

В.Г. Бондур¹, В.Ф. Крапивин²

¹ Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»,
Россия, 105064, Москва, Гороховский пер., 4, E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал),
Россия, 141190, Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1, E-mail: vfk@ms.ire.rssi.ru

ОБНАРУЖЕНИЕ МОМЕНТОВ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ЗОНАХ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ВАЛЬДА

АННОТАЦИЯ

Для исследования переходных процессов между различными состояниями в системе океан-атмосфера (СОА) применен метод последовательного анализа Вальда с использованием алгоритмов кластерного анализа и процедуры ренорм-преобразования. В качестве обобщенной характеристики СОА предложен индикатор её фазового состояния, расчет которого осуществляется с использованием геофизических и метеорологических параметров.

На основе данных, регулярно поступающих с систем мониторинга СОА формируется кластерное пространство, заполнение которого во времени характеризуется параметром занятости λ . Обработка многолетних данных системы буйковых станций в Атлантическом секторе Мирового океана показала, что параметр λ хорошо соответствует фазовым состояниям СОА по шкале Бофорта. Расчет вероятности пересечения этим параметром уровней шкалы Бофорта осуществляется в реальном масштабе времени методом последовательного анализа Вальда.

Показано, что расчет предложенного индикатора фазового состояния СОА позволяет обнаружить момент зарождения тропического урагана в океане за 1-2 суток до его регистрации существующими системами мониторинга. Технология расчета индикатора фазовых состояний СОА демонстрируется на примерах обработки данных, предоставляемых международной сетью буйковых метеорологических станций TAO/TRITON/PIRATA/RAMA.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема прогнозирования моментов зарождения тропических циклонов обсуждалась многими авторами [1-8]. В течение последних десятилетий предпринимались усилия по выявлению индикаторов зарождения тропических циклонов, отражающих многообразие и сложность процессов в системе океан-атмосфера (СОА). Многие авторы связывают процесс зарождения тропических циклонов с различными механизмами формирования соответствующих геофизических условий. Однако, реально действующий эффективный механизм зарождения тропических циклонов до сих пор не выявлен. Это связано с тем, что сам процесс зарождения тропических циклонов, по-видимому, зависит от сложной и слабо изученной корреляции характеристик окружающей среды в их различном временном и пространственном проявлении. Вероятно, именно в этом заключена основная причина слабой изученности начальных условий зарождения тропических циклонов.

Одним из критериев зарождения этих природных катастроф является процесс формирования тепловых аномалий [8]. Отмечено, что такие тепловые аномалии возникают и угасают в пределах временного интервала, изменяющегося от пяти до десяти суток. Это подтверждается и экспериментальными данными, полученными в работе [9]. Более

длительные периоды времени характеризуют процесс накопления тепла в океане и связаны с изменением климата. Поэтому понимание эволюции тепловых аномалий с учетом их взаимосвязи с климатическими процессами потенциально может быть полезным для формирования индикатора зарождения тропического циклона. Однако сразу возникает проблема определения порогового уровня, переходя за который, интенсивность и масштабность тепловой аномалии стимулирует формирование циклона.

Сложность этой задачи возрастает при рассмотрении ограниченной акватории. В работе [7] предложен метод моделирования тепловых потоков в замкнутом бассейне океана путем сортирования объемов воды на объемные пиксели по температурным классам с учетом процессов ее перемешивания и диффузии как внутри бассейна, так и за счет взаимодействия с окружающим пространством. Модели, развитые в работе [7], позволяют, в частности, связать изменение кинетической и тепловой энергии бассейна с атмосферными процессами, и замкнуть, таким образом, корреляционные зависимости между различными параметрами системы океан-атмосфера. Необходимо только найти механизм модельного описания корреляционных связей, структурно независимый от этих параметров. Таким механизмом может быть фазовая неустойчивость системы океан-атмосфера.

МОДЕЛЬ ФАЗОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ОКЕАН-АТМОСФЕРА

Параметрическое пространство системы океан-атмосфера Ξ состоит из точек, координаты которых изменяются в соответствии с законами её функционирования, определяющими эволюцию фазовых состояний этой системы. В общем случае всем фазовым положениям СОА можно поставить в соответствие кластеры размерностью, совпадающей с размерностью параметрического пространства. Переходы между кластерами определяют состояния системы в каждый момент времени. Один из методов параметризации этих переходов состоит в построении модели, которая описывает эволюцию структуры точек фазового пространства СОА.

Пусть вектор $x\{x_1, \dots, x_n\} \in \Xi$ описывает фазовые характеристики СОА. В реальности существующие системы мониторинга регистрируют с различным временным и пространственным разрешением составляющие этого вектора. Если, начиная с момента времени t_0 , осуществлять заполнение фазового пространства точками x^* , соответствующими измеренным значениям всех компонент вектора x , то с течением времени произойдет заполнение фазового пространства. Процесс заполнения выглядит как случайное блуждание точки x^* между кластерами. Нахождение точки в пересечении кластеров будет соответствовать некоторому уровню неопределенности.

Просачивание точки x^* в реальном времени между кластерами будет соответствовать переходу системы океан-атмосфера в другое фазовое состояние. Результат оценки этого состояния зависит от формы кластерного пространства и скорости просачивания [4]. В рассматриваемом случае речь идет о геометрических фазовых переходах [3].

Все фазовые характеристики СОА ограничены по определению. Поэтому фазовое пространство этой системы также будет ограничено. Следовательно, оно может быть разделено на многомерные пиксели $\Xi_{ij} \in \Xi$. В результате этого обычное кластерное пространство трансформируется в совокупность групп пикселей одного класса. По мере поступления данных о величинах x^* пиксели кластерного пространства заполняются, если вектор x^* указывает на конкретный пиксель. Эту процедуру можно формализовать с помощью математических терминов и представить на языке теории последовательного анализа Вальда и теории перколяции [2,5].

В данной работе рассматриваются три фазовых состояния СОА (см. рис. 1): фоновое (скорость ветра $V < 15$ м/с); шторм ($15 \text{ м/с} < V < 33$ м/с); ураган различных категорий ($V > 33$ м/с).

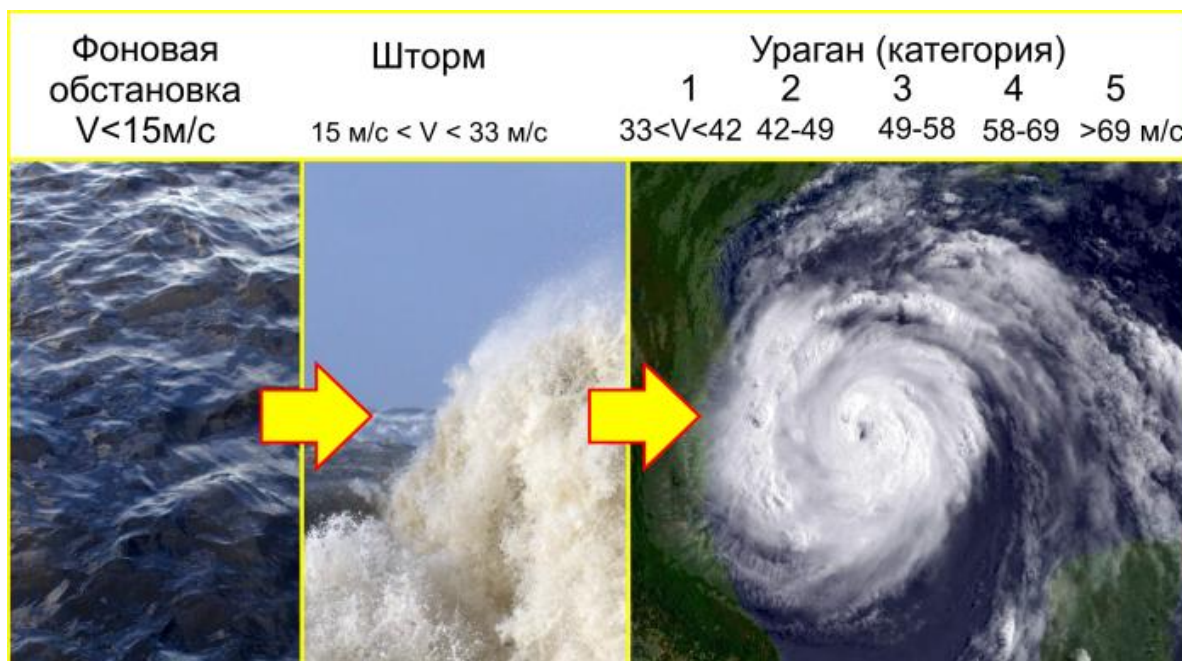


Рис. 1 Основные фазовые переходы в системе океан-атмосфера.

ДАННЫЕ МОНИТОРИНГА

Глобальная система наблюдения за климатом (GCOS - Global Climate Observing System) и глобальная система наблюдения за океаном (GOOS - Global Ocean Observing System) поставляют большие объемы архивной и оперативной информации о различных характеристиках окружающей среды практически по всему земному шару. Объектами космического мониторинга являются профили атмосферных температур и паров воды, температура поверхности океана, скорость и направление приводного ветра, характеристики поверхностного волнения, соленость воды, перенос массы (импульса) над океаном, водность облаков и др. При исследовании взаимодействия океана и атмосферы используются сенсоры оптического, ИК- и СВЧ – диапазонов [1, 10-14]. К сожалению, временные режимы поступления данных от различных спутниковых систем не всегда согласуются с временным режимом изменчивости процессов в СОА. Этот недостаток в какой-то мере преодолевается за счет использования потоков данных от наземных и буйковых метеорологических станций.

Для контроля зон зарождения тропических циклонов создана распределенная система наземных и заякоренных метеорологических станций, получившая название TAO/TRITON&PIRATA (Tropical Atmosphere Ocean/TRIangle Trans-Ocean buoy Network & Pilot Research moored Array in the Tropical Atlantic). Именно данные этой системы являются наиболее регулярными, точными и информативными, так как поступают от более чем 70 пространственно разнесенных в широкой полосе вдоль экватора пунктов регистрации метеорологических данных. Табл. 1 дает представление о характере этих данных.

Таблица 1. Основные характеристики системы океан-атмосфера, измеряемые буйковыми станциями TAO/TRITON/PIRATA.

Параметр	Символ	Характеристика параметра
Температура поверхности океана, °C	x_1	Температура измеряется на глубинах 1,0м или 1,5 м в зависимости от типа станции. Точность измерений $\pm 0.003^\circ\text{C}$ - $\pm 0.02^\circ\text{C}$.
Скорость (м/с) и направление ветра (в)	x_2, x_3	Параметры ветра измеряются на высоте 3,5 м. Скорость ветра измеряется с точностью 3%.

градусах по часовой стрелке от северного направления)		Направление ветра определяется с точностью 5° - $7,8^{\circ}$.
Осадки (мм/ч)	x_4	Осадки регистрируются каждые 10 мин. на высоте 3,5 м с погрешностью $\pm 0,4$ мм в час.
Плотность воды (кг/м ³)	x_5	Плотность воды оценивается с учетом ее солености.
Глубина изотермы 20°C	x_6	Глубина изотермы рассчитывается по профилю температуры с помощью линейной интерполяции с шагом по глубине 20 м.
Температура воды на глубинах $\{h_i\}$, °C	$x_7(h_i)$	Температура воды измеряется до глубины 750 м. на фиксированных горизонтах. Точность $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$.
Относительная влажность атмосферного воздуха, %	x_8	Влажность воздуха измеряется на высоте 2,2 м. над уровнем океана с точностью $\pm 2,7$ %.
Атмосферное давление, атм.	x_9	Атмосферное давление фиксируется с точностью $\pm 0,01\%$ на высоте 3 м. над уровнем океана.
Температура атмосферы	x_{10}	Температура атмосферы измеряется на высоте 2,2 м над уровнем океана с точностью $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$.
Соленость морской воды, ‰	x_{11}	Соленость рассчитывается по данным измерений температуры воды и проводимости. Точность $\pm 0,02$ ‰.

Кроме того, в рамках различных программ изучения СОА осуществляются нерегулярные измерения тепловых потоков на границе океан-атмосфера. Например, такие масштабные измерения были проведены в 2003 г. в рамках проекта ONR-CBLAST (Office of Naval Research - Coupled Boundary Layer Air-Sea Transfer) с применением самолета-лаборатории в период прохождения ураганов Fabian и Isabel [15], а также ранее в 1990 г. в рамках проекта АТЛАНТЕКС-90 с использованием научно-исследовательских судов "В.Бугаев", "Муссон" и "Волна" [16].

В настоящей работе использовались архивные данные, полученные с помощью указанных систем, для месяцев года с присутствием и отсутствием тропических циклонов. Основная цель обработки этих данных с помощью последовательного анализа и ренорм-преобразования заключалась в том, чтобы путем сопоставления результатов анализа сформированных перколяционных кластеров выявить определенные закономерности в динамике их структуры и определить критерий наступления тропического урагана с указанием времени упреждения.

ПРОЦЕДУРА РЕНОРМ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Рассмотрим кубическую решетку $\Xi_d = \{\Xi_{i_1, \dots, i_d}\}$ размерности d со стороной h в фазовом пространстве метеорологических параметров, перечисленных в табл. 1. Поток данных от системы ТАО/TRITON&PIRATA не ограничен во времени и характеризуется поступлением вектора $\bar{x} = \{x_i; i=1, \dots, 10\}$ с интервалом в 30 мин. Выберем ограниченный интервал T времени мониторинга, характеризуемый набором последовательных моментов $\{t_j; j=1, \dots, N\}$ поступления данных о состоянии метеорологической обстановки в заранее выбранном секторе СОА. С течением времени будем закрашивать ячейки $\Xi_{i_1, \dots, i_d}$, в которые попадает точка $x^* = \{x_1^*(t_j), \dots, x_d^*(t_j)\}$, где $x_i^*(t_j)$ - измеренная величина i -го параметра в момент времени $t_j \in T$.

Следуя теории перколяции [17], будем формировать кластеры, объединяя смежные контактирующие окрашенные пиксели в единую цепочку и оценивая долю окрашенных пикселей λ и относительный объем кластерного пространства μ , а также распределение кластеров по размерам.

СЛУЧАЙНОЕ БЛУЖДЕНИЕ НА ПЕРКОЛЯЦИОННОМ КЛАСТЕРЕ

Использование данных системы TAO/TRITON&PIRATA в режиме текущего мониторинга, например, тропического циклона Катрина с использованием процедуры ренорм-преобразования эквивалентно схеме блуждания точки $\{x_i\}$ по ячейкам Ξ_d . Для наглядности рассмотрим случай $d=2$ (плоскость x_1, x_2). Как видно из рис. 2, случайные блуждания точки $\{x_i\}$ по $\Xi_2 = (x_1, x_2)$ подчинены направленному воздействию сменяющейся метеорологической обстановки, характеризующейся переходом от фонового уровня к ситуации, когда возник тропический ураган Катрина [1, 18].

Реально при наличии на интервале времени T действующего тропического урагана точка $\{x_1, x_2\}$ осуществляет двойной перколяционный переход по некоторому направлению η между зонами Ξ_2^1 и Ξ_2^3 .

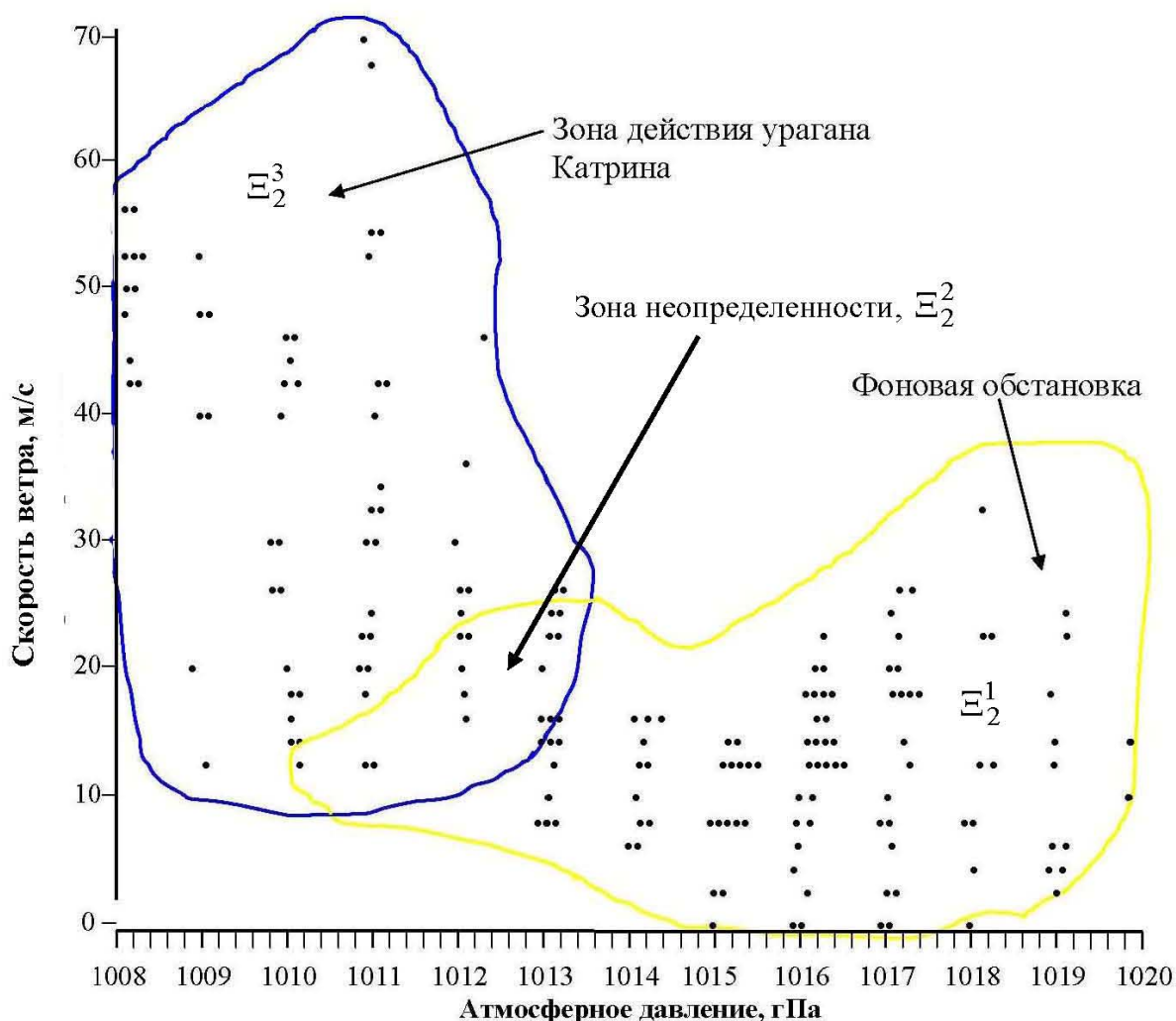


Рис. 2. Фазовый портрет перколяционного перехода метеорологической обстановки до и после возникновения урагана Катрина по данным метеостанции SPGF1 на Багамских островах (август 2005 г.) Ураган был зафиксирован 23 августа и действовал до 31 августа 2005 г. Максимальная скорость ветра достигала $x_2 = 280$ км/ч, минимальное атмосферное давление было на уровне $x_1 = 902$ миллибар (676.6 мм рт.ст.).

Анализ движения точки $\{x_9, x_2\}$ связан с оценкой вероятностных характеристик смещения ее проекции на направление η . Отклонение этой проекции от некоторой начальной точки отсчета A , выбранной, например, так, чтобы ее координата x_2 была максимальной, а координата x_9 минимальной, представляет собой сумму Σ_v случайного числа случайных слагаемых. Распределение нормированных моментов $\tau = v/Ev$ первого вхождения точки A в Ξ_2^2 описывается функцией распределения Вальда [20].

АНАЛИЗ ПРОЦЕДУРЫ РЕНОРМ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Структура распределения зон плоскости Ξ_2 по метеорологическим событиям имеет характерные образования, разделенные зоной Ξ_2^2 , в которой событие зарождалось, но не было обнаружено (см. рис. 2).

При $(x_9, x_2) \in \Xi_2^1$ метеорологическая обстановка в районе, где позже возник ураган Катрина, находилась на фоновом уровне до 20 августа 2005 г. Ураган Катрина был впервые обнаружен спутником Landsat утром 23 августа 2005 г. над юго-восточным сектором Багамских островов и ему была присвоена первая категория по пятибалльной шкале Saffir-Simpson. Двигаясь по направлению к Мексиканскому заливу, утром 28 августа 2005 г. он достиг пятой категории, и затем его мощность уменьшалась вплоть до исчезновения 31 августа 2005 г. Анализ метеорологических данных показывает, что первые признаки усиления неустойчивости окружающей среды начали появляться 20 августа 2005 г. Следовательно, период между 20 и 22 августа 2005 г. необходимо отнести к зоне неопределенности. Именно в этой зоне необходимо искать оценки характерных индикаторов зарождения тропического урагана.

По-видимому, размер Δ и структура зоны Ξ_2^2 зависят от реализуемой затем мощности урагана. Поиск такой зависимости является одной из задач, решение которой позволит осуществлять прогнозирование мощности урагана.

До момента вхождения точки A в зону Ξ_2^2 параметры кластерного пространства были равны: $\lambda^* = 0,2$, $\mu^* = 0,87$ и $S = 7,08$. В зоне Ξ_2^2 эти характеристики оцениваются величинами: $\lambda^* = 0,5$, $\mu^* = 0,94$ и $S = 22,5$. Ясно, что переход между этими значениями соответствует моменту зарождения тропического урагана.

Чтобы формализовать процедуру обнаружения этого момента, определим уровень неустойчивости окружающей природной среды с помощью интегрального индикатора, который в рассматриваемом случае имеет вид:

$$I_m(t) = \frac{1}{N+s} \sum_{j=m}^{m+N} \sum_{i=1}^s \alpha_i(t_j) \quad (1)$$

где N - длина выборки (временного интервала), по объему которой осуществляется усреднение значений параметров; m - момент начала регистрации выборки; s - количество измеряемых параметров СОА (в рассматриваемом случае $s=10$);

$$\alpha_i(t_j) = \begin{cases} 1 & \text{если } \Delta x_i(t_j) \cdot \Delta x_i(t_{j-1}) \leq 0; \\ 0 & \text{если } \Delta x_i(t_j) \cdot \Delta x_i(t_{j-1}) > 0 \end{cases} \quad (2)$$

где $\Delta x_i = \bar{x}_i - x_i$; $\bar{x}_i(N) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_i(t_j)$.

Индикатор неустойчивости СОА (1) является показателем изменчивости текущего среднего значения вектора $\{x_i\}$.

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчетов этого индикатора на примерах ураганов Катрина и Густав соответственно. Анализ рис. 3 показывает, что с приближением момента зарождения ураганов неустойчивость окружающей среды нарастает, достигая максимального

уровня в момент, когда ураган уже регистрируется со спутника. При этом четко выделяются три области значений $I_m(t)$:

- 1) область фоновых характеристик, когда вариация параметров СОА за ограниченный промежуток времени изменяется в пределах статистически устойчивого диапазона;
- 2) область неопределенности, где вероятность возникновения урагана превышает уровень 0,5, а скорость нарастания неустойчивости увеличивается;
- 3) область действия урагана, где скорости изменения средних значений всех параметров $\{x_i\}$ достигают максимальных значений.

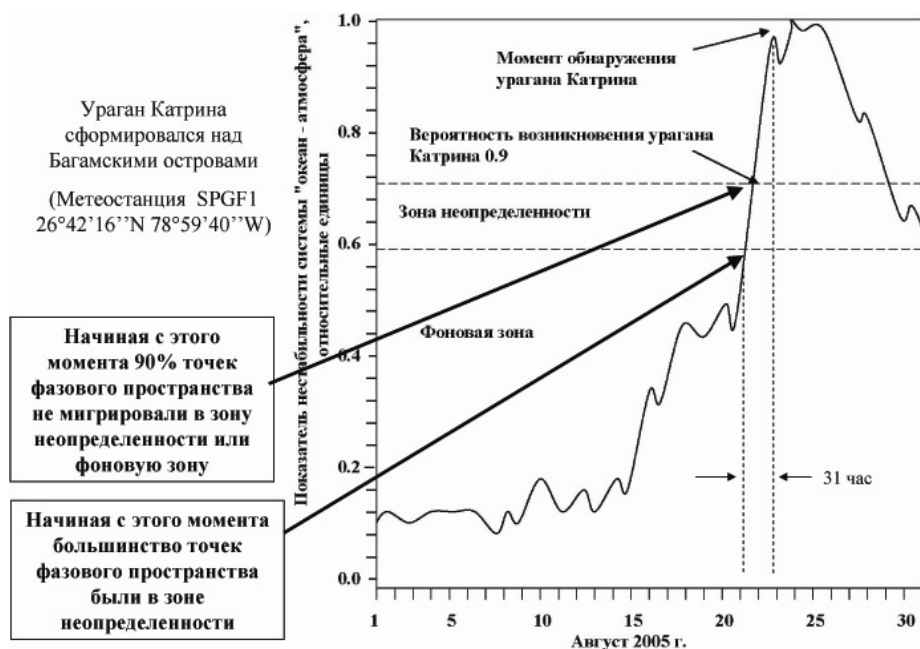


Рис. 3. Динамика индикатора неустойчивости системы "океан-атмосфера", рассчитанного по измерениям TAO/TRITON и спутника Aqua (x_1 - скорость ветра; x_2 - давление; x_3 - влажность атмосферы; x_4 - температура атмосферы).

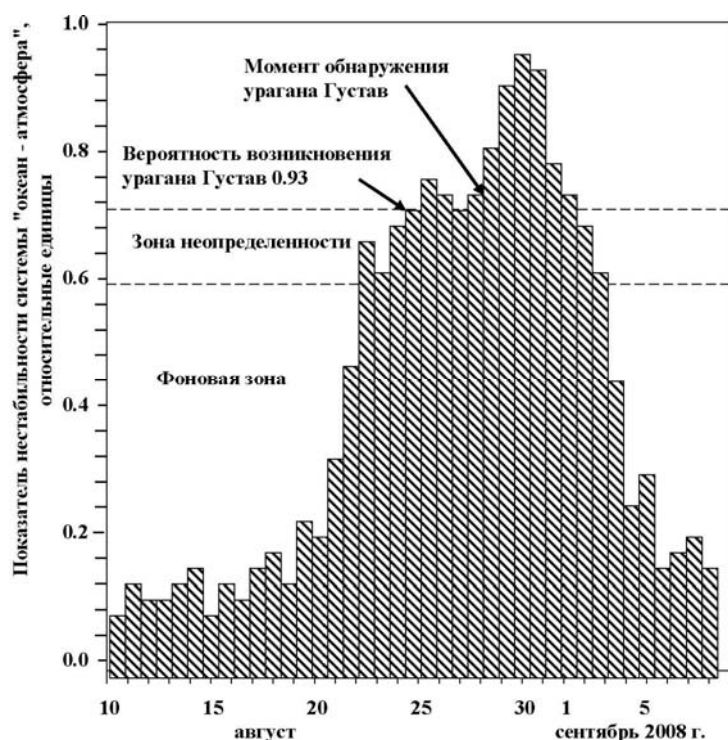


Рис. 4. Динамика индикатора неустойчивости COA в период зарождения и прохождения тропического урагана Густав.

Результаты, приведенные на рис. 4, получены по данным измерений с метеорологической станции Port Au Prince на Гаити. Ураган Густав был впервые обнаружен как тропическая депрессия спутником Landsat в 11 часов 25 августа 2008 г. в 420 км юго-восточнее островов Гаити. Затем он перемещался по Карибскому бассейну со скоростью 25 км/час при скорости ветра 55 км/час. Двигаясь по направлению к Мексиканскому заливу, во второй половине 30 августа 2008 г. вблизи западного побережья Кубы (21.6N, 82.5W) он достиг категории 4 при скорости ветра 247 км/час. В середине дня 1 сентября 2008 г., снизив мощность до второй категории, ураган Густав достиг побережья США, и затем его мощность уменьшалась. Он исчез к вечеру этого же дня.

Анализ рис. 3 и 4 показывает, что фазовому переходу COA соответствуют участки резкого нарастания производной $I_m(t)$. Отсюда видно, что применение описанной процедуры позволило бы обнаружить момент возникновения ураганов Катрина и Густав, по крайней мере, за 1-2 суток до их обнаружения космическими средствами.

Следовательно, слежение за метеорологической обстановкой и синхронный расчет индикатора неустойчивости с его сопоставлением со структурой кластерного пространства позволяет обнаружить момент фазового перехода COA от фонового состояния к возникновению тропического урагана. Для полной формализации этой процедуры необходимо проведение модельных расчетов, которые позволят выбрать ситуации возникновения тропических ураганов различной мощности с построением соответствующей решающей процедуры. В данной работе на двух примерах показана возможность решения этой задачи.

