

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

ИНДИКАТОР НЕСТАБИЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ ОКЕАН-АТМОСФЕРА КАК ПРИЗНАК ЗАРОЖДЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена задача обнаружения моментов зарождения тропических циклонов с использованием индикаторов-предвестников. Предложена схема последовательной процедуры регистрации данных о состоянии системы океан-атмосфера и принятия решения о возможном зарождении тропического урагана. Приведены примеры расчета вероятности перехода системы океан-атмосфера из состояния тропического шторма в фазу урагана.

ВВЕДЕНИЕ

Тропические циклоны (ТЦ) являются одним из результатов взаимодействия океана и атмосферы с синоптическим "временем жизни". Изучению условий их формирования и последующего развития посвящены многие научные проекты и программы, однако, до сих пор не решена основная задача раннего обнаружения (ТЦ), когда отсутствуют видимые признаки их зарождения [1]. Но, несмотря на многочисленные усилия ученых [2-13], пока не разработаны эффективные признаки-индикаторы-предвестники зарождения тропических циклонов, по которым можно с высокой вероятностью прогнозировать их зарождение и принимать решение о борьбе в них [14].

Развитые аэрокосмические и наземные системы мониторинга океана и атмосферы в настоящее время поставляют огромное количество данных о динамике окружающей среды в областях, являющихся регулярными источниками (своего рода поставщиками) ТЦ. Среди них можно отметить спутники серии DMSP (радиометр SSM/I, зондировщики температуры SSMT-1 и влажности SSMT-2 атмосферы), Метеор-3 (радиометр МТВ3А), AQUA (радиометр AMSR_E), судовые и буйковые метеорологические станции типа ТАО/TRITON/PIRATA/RAMA [1]. К сожалению, в большинстве случаев эти информационные средства начинают использоваться только тогда, когда ТЦ существенно развились. В этом случае принятие мер по их ослаблению становится бесперспективным и не эффективным.

Поэтому важной целью исследований является создание процедуры поиска в данных мониторинга системы океан-атмосфера (СОА) эффектов или закономерностей, которые бы могли объяснить причины и обстоятельства, при которых формирование урагана становится неизбежным. При этом предполагается поэтапное решение следующих задач:

1. Анализ возможностей существующих геофизических (океанографических, метеорологических, геохимических, биофизических), а также космических средств наблюдений изменений характеристик СОА в зонах активного формирования ТЦ.

2. Поиск индикаторов (предвестников), обеспечивающих наиболее высокую вероятность обнаружения первичных признаков зарождения ТЦ.

3. Разработка моделей, ориентированных на комплексную параметризацию геофизических, биофизических и геохимических процессов, происходящих в тропических областях Мирового океана.

4. Разработка методик спутникового мониторинга акваторий Мирового океана в районах наиболее вероятного зарождения ТЦ с целью их раннего обнаружения.

Некоторые аспекты этих задач рассмотрены в данной работе.

ИНДИКАТОРЫ-ПРЕДВЕСТНИКИ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Тропические циклоны являются четко выделяющимися отдельными перемещающимися в пространстве образования в полях облачности, ветра, приземного давления, осадков, температуры и влажности воздуха. Именно поэтому поиск индикаторов-предвестников ТЦ целесообразно осуществлять в этом пространстве.

Одной из наиболее важных характеристик ТЦ является высокая приземная скорость ветра в циклоническом вихре. Поэтому по скорости максимального приземного ветра ТЦ принято условно разделять на категории [2, 3].

Важным признаком зарождения ТЦ считается также образование облачного кластера с понижающимся давлением, хотя скорость ветра в нем на начальной стадии не превышает 10 м/с. Согласно [4] развивающиеся облачные кластеры достигают интенсивности тропической депрессии в среднем за 3 или 4 суток. При этом, если это образование в состоянии тропической депрессии в течение 1.5-2 суток не перешло в фазу шторма, то оно распадается. Вообще время существования фазовых возмущений СОА, не перешедших в шторм, составляет 1-5 суток [5]. Основной вопрос, возникающий здесь, состоит в том, почему из нескольких сотен тропических возмущений синоптического масштаба, появляющихся в течение года в тропических широтах океанов, не более десятка достигают интенсивности ураганов?

