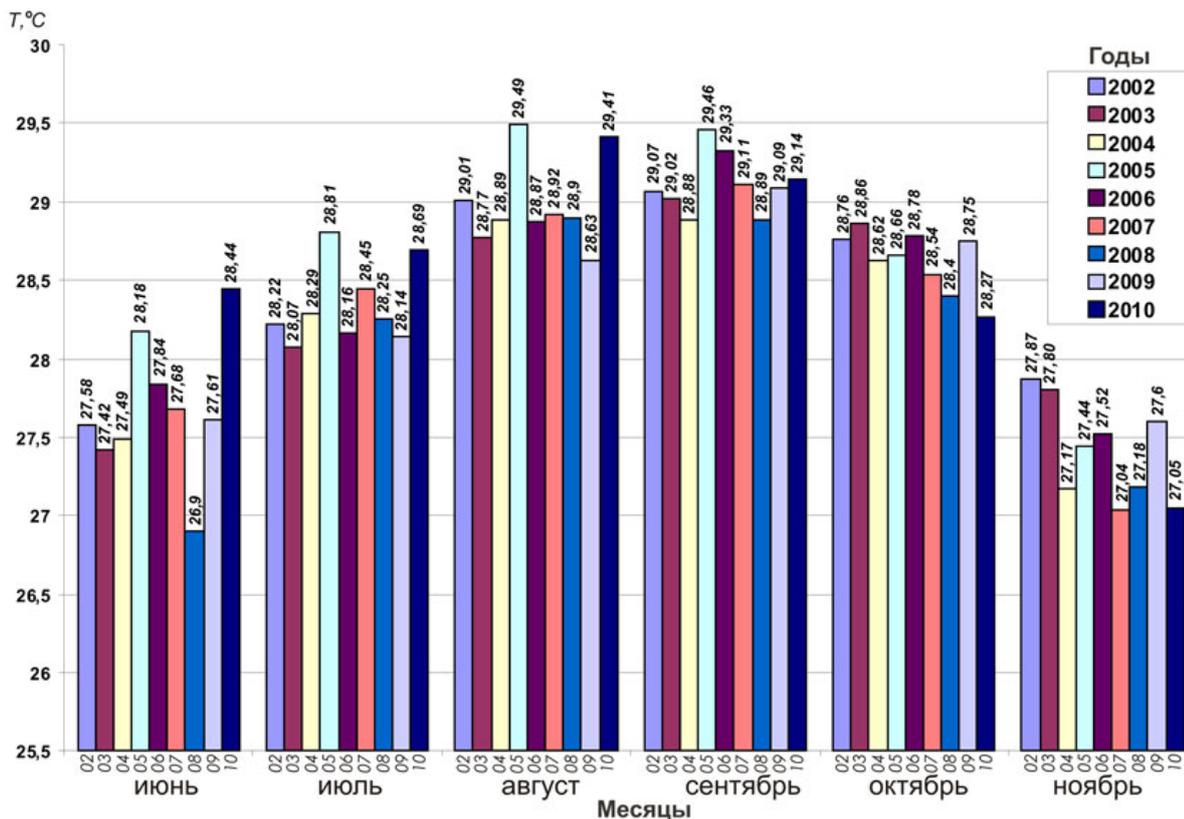


Рис.6. Значения осредненной по месяцам ТПО в сезон активности тропического циклогенеза в Атлантической зоне за 2002-2010 годы (данные космического спектрометра MODIS). Цифры вверху показывают среднюю температуру, цифры внизу – год.