Одним из подходов к анализу критических состояний COA является формирование ренорм-группы. Анализ метеорологических данных в Атлантике на границе зон действия тропических ураганов в 2005 г. показывает, что в этом случае $\lambda^* = 0.203$ и ренорм-преобразование приводит к пустой ренорм-группе. Наоборот, структура перколяционного кластера, отражающего прохождение в 2005 г. пяти тропических ураганов различной мощности характеризуется величиной $\lambda^* = 0.377$ и ренорм-преобразование приводит к заполненной ренорм-группе [1]. Отсюда можно сделать вывод о том, что с помощью ренорм-преобразования можно различать два состояния COA, но нельзя предсказать переход между ними. Для решения этой задачи необходимо рассчитывать динамику более тонкой структуры перколяционного кластера с применением индикатора I_m . Пример такой динамики приведен на рис. 5.

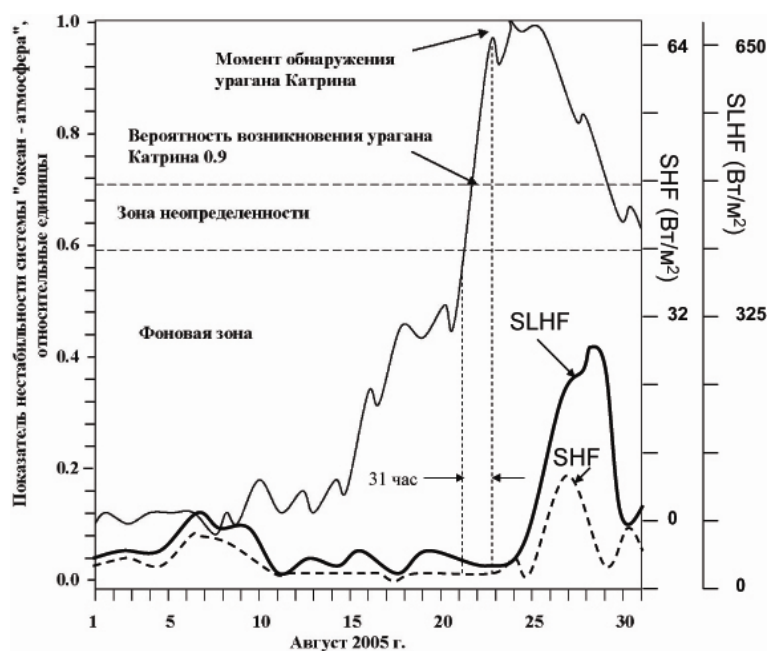


Рис. 5. Сравнительный анализ индикатора неустойчивости и тепловых потоков в динамике СОА в августе 2005 г. Обозначения: SHF (surface heat flux)- поверхностный поток физической (ощутимой) теплоты, SLHF (surface latent heat flux) - поверхностный поток скрытой теплоты

Как видно из рис. 5 динамика индикатора I_m и показателей тепловых потоков практически тождественна по форме с запозданием примерно в одни сутки. Это запаздывание обнаруживается и при дистанционных исследованиях тепловых потоков в СОА [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных наблюдений за СОА в тропической зоне Мирового океана показывает, что разграничение фазовых состояний СОА по оценкам параметров перколяции окружающей среды позволяет выделить зоны с различным уровнем неустойчивости системы. Чтобы достичь более полного соответствия между состоянием СОА и параметрическим пространством модели перколяции необходимо создать алгоритм формирования ренормированной конфигурации в режиме текущего времени с расчетом критического уровня вероятности p^* ренормализации. На его основе возможна оценка момента зарождения тропического урагана, а с учетом структуры перколяционного кластера возможен прогноз его мощности. Модельный расчет p^* в режиме реального времени основан на поиске границы перехода ренормированной конфигурации от пустого кластера к заполненному. Возможно, что дополнительный расчет вероятности заполнения связующей ячейки основного кластера, соответствующей зоне Ξ_2^2 , позволит предсказать мощность тропического урагана.

Дальнейшее совершенствование разработанной методики раннего обнаружения момента зарождения тропического урагана возможно за счет расширения фазового пространства перколяционной модели, например путем учета радиоярких откликов СОА, которые могут регистрироваться, например, со спутника Aqua.

Важным моментом расчета индикатора неустойчивости $I_m(t)$ является выбор параметра N , который определяет размер квазистационарного участка в экспериментальных данных. Для тропической зоны приемлемой оценкой для N является временной промежуток 7 часов. Система TAO/TRITON/PIRATA предоставляет данные измерений с частотой 1 час. Поэтому точность расчетов определяется двумя обстоятельствами:

- 1) ограниченностью статистически достоверной выборки;
- 2) погрешностью усреднения данных при переходе к большим временным интервалам.

Одним из путей повышения точности оценки неустойчивости СОА и увеличения вероятности более раннего обнаружения момента зарождения тропического урагана является применение метода квазилинеаризации случайных процессов [21].

Проведенный в настоящей работе анализ показывает, что одной из актуальных задач прогнозирования тропических ураганов является выбор структуры фазового пространства СОА. Поэтому необходимо провести исследование по выделению наиболее информативных характеристик СОА, учет которых снизит размерность фазового пространства при сохранении достоверности прогноза.

Изучение взаимосвязи радиоизлучения СОА с тепловыми процессами на границе раздела между нижними слоями атмосферы и поверхностью океана в последнее время стало одной из актуальных проблем. Поскольку космические средства являются наиболее оперативными источниками информации, а на спутниках, оборудованных СВЧ-радиометрами, регистрируется только яркостная температура, то выявление ее взаимосвязи с геофизическими параметрами является необходимым этапом при их определении по измерениям яркостных температур. Конечно, здесь имеется много задач, связанных с тем, что измерения на высоте спутника в микроволновом диапазоне дают информацию не только

о нижних слоях атмосферы, но и о более высоких ее слоях. Эти вопросы являются предметом отдельных исследований.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- x_1 - температура поверхности океана, °C;
- x_2 – скорость ветра на высоте 3.5 м, м/с;
- x_3 – направление ветра (в градусах по часовой стрелке от направления на север);
- x_4 – осадки, мм/час;
- x_5 - плотность морской воды, кг/м³;
- x_6 - глубина изотермы 20°C, м;
- x_7 - температура воды на глубине h_i , °C
- h_i – глубина слоя океанской воды, м;
- x_8 - относительная влажность атмосферного воздуха, %
- x_9 - атмосферное давление, атм.;
- x_{10} - температура атмосферы на высоте 2.2 м, °C;
- x_{11} - соленость морской воды, ‰;

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. // М.: Научный мир. 2009. 692 с.
2. Вальд А. Последовательный анализ. М.: Физматлит. 1960. 328 с.
3. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. Часть 2. М.: Изд-во Мир. С. 92-137.
4. Кочкарова П.А. Применение перколяционных методов, теории фракталов и дробных производных к исследованию термодинамики и кинетики фазообразования. Диссертация кандидата наук. Ставрополь: Карачаево-Черкесская государственная технологическая академия. 2006. 114 с.
5. Крапивин В.Ф., Потапов И.И., Солдатов В.Ю. Адаптивная информационная технология для оперативной диагностики системы океан-атмосфера. //Экологические системы и приборы. 2009. №2. С. 33-38.
6. Esaam J.W. Percolation theory. //Rep. Prog. Phys. 1980. Vol. 43. No.7. P. 833-912.
7. Mellor G. and Blumberg A. Wave breaking and ocean surface layer thermal response.// Journal of Physical Oceanography. 2004. Vol. 34. P. 693-698.
8. Old C. and Haines K. The evolution of heat anomalies in a coupled ocean-atmosphere GCM and the implications for North Atlantic decadal climate variability.// Geophysical Research Abstracts. 2003. Vol. 5. P. 327-336.
9. Бондур В.Г., Васякин С.А. Космический мониторинг мезомасштабных вихревых процессов на границе атмосферы и океана. //Материалы Четвертой международной конференции “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках”, Москва, 18-20 октября 2011 г.
10. Чернявский Г.М. Отечественные технологии спутниковой СВЧ-радиометрии // Аэрокосмический курьер. 2007. №6. С.57-59.
11. Cherny I.V., Raizer V.Yu. Passive Microwave Remote Sensing of Oceans. Wiley UK.London. 1998. 300p.
12. Бондур В.Г. Проблемы аэрокосмического мониторинга океана // В сб.: Исследования в области океанологии, физики атмосферы, географии, экологии, водных проблем и геокриологии. М.: ГЕОС. 2001. С. 87-94.

13. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии. В кн.: Новые идеи в океанологии. Том 1. Физика, химия, биология. Под ред. М.Е. Виноградова, С.С. Лаппо. М.: Наука. 2004. С. 55-116.
14. Bondur V.G. Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // In Tech «Waste Water», Rijeka 2011, pp. 155-180.
<http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>
15. Drennan W.M., Zhang J.A., French J.R., VcCormick C., and Black P.G. (2007) Turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. Part II: Latent heat flux // Journal of Atmospheric Sciences. 2007. Vol. 64. No. 4. P. 1103-1115.
16. Солдатов В.Ю. Микроволновая диагностика системы атмосфера-океан// Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2006. № 12. С. 28-35.
17. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. Том 2. М.: Изд-во Мир. 1990. 400 с.
18. Солдатов В.Ю. Многофункциональная информационно-моделирующая система для гидрофизического эксперимента// Материалы IX Международного Симпозиума «Проблемы Экоинформатики», Москва, 9-11 декабря 2010 г. С. 96-100.
19. Солдатов В.Ю. Диагностика системы океан-атмосфера с помощью перколяционной модели// Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2007. №5. С. 52-64.
20. Sukov A.I., Soldatov V.Yu., Krapivin V.F., Cracknell A.P., and Varotsos C.A. A sequential analysis method for the prediction of tropical hurricanes. //International Journal of Remote Sensing, 2008. Vol. 29. No. 9. P. 2787-2798.
21. Крапивин В.Ф., Кондратьев К.Я. Глобальные изменения окружающей среды: экоинформатика. СПб: Изд-во СПб гос. ун-та. 2002. 724 с.
22. Гранков А.Г., Солдатов В.Ю. Расчет функции радиояркостного отклика системы океан-атмосфера на вариации тепловых потоков// Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2005. №12. С. 45-53.