В качестве одного из перспективных подходов к определению момента зарождения ТЦ является введение сезонного потенциала генезиса (СПГ), основанного на учете таких параметров, как: относительная завихренность на нижних уровнях атмосферы, параметр Кориолиса, вертикальный сдвиг ветра, градиент эквивалентно-потенциальной температуры в нижнем слое атмосферы от поверхности до уровня 500 мб, средняя относительная влажность в тропосфере, термический потенциал океана, определяемый превышением температуры воды в верхнем слое океана глубиной 60 м критического значения 26°C. Однако, исследования многих авторов, проведенные в этом направлении показали, что использование СПГ приводит к неоднозначным результатам. В частности, значимость параметров СПГ в различных ситуациях оказывается различной. Так, например, наибольшая неопределенность возникает относительно уровня температуры поверхности океана, необходимой для смены фазы тропического циклона на ТЦ [10].

Анализ многочисленных публикаций, посвященных поиску индикаторов-предвестников ТЦ, показал, что прямое использование различных признаков и параметров СОА для решения этой задачи приводит к весьма неоднозначным результатам. В работе [6] высказана мысль о том, что важной характеристикой смены фаз СОА является её неустойчивость. Эта идея была развита в работе [7] путем введения индикатора I неустойчивости СОА, основанного на анализе эволюции интегрального среднего значения параметров СОА, регистрируемых системой буйковых метеорологических станций ТАО/TRITON/PIRATA/RAMA и наземных метеорологических станций, расположенных в зонах зарождения ТЦ. Перечень параметров СОА, регистрируемых сетью станций этой системы, приведен в таблице 1.

Таблица 1. Перечень параметров СОА, измеряемых станциями сети ТАО/TRITON/PIRATA/RAMA, и использованных при определении моментов зарождения тропических ураганов.

Параметр	Символ	Характеристика параметра
Температура поверхности океана, °C	x_1	Температура измеряется на глубине 1 м или 1,5 м в зависимости от станции с точностью $\pm 0.003^\circ\text{C}$ - $\pm 0.02^\circ\text{C}$.

Скорость ветра (м/с) и его направление (в градусах по часовой стрелке от направления на север)	x_2, x_3	Параметры ветра измеряются на высоте 3,5 м. Скорость ветра измеряется с точностью 3%. Направление ветра измеряется с точностью 5.0°-7.8°.
Осадки (мм/час)	x_4	Осадки регистрируются каждые 10 мин на высоте 3,5 м с точностью ± 0.4 мм/час.
Плотность морской воды (кг/м ³)	x_5	Плотность морской воды автоматически рассчитывается как функция её солёности.
Глубина изотермы 20°C	x_6	Глубина изотермы рассчитывается на основе данных измерений температуры через каждые 20 м путем линейной интерполяции.
Температура воды на фиксированных глубинах $\{h_i\}$, °C	$x_7(h_i)$	Температура воды измеряется до глубины 750 м. На фиксированных горизонтах с точностью ± 0.02 °C.
Относительная влажность атмосферного воздуха, %	x_8	Влажность воздуха измеряется на высоте 2,2 м от уровня океана с точностью ± 2.7 %.
Атмосферное давление, атм.	x_9	Атмосферное давление фиксируется на высоте 3 м с точностью ± 0.01 %.
Температура атмосферы, °C	x_{10}	Температура атмосферы измеряется на высоте 2,2 м над уровнем океана с точностью ± 0.2 °C.
Солёность морской воды, ‰	x_{11}	Солёность оценивается по данным температуры воды и проводимости с точностью ± 0.02 ‰.
Высота волнения, м	x_{12}	Высота волнения рассчитывается как средняя высота волн за 20-минутный период измерения.
Период преобладающей волны, с	x_{13}	Этот период соответствует волне с максимальной энергией.
Период средней волны, с	x_{14}	Этот период определяется усреднением за 20 минут регистрации волнения.
Направление, от которого преобладающая волна начинает движение, градусы	x_{15}	Направление отсчитывается от севера (0°) к востоку (90°).
Температура точки росы, °C	x_{16}	Температура точки росы измеряется на высоте измерения температуры атмосферы.
Зона обзора станции, км	x_{17}	Зона обзора станций может изменяться от 0 до 3 км.

На основе индикатора нестабильности обнаружение момента зарождения урагана «Катрина» можно было бы реализовать с вероятностью 0.9 за 31 час до его развития [1].

Уровень нестабильности СОА рассчитывается с помощью интегрального индикатора:

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

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 нами случае $s=17$, (см. табл. 1); β_i коэффициент значимости i -го параметра;

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

$$\text{где } \Delta x_i = \bar{x}_i - x_i; \quad \bar{x}_i(N) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_i(t_j). \quad (3)$$

Наконец, чтобы окончательно убедиться в сложности и неоднозначности задачи выбора информативного признака зарождения ТЦ укажем на модель, предложенную в работе [8]. В ней установлена взаимосвязь между процессами дегазации Земли и зарождения ТЦ. В этой работе показано, что мощные потоки водорода и метана из недр Земли нагревают океