

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ВСЕРОССИЙСКИЙ ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
(ВИНИТИ)

ПРОБЛЕМЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

Обзорная информация

Выпуск № 5

Издается с 1972 г.

Москва 2010

Выходит 12 раз в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор — академик РАН *Ю. М. Арский*

Члены редколлегии:

*Л. А. Бочин, И. Н. Борисенко, Е. В. Карцева,
В. Ф. Крапивин, И. И. Потапов, И. А. Щетинина*

Наш адрес: 125190, Россия, г. Москва, ул. Усиевича, 20
Всероссийский институт научной и технической информации
Отдел научной информации по глобальным проблемам
Телефон 8(499) 152-55-00; Факс 8(499) 943-00-60
E-mail: ipotapov37@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Derk Loobach, Niki Fratzeskaki, James Meadowcroft. Раскрывая устойчивость: подход перехода к устойчивому развитию

ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ

Огородников Б. И. Физико-химический институт имени Л. Я. Карпова и советский Атомный проект

Янин Е. П. Экологическая геохимия: предмет и методические основы

ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ОХРАНА ВОД СУШИ, МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

Янин Е. П. Особенности накопления никеля в техногенных речных илах

СТИХИЙНЫЕ БЕДСТВИЯ И КАТАСТРОФЫ АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Крапивин В. Ф., Потапов И. И. Лесной пожар и радиационный баланс бореального леса

Бондур В. Г., Крапивин В. Ф., Солдатов В. Ю., Потапов И. И. Прогнозирование фазовых переходов в системе "океан—атмосфера"

Крапивин В. Ф., Гранков А. Г., Головачев С. П., Шутко А. М., Потапов И. И. Разработка технологий диагностики зарождения тропических ураганов в океане на основе методов дистанционного зондирования

Веселовский А. В., Платэ А. Н. Вулканическая активность полуострова Камчатка

НОВЫЕ КНИГИ

Марков Ю. Г. Экология и информация: новые идеи

Авилов В. И., Авилова С. Л. Информационная система акватоэкологии

Ответственный за выпуск к. т. н. *И. И. Потапов*

ИД № 04689 от 28.04.01	Подписано в печать 06.04.2010	Гарн. литерату
Бумага "Хероx"	Формат бумаги 60×84 ¹ / ₁₆	Печать цифр
Усл. печ. л. 6,53	Уч.-изд. л. 9,96	Тираж 69 экз. Заказ 3

Адрес редакции: 125190, Россия, г. Москва, ул. Усиевича, д. 20.
Тел. (499) 152-55-00

ФГУП «Производственно-издательский комбинат ВИНТИ»,
140010, г. Люберцы Московской обл., Октябрьский пр-т, 403. Тел. (495) 554-2

Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2010, № 5, с. 82-94
Прогнозирование фазовых переходов в системе "океан-атмосфера"

Академик РАН В.Г. Бондур
Центр проблем аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», Москва

Д.ф.-м.н. В.Ф. Крапивин, В.Ю. Солдатов
Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г.
Фрязино Московской обл.

К.т.н. И.И. Потапов
Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Млсква

Переходные процессы между различными состояниями в системе "океан-атмосфера" изучаются с помощью кластерного анализа и перколяционной модели. В качестве обобщенной характеристики состояния системы предлагается индикатор неустойчивости, расчет которого осуществляется по оценкам 10 параметров системы. Показано, что перколяционная модель позволяет обнаружить момент зарождения тропического урагана в океане за 1-2 суток до его регистрации существующими системами мониторинга. Данное исследование было поддержано РФФИ (грант № 09-01-90303 Вьет_а).

Prognosis of the phase transitions in the ocean-atmosphere system
V.G. Bondur, V.F. Krapivin, V.Yu. Soldatov, and I.I. Potapov

Transition processes between different positions of the "ocean-atmosphere" system are studied by means of cluster analysis and percolation model. Instability indicator of the system is proposed to be as generalized characteristics of the system. Evaluation of this indicator is realized by means of 10 system parameters measured with the monitoring system. It is shown that percolation model give possibility to detect the moment of tropical hurricane beginning before 1-2 days up to its register by means of existing observational systems. This study was supported by RFBR (Grant No. 09-01090303 Viet_a).

ВВЕДЕНИЕ

Проблема прогнозирования моментов зарождения тропических циклонов обсуждается многими авторами [1-18]. В течение многих десятилетий предпринимаются различные усилия по выявлению индикаторов зарождения тропических циклонов, отражающих многообразие и сложность процессов в системе океан-атмосфера (СОА). Многие авторы процесс зарождения тропического циклона связывают с различными механизмами формирования благоприятных геофизических условий, но точного объяснения и выявления реально работающего механизма до сих пор не выявлено. Это связано с тем, что сам процесс зарождения тропического циклона, по-видимому, зависит от сложной и слабо изученной корреляции характеристик окружающей среды в различном временном и пространственном их проявлении. Вероятно, именно в этом лежит причина слабой изученности начальных условий зарождения тропического циклона.

Одним из критериев зарождения тропического циклона называют процесс формирования тепловых аномалий [17]. Отмечено, что тепловые аномалии возникают и угасают в пределах временного интервала, изменяющегося от пяти до десяти суток. 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 [16] предложен метод моделирования тепловых потоков в замкнутом бассейне океана с помощью 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. В частности, модели, развитые в [6], позволяют связать изменение кинетической и тепловой энергии бассейна с атмосферными процессами. И таким образом замкнуть корреляционные зависимости между различными параметрами системы океан-атмосфера. Остается только найти механизм модельного описания всех этих корреляций, структурно независимый от них. Таким механизмом может быть модель фазовой неустойчивости 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 её фазовых состояний. 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. Одним из методов параметризации этих переходов состоит в построении модели, которая параметризует эволюцию структуры точек фазового пространства СОА.

Пусть вектор $x\{x_1, \dots, x_n\} \in \Xi$ описывает фазовые характеристики системы океан-атмосфера. В реальности существующие системы природного мониторинга измеряют с различным

временным и пространственным разрешением составляющие этого вектора. Если, начиная с момента времени t_0 осуществлять заполнение фазового пространства точками $\mathbf{x}^*$, соответствующими измеренному значению всех компонент вектора $\mathbf{x}$, то с течением времени произойдет заполнение фазового пространства, а процесс заполнения будет выглядеть как случайное блуждание точки $\mathbf{x}^*$ между кластерами. Нахождение точки в пересечении кластеров будет соответствовать некоторому уровню неопределенности.

Просачивание точки $\mathbf{x}^*$ в реальном времени между кластерами будет соответствовать переходу системы океан-атмосфера между фазовыми состояниями. Результат оценки этого состояния зависит от формы кластерного пространства и скорости просачивания [8]. В рассматриваемом случае речь идет о геометрических фазовых переходах [7]. Все фазовые характеристики СОА ограничены по определению. Поэтому фазовое пространство этой системы также ограничено. Следовательно, оно может быть разделено на многомерные пиксели $\Xi_{ij} \in \Xi$, в результате чего обычное кластерное пространство трансформируется в совокупность групп пикселей одного класса. По мере поступления данных о величинах $\mathbf{x}^*$ пиксели кластерного пространства заполняются, если вектор $\mathbf{x}^*$ указывает на конкретный пиксель. Эту процедуру можно формализовать с помощью математических терминов и представить на языке теории последовательного анализа Вальда и теории перколяции [4,10]. В данной работе рассматриваются три фазовых состояния СОА (рис. 1).

ДАННЫЕ МОНИТОРИНГА

Глобальная система наблюдения за климатом (GCOS- Global Climate Observing System) и глобальная система наблюдения за океаном (GOOS - Global Ocean Observing System) поставляют множество архивной и оперативной информации о различных характеристиках окружающей среды практически по всему земному шару. Объектами спутникового мониторинга являются профили атмосферных температур и паров воды, температура океана, скорость и направление приводного ветра, характеристики 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, 2,3,12, 13]. К сожалению, временные режимы поступления данных от различных спутниковых систем не всегда согласуются с временным режимом процессов изменчивости в СОА. Этот недостаток в какой-то мере преодолевается за счет потоков данных от наземных и буйковых метеорологических станций.

В области 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 характеристику этих данных.

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 [14], а также ранее в 1990 г. в рамках проекта АТЛАНТЕКС-90 с использованием научно-исследовательских судов "В.Бугаев", "Муссон" и "Волна" [11].

Используем архивные данные указанных систем для месяцев года с присутствием и отсутствием тропических циклонов. Основная цель обработки этих данных с помощью последовательного анализа и перколяционной модели состоит в том, чтобы путем сопоставления результатов анализа перколяционных кластеров, сформированных по этим данным, выявить определенные закономерности в динамике их структуры и определить критерий наступления тропического урагана с указанием времени упреждения.

ПЕРКОЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

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 [6], 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.

Структура кластерного пространства зависит от интервала T , выбор которого определяется содержанием конкретной задачи. При непрерывном режиме мониторинга ограниченной акватории океана следует ожидать формирование устойчивой структуры кластерного пространства с выходом параметров λ и μ на асимптотические уровни. При этом характер процесса такого перехода будет отражать изменчивость фазового пространства СОА. Следовательно, рассчитав характеристики кластерного пространства в различных условиях функционирования СОА можно построить решающее правило для оценки момента наступления фазового перехода в динамике СОА.

Другими словами, эмпирическая оценка критических порогов λ^* и μ^* , а также расчет распределения размеров кластеров в момент фазового перехода СОА позволяет определить момент времени, когда в системе возникает нарушение фонового поведения. В рассматриваемом здесь случае приближение характерных параметров СОА к критическим значениям будет соответствовать приближению момента зарождения тропического урагана.

Средний размер кластера S (число закрашенных пикселей) и корреляционная длина ξ (линейный размер кластера) хорошо аппроксимируются соотношениями [18]:

$$S(\lambda) \approx |\lambda - \lambda^*|^{-\gamma}, \quad \xi(\lambda) \approx |\lambda - \lambda^*|^{-\nu},$$

где параметры γ и ν зависят от размерности пространства d и в конкретном случае определяются эмпирически. Функции S и ξ при приближении момента зарождения тропического урагана начинают резко возрастать. Каждая из этих функций определяется компьютерным моделированием различных ситуаций, охватывающих временные интервалы при отсутствии и наличии тропических ураганов. Такие модельные эксперименты частично проведены ниже.

СЛУЧАЙНОЕ БЛУЖДЕНИЕ НА ПЕРКОЛЯЦИОННОМ КЛАСТЕРЕ

Использование данных системы TAO/TRITON&PIRATA в режиме текущего мониторинга, например, тропического циклона Катрина с использованием перколяционной модели эквивалентно схеме блуждания точки $\{x_i\}$ по ячейкам Ξ_d . Для наглядности рассмотрим случай $d=2$ (плоскость x_9, x_2). Как видно из рис. 2, случайные блуждания точки $\{x_i\}$ по $\Xi_2 = (x_9, x_2)$ подчинены направленному воздействию сменяющейся метеорологической обстановки, характеризующейся переходом от фоновому уровню к ситуации, когда возник тропический ураган Катрина. Реально при наличии на интервале времени T периода действия тропического урагана точка $\{x_9, x_2\}$ осуществляет двойной перколяционный переход по некоторому направлению η между зонами Ξ_2^1 и Ξ_2^3 .

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 $\tau = \nu E v$ первого вхождения точки A в Ξ_2^2 описывается функцией распределения Вальда [18]:

$$P(\tau < y) = W_c(y) = \int_0^y w_c(z) dz,$$

где

$$w_c(z) = \sqrt{\frac{c}{2\pi}} z^{-\frac{3}{2}} \exp\left[-\frac{c}{2}\left(z + z^{-1} - 2\right)\right],$$

параметр c определяется соотношением $c = (E v)^2 (D v)^{-1}$, $E v$ - среднее значение времени блуждания точки A до ее входа в зону Ξ_2^2 , $D v$ - дисперсия параметра v .

После большого числа шагов t блуждания точки A при отсутствии критических переходов среднее число N_t закрашенных пикселей фазового пространства будет равно:

$$\langle N_t \rangle = t^{\frac{-\theta}{2}},$$

где параметр $\theta \in [1, 29-2, 84]$ оценивается в каждом конкретном случае по результатам моделирования.

АНАЛИЗ ПЕРКОЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ

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. При $(x_9, x_2) \in \Xi_2^1$ метеорологическая обстановка 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, он утром 28 августа достиг пятой категории, и затем его мощность уменьшалась до исчезновения 31 августа 2005 г. Анализ метеорологических данных показывает, что первые признаки усиления неустойчивости окружающей среды начали появляться 20 августа. Следовательно, период между 20 и 22 августа 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 затем реализуемой мощности урагана. Поиск такой зависимости является одной из задач, решение которой позволит осуществлять прогнозирование мощности урагана. До момента вхождения точки А 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:

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

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 $s=10$);

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

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 $I_m(t)$ является показателем изменчивости текущего среднего значения вектора $\{x_i\}$. На рис. 3 и 4 приведены расчеты этого индикатора для ураганов Катрина и Густав. Видно, 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 начинает нарастать;
- 3) область действия урагана, где скорость изменения среднего всех параметров $\{x_i\}$ достигает максимальных значений.

Анализ рис. 3 и 4 показывает, что фазовому переходу СОА соответствует участок 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 спутниковыми средствами. Следовательно, слежение за метеорологической обстановкой и синхронный расчет индикатора неустойчивости с его сопоставлением со структурой кластерного пространства позволяет обнаружить момент фазового перехода СОА от фонового состояния к возникновению тропического урагана. Для полной формализации этой процедуры необходимо проведение модельных расчетов для набора ситуаций возникновения тропических ураганов различной мощности с построением соответствующей решающей процедуры. В данной работе на двух примерах показана возможность решения этой задачи.

Одним из возможных подходов к анализу критических состояний СОА 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. Отсюда можно сделать вывод о том, что с помощью ренорм-преобразования можно различать два состояния СОА, но нельзя предсказать переход между ними. Для решения этой задачи необходимо рассчитывать динамику более тонкой структуры перколяционного кластера с применением индикатора I_m .

ВЫВОДЫ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных наблюдений за состоянием СОА в тропическом секторе 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 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 ТАО/TRITON/PIRATA поставляет 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 [9].

Проведенный выше анализ показывает, что одной из актуальных задач является выбор структуры фазового пространства СОА. В самом деле, необходимо провести исследование по выделению наиболее информативных характеристик СОА, учет которых снизит размерность фазового пространства при сохранении достоверности прогноза. Как видно из рис. 5 динамика индикатора I_m и показателей тепловых потоков практически тождественна по форме с запаздыванием примерно в одни сутки. Это запаздывание обнаруживается и при дистанционных исследованиях тепловых потоков в СОА [5].

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 спутниковые измерения являются наиболее оперативными источниками информации, а на спутнике, оборудованном СВЧ-радиометром, регистрируется только яркостная температура, то установление 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.

Литература

1. Бондур В.Г. (2001) Проблемы аэрокосмического мониторинга океана // В сб.: Исследования в области океанологии, физики атмосферы, географии, экологии, водных проблем и геокриологии. - М.: ГЕОС. - С. 87-94.
2. Бондур В.Г. (2004) 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. С. 55-116.
3. Бондур В.Г. (2007) Основы аэрокосмического мониторинга окружающей среды. Курс лекций. М.: Московский государственный университет геодезии и картографии. 546 с.
4. Вальд А. Последовательный анализ. Физматлит, Москва, 1960, 328 с.

5. 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.
6. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. Том 2. Изд-во Мир, Москва, 1990, 400 с.
7. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. Часть 2. Изд-во Мир, Москва, с. 92-137.
8. Кочкарова П.А. Применение перколяционных методов, теории фракталов и дробных производных к исследованию термодинамики и кинетики фазообразования. Диссертация кандидата наук, 2006, Карачаево-Черкесская государственная технологическая академия, Ставрополь, 114 с.
9. Крапивин В.Ф., Кондратьев К.Я. Глобальные изменения окружающей среды: экоинформатика. – СПб: Изд-во СПб гос. ун-та, 2002- 724 с.
10. 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.
11. Солдатов В.Ю. Микроволновая диагностика системы атмосфера-океан// Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2006, № 12. - С. 28-35.
12. Чернявский Г.М. Отечественные технологии спутниковой СВЧ-радиометрии // Аэрокосмический курьер, 2007, №6, с.57-59.
13. Cherny I.V., Raizer V.Yu. Passive Microwave Remote Sensing of Oceans. Wiley UK. - 1998. - 300pp.
14. 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. - Pp. 1103-1115.
15. Esaam J.W. Percolation theory. Rep. Prog. Phys., 1980, vol. 43, No.7, pp. 833-912.
16. Mellor G. and Blumberg A. Wave breaking and ocean surface layer thermal response. Journal of Physical Oceanography, 2004, vol. 34, pp. 693-698.
17. 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, 3003, vol. 5, pp. 327-336.
18. 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, pp. 2787-2798.

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

Метеорологический параметр	Обозначение в модели	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 градусах по часовой стрелке от северного направления)	x_2, x_3	Параметры ветра измеряются на высоте 3,5 м. Скорость ветра измеряется с точностью 3%. 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 солёности.
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 $\pm 0,2^\circ\text{C}$.
Солёность морской воды, ‰	x_{11}	Солёность рассчитывается по данным измерений температуры воды и проводимости. Точность $\pm 0,02$ ‰.

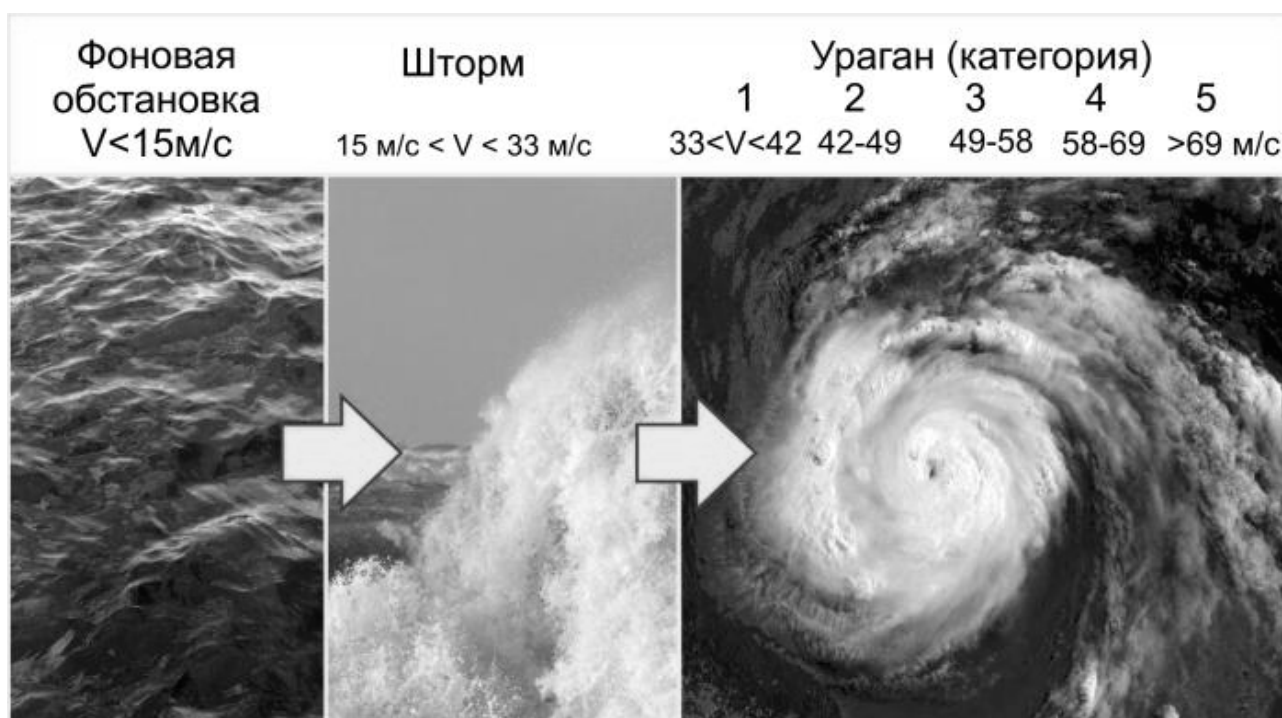


Рис. 1 Основные фазовые переходы в системе «океан-атмосфера».

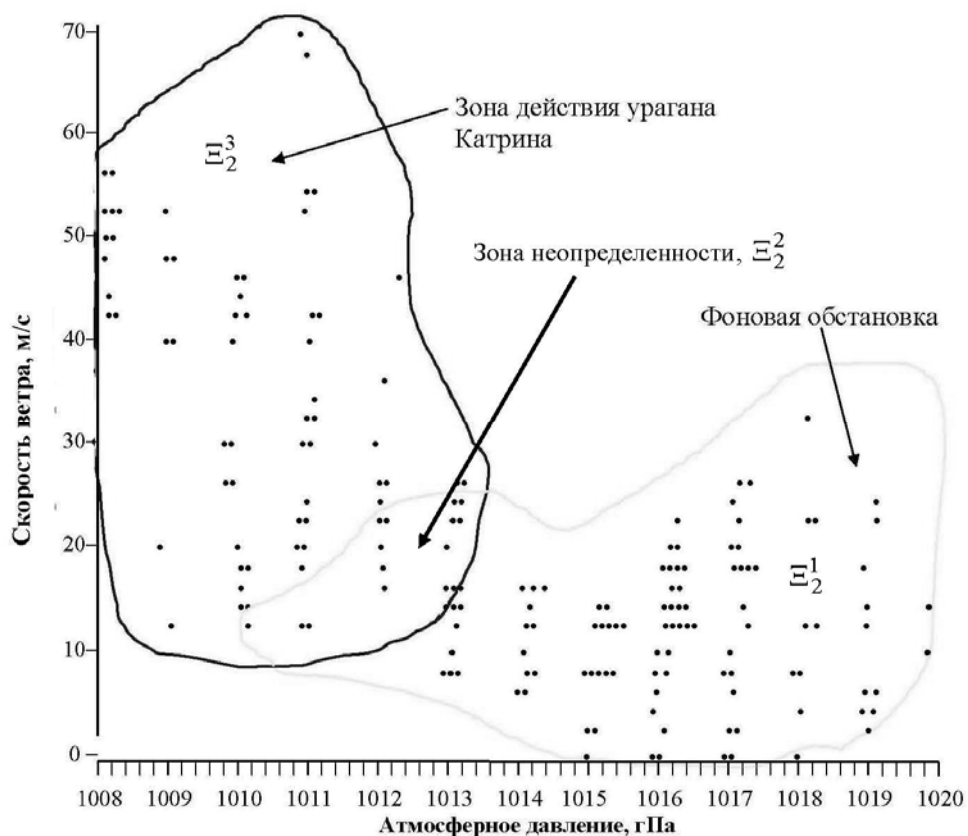


Рис. 2. Фазовый портрет перколяционного перехода метеорологической обстановки до и после возникновения урагана Катрина по данным метеостанции SPGF1 на Багамских островах, август 2005 г. Ураган был зафиксирован 23 августа и действовал до 31 августа 2005 г. Максимальная скорость ветра достигала $x_2 = 280$ км/ч, минимальное атмосферное давление было на уровне $x_9 = 902$ миллибар (26.6 рт.ст.).