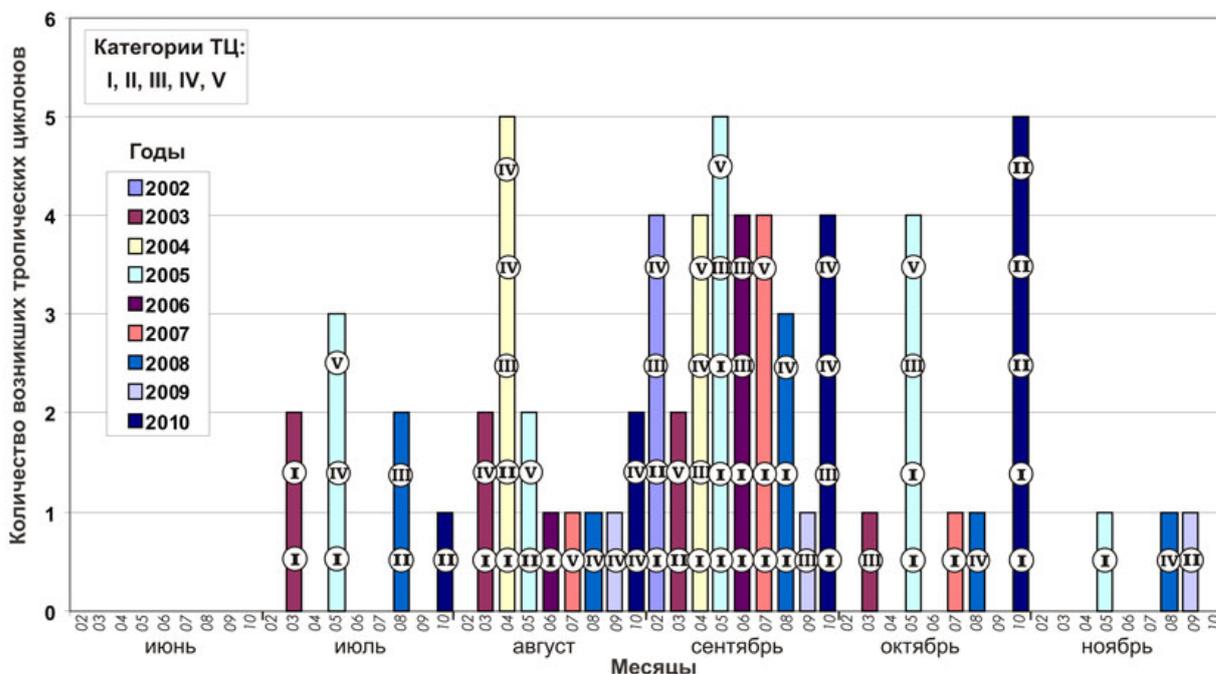


Рис. 7 Количество самых крупных ТЦ (от I до V категории), которые проявлялись с 2002 по 2010 годы с июля по ноябрь.

На рисунках 8 и 9 в качестве примеров приведены данные о температуре океана, полученные со станций и буев NOAA под номерами 42057 и 42058, а также для сравнения данные спектрометра MODIS в период с июня по ноябрь 2005 и 2006 гг.

Сопоставление рисунков 6, 8 и 9 показывает, что значения температур, полученных путем контактных измерений несколько превосходят значения, полученные со спутника. Однако эти значения ТПО, полученные из космоса и при подспутниковых измерениях, достаточно близки друг к другу. При этом, в целом данные, полученные из космоса и со станций и буев NOAA, имеют схожую динамику.

Такие различия значений ТПО, полученных по космическим и подспутниковым данным, объясняются особенностью их формирования. С помощью спектрорадиометра MODIS определяется температура поверхности воды, а с помощью буев и станций NOAA температура измеряется на глубине 1 метр. Кроме того, для восстановления ТПО по космическим данным необходимо учитывать состояние поверхности океана и применять корректные методы учета искажающего влияния атмосферы Земли.

Анализ рисунков 8 и 9 также показывает, что в 2005 году были более высокие ТПО по сравнению с 2006 годом.

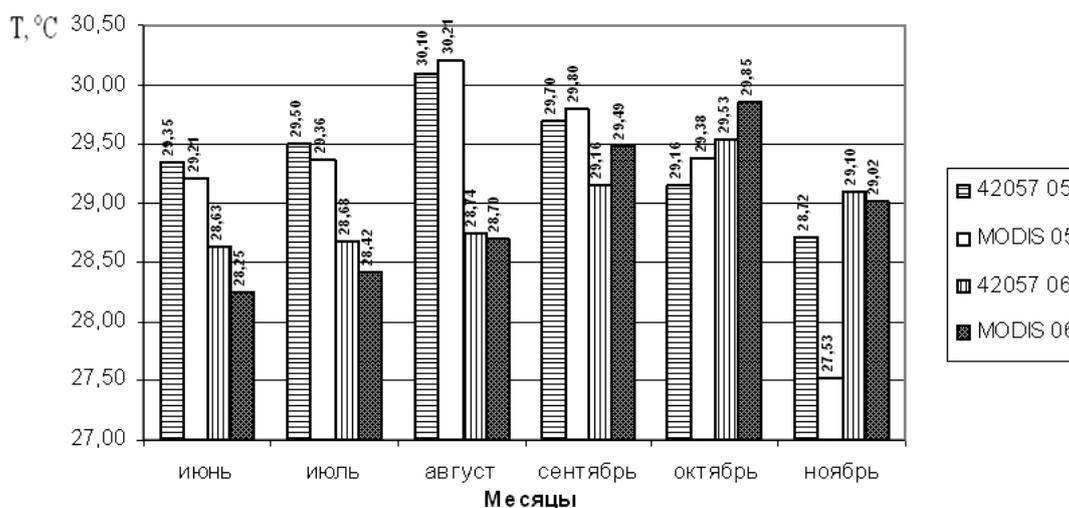


Рис. 8. Сопоставление средних температур, полученных с помощью буя 42057 и восстановленных по космическим изображениям MODIS за 2005 (MODIS 05)-2006 (MODIS 06) годы.

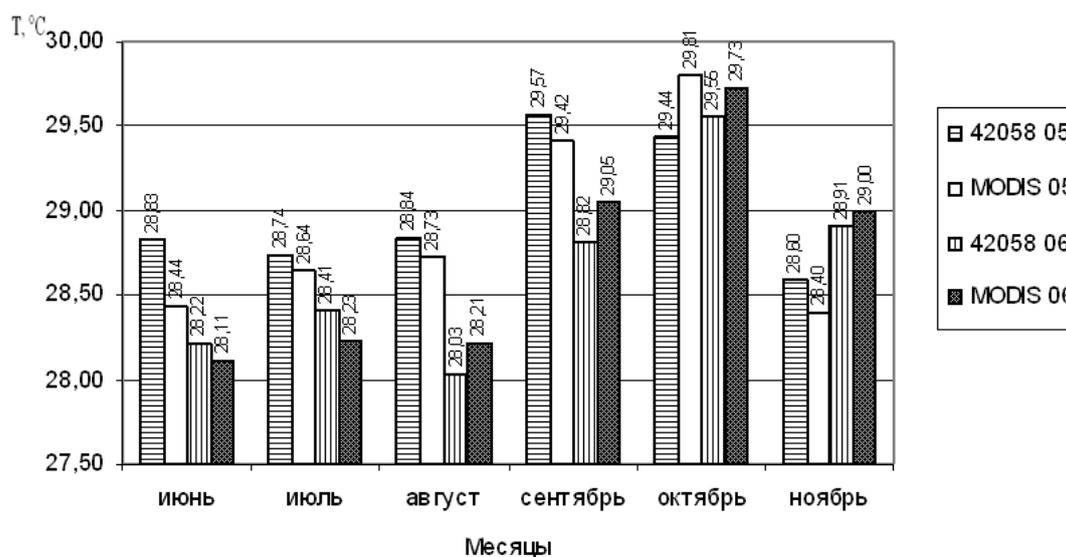


Рис. 9. Сопоставление средних температур, полученных с помощью буя 42058 и восстановленных по космическим изображениям MODIS за 2005 (MODIS 05)-2006 (MODIS 06) годы.

На рисунке 10 представлены визуализированные космические данные по пространственным распределениям ТПО в исследуемом районе с июня по сентябрь 2002-2010 гг.

Из рисунка 10, также как и из рисунка 6 и таблицы 1, видно, что кроме 2005 года, более высокие значения ТПО проявлялись также и в 2010 году (в июне месяце). В другие месяцы 2010 г. это повышение было несущественным. Категории ТЦ, возникших в 2010 г. были ниже, чем в 2005 году. Кроме того, траектории крупных ТЦ (например, IGOR, TOMAS, EARL), возникших в 2010 г., проходили, в основном, через морские акватории (см. рис. 4), в том числе зоны Мексиканского залива, не затрагивая сушу, поэтому экономический ущерб от ТЦ сезона 2010 г. был относительно невысоким (см. рис. 2).

В таблице 2 представлены данные о ТЦ высоких категорий, возникших в 2005 и в 2010 гг., которые нанесли значительный экономический ущерб. Как видно из этой таблицы, в 2010 самым мощным ТЦ (III категория) был ураган Karl, в то время как в 2005 году возникли четыре ТЦ V-й и один ТЦ IV-ой категорий опасности, которые нанесли значительно больший ущерб.

В таблице 3 в качестве примеров приведены космические изображения ТЦ V-й категории, возникшие в период времени с 2000 по 2010 гг.

Таблица 2. Тропические циклоны высоких категорий, возникшие в 2005 и 2010 гг. и причинивших значительный экономический ущерб

Год	Месяц	Имя ТЦ	Категория ТЦ	Ущерб в млрд. долл.
2010	Июль	Alex	2	1.9
	Сентябрь	Karl	3	5.6
	Сентябрь	Matthew	TS	2.6
2005	Июль	Dennis	4	4
	Июль	Emily	5	0.988
	Август	Katrina	5	81.2
	Сентябрь	Rita	5	10
	Октябрь	Stan	1	3.9
	Октябрь	Wilma	5	29.1

Таблица 3. ТЦ, отнесенные к самой опасной V категории, возникшие с 2000 по 2010 годы

					
Isabel, 2003	Ivan, 2004	Katrina, 2005	Rita, 2005	Wilma, 2005	Dean, 2007

На рисунке 11 представлены карты с пространственными распределениями ТПО по месяцам повышенной активности ТЦ (июль, август, сентябрь, октябрь), построенные на основе обработанных данных космической аппаратуры MODIS, с использованием базы данных «АЭРОКОСМОС». На этих картах нанесены траектории ТЦ, развивавшихся в Атлантической зоне в 2004 и 2005 гг.