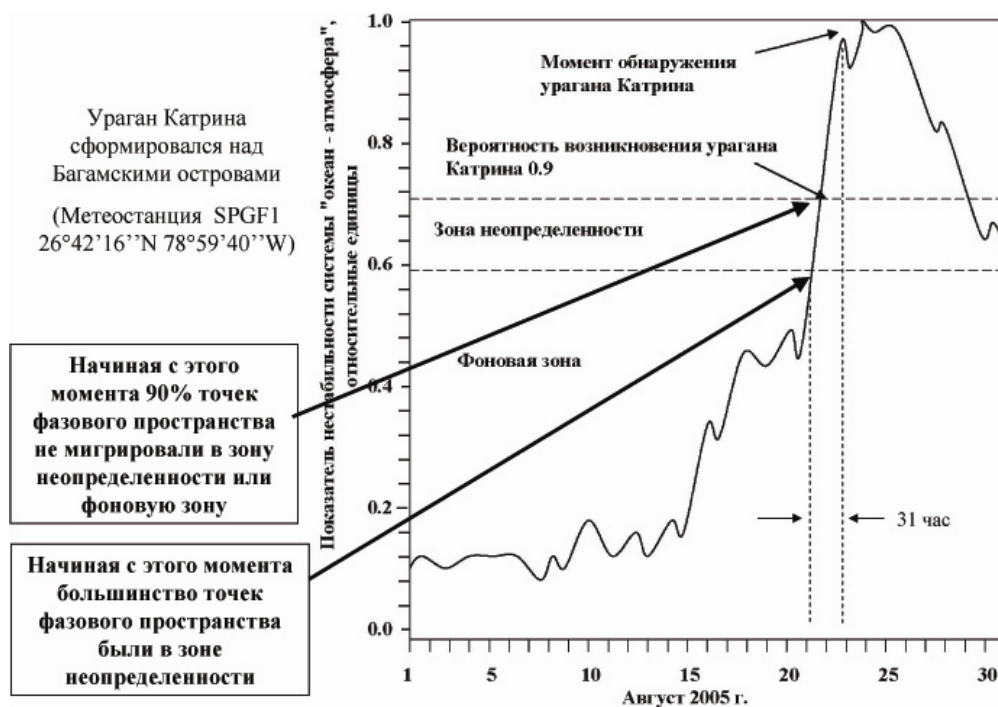


Рис. 3 Динамика индикатора неустойчивости системы "океан-атмосфера", рассчитанного по измерениям TAO/TRITON и спутника Aqua (x_1 - скорость ветра; x_2 - давление; x_3 - влажность атмосферы; x_4 - температура атмосферы)

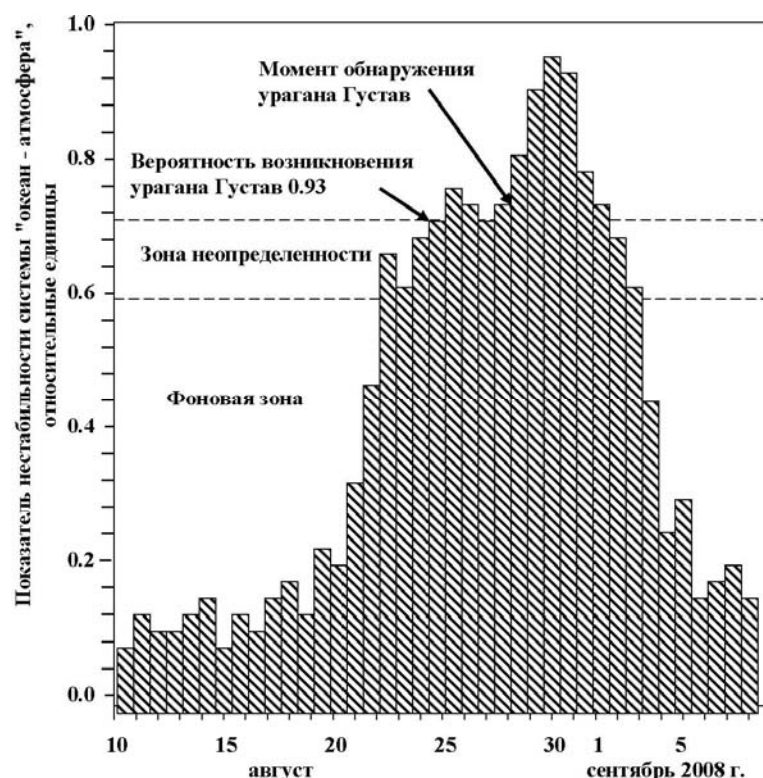


Рис.4. Динамика индикатора неустойчивости системы "океан-атмосфера" в период зарождения и прохождения тропического урагана Густав, рассчитанного по измерениям метеорологической станции Port Au Prince на Гаити. Ураган Густав был впервые обнаружен спутником Landsat в 11 часов 25 августа 2008 г. в 420 км. юго-восточнее островов Гаити как тропическая депрессия, которая перемещалась по Карибскому бассейну со скоростью 25 км/час при ветре 55 км/час. Двигаясь по направлению к Мексиканскому заливу, он во второй половине 30 августа вблизи западного побережья Кубы (21.6N, 82.5W) достиг категории 4 при скорости ветра 247 км/час., а в середине дня 1 сентября, снизив мощность до второй категории, достиг побережья США и затем его мощность уменьшалась до исчезновения к вечеру этого же дня.

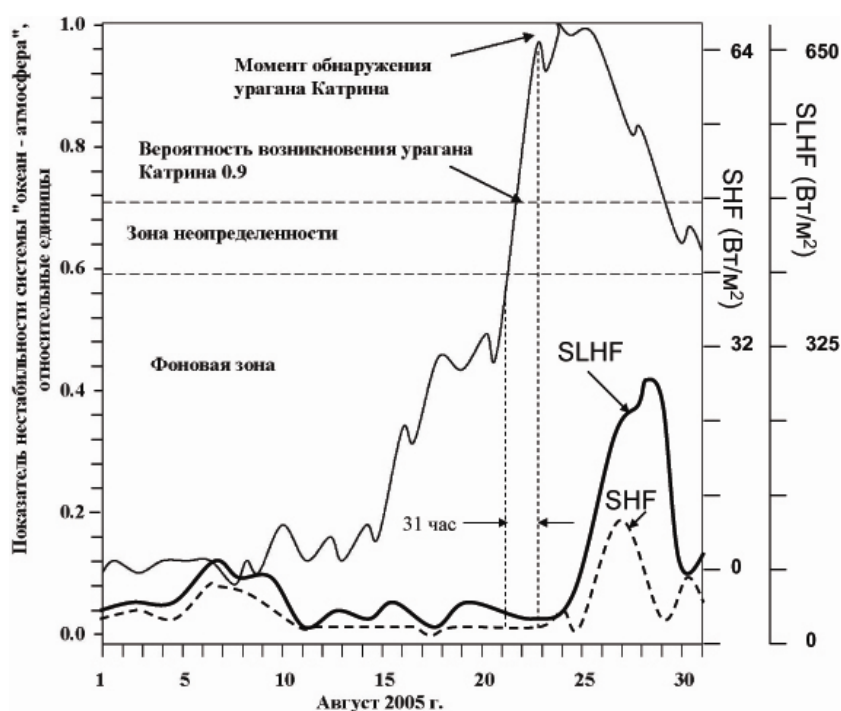


Рис. 5 Сравнительный анализ индикатора неустойчивости и тепловых потоков в динамике СОА в августе 2005 г. Обозначения: SHF (surface heat flux)- поверхностный поток физической (ощутимой) теплоты, SLHF (surface latent heat flux) - поверхностный поток скрытой теплоты