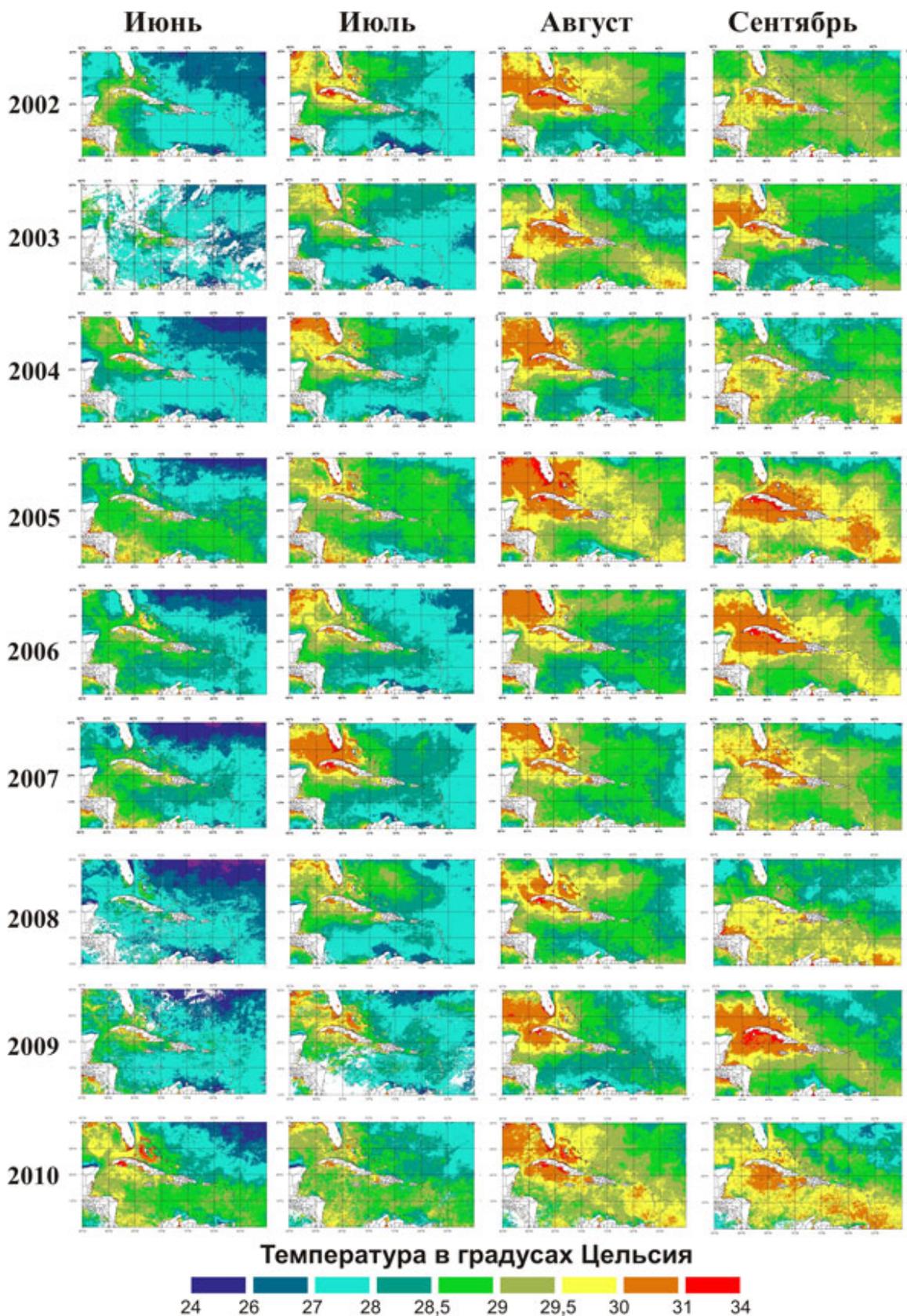


Рис. 10. Карты пространственных распределения ТПО в Атлантической зоне тропического циклогенеза, построенные по результатам обработки данных, полученных с помощью космического спектрорадиометра MODIS.

Анализ результатов выполненных исследований показал, что за последнее десятилетие максимальная активность тропических циклонов и максимальный ущерб от них в Северо-

Атлантической зоне тропического циклогенеза выявлен в 2005 г. В этот же период как по космическим, так и по подспутниковым данным регистрировалась максимальная температура поверхности океана, которая приблизительно на  $0,7^{\circ}\text{C}$  превышала среднемесячные температуры в другие годы.

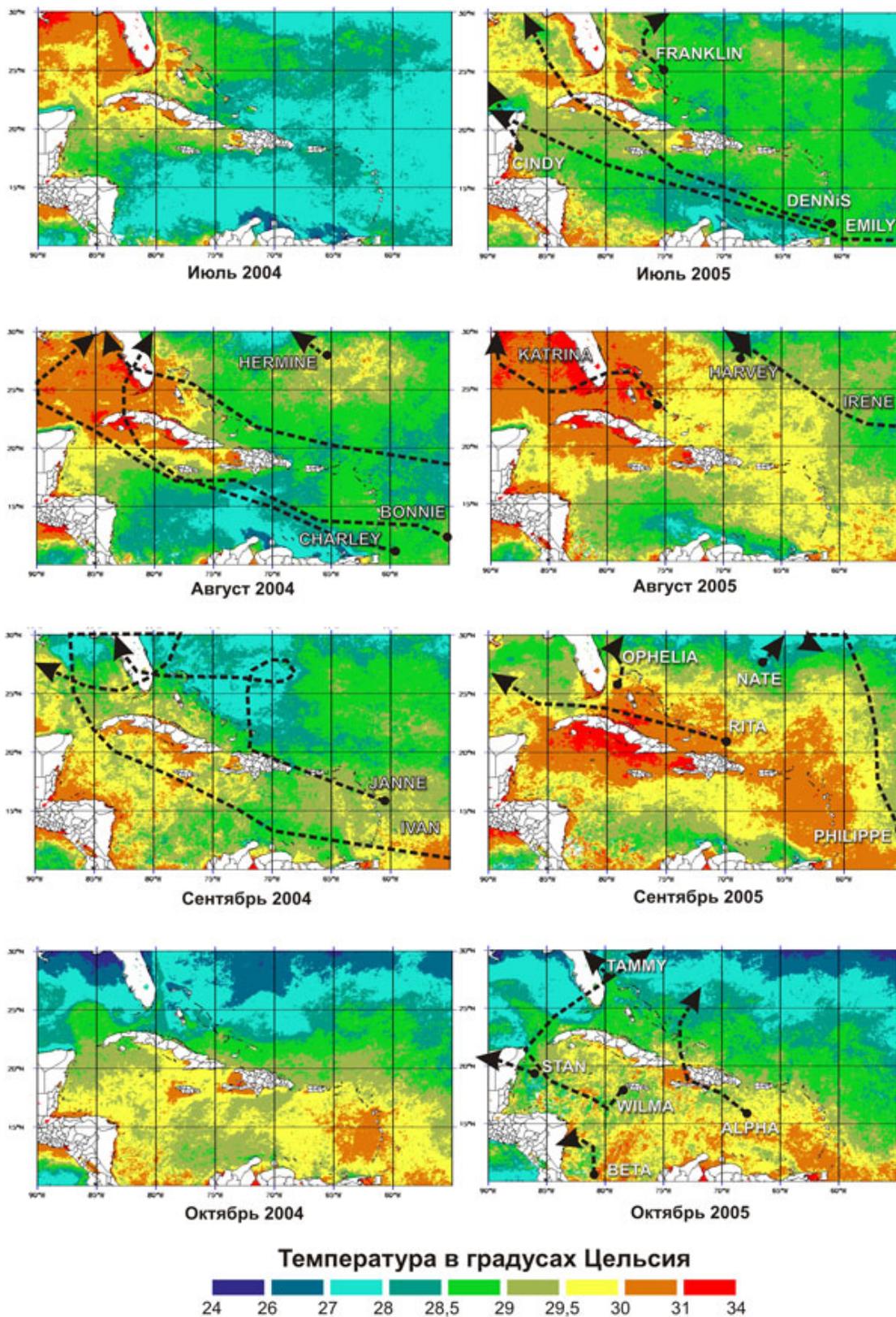


Рис. 11. Распределения ТПО в Атлантической зоне в июле, августе, сентябре и октябре 2004 и 2005 гг. Пунктирами со стрелками обозначены траектории движения сильных ТЦ и от мест их возникновения до исчезновения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения исследований изменчивости температуры поверхности океана в акватории Северной Атлантики с 2002 по 2010 гг. в сезон тропического циклогенеза (с июня по ноябрь), выполненных на основании результатов обработки космических изображений, полученных с помощью аппаратуры MODIS, информации из базы данных «АЭРОКОСМОС», а также подспутниковых данных, полученных с помощью буев, установлено, что в 2005 году, начиная с июня, в исследуемом районе наблюдались наиболее высокие значения ТПО, которые превышали на 0,5 – 0,7°C средние значения температуры, характерные для того же периода в другие годы. При этом в 2005 году возникло наибольшее число тропических циклонов высоких категорий, в том числе ТЦ KATRINA, RITA, STAN, WILMA, ALPHA, BETA и др., которые нанесли серьезный урон прибрежным территориям стран, расположенным вдоль Мексиканского залива и Карибского моря, и унесли множество человеческих жизней. Таким образом, выявлена связь повышенных значений ТПО и аномального числа тропических циклонов высоких категорий в 2005 году, которая подтвердилась и в 2010 году.

Полученные результаты продемонстрировали высокую эффективность методов космического мониторинга мезомасштабных вихревых процессов на границе атмосферы и океана. Эти методы могут с успехом использоваться для изучения динамики состояния атмосферы и океана, глобальных изменений климата, а также решения задач, связанных с мониторингом опасных природных процессов и явлений для их предупреждения и снижения негативных последствий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТПО – температура поверхности океана;  
ТЦ – тропический циклон;  
ИК – инфракрасный (диапазон);  
Т – температура, °С.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. - М.: Научный мир, 2009. - 692с.: ил.+22с.цв.ил.
2. Голицын Г.С. Динамика природных явлений. М.: Физматлит, 2004. 344с
3. Gray M. Tropical cyclone genesis//Atm. Sci. Colo. State Univ.—1975.— N 234.—119 p.
4. Richard D.K., Jamie R.R., Daniel P.B. Tropical Cyclone Report on Hurricane Katrina / National Hurricane Center. 2006.
5. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. Т.1. Физика. Химия. Биология. М.: Наука, 2004. С.55-117.
6. Будыко М.И., Климат в прошлом и будущем. // Л.: Гидрометеиздат, 1980. 352 с.
7. Израэль Ю.А., Груза Г.В., Семенов С.М., Назаров И.М., Квасникова Е.В. (ред.) (2004) Всемирный конгресс по изменению климата. 29 сентября-3 октября 2003 г., Москва. М.: Гидрометеиздат. 620 с.
8. Hoffman, R. N., Henderson, J. M., Grassotti, C., Leidner, S. M., and Nehr Korn T., J. Atmos. Sci., 2006, V. 63, P. 1924-1937
9. Головкин В.А. Глобальное перераспределение составляющих радиационного баланса Земли // Исследование Земли из космоса. 2003. №6 с. 3-13.

10. Лаппо С.С. Климат Земли и океан // Новые идеи в океанологии. Физика. Химия. Биология. Т.1. М.: Наука 2004, с. 24.
11. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф. Индикатор нестабильности системы океан-атмосфера как признак зарождения тропических циклонов. //Материалы Четвертой международной конференции “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках”, Москва, 18-20 октября 2011 г.
12. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф. Обнаружение моментов фазовых переходов в зонах тропического циклогенеза методом последовательного анализа Вальда. //Материалы Четвертой международной конференции “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках”, Москва, 18-20 октября 2011 г.
13. Бондур В.Г., Пулинец С.А. Воздействие мезомасштабных атмосферных вихревых процессов на верхнюю атмосферу и ионосферу Земли. //Материалы Четвертой международной конференции “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках”, Москва, 18-20 октября 2011 г.
14. Бондур В.Г., Пулинец С.А., Узунов Д. (2008) Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Катрина. Исследование Земли из космоса. № 6. С.3-11.
15. Бондур В.Г., Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Проблемы мониторинга и предсказания природных катастроф // Исследование Земли из Космоса, 2005, №1, с. 3-14.
16. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. – М.: Физматлит. 2004 - 166 с..
17. Гранков А.Г., Солдатов В.Ю. Расчет функции радиояркого отклика системы океан-атмосфера на вариации тепловых потоков// Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. №12. 2005 С. 45-53.
18. Покровский О.М. Объективный анализ полей температуры для поверхности морей России по данным измерений MODIS (Terra) // Исследование Земли из космоса , 2005, №3, с 53-65.
19. Kendall L. Carder, F. Robert Chen, Zhongping Lee, Steve K. Hawes, and Jennifer P. Cannizzaro. College of Marine Science University of South Florida. MODIS Ocean Science Team Algorithm Theoretical Basis Document, ATBD 19 Case 2 Chlorophyll a Version 7 30 January 2003.
20. W.Paul Menzeli, Suzanne W. Seemann. Jun Li, Liam E. Gumley //University of Wisconsin-Madison. MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document. Version 6, October 10, 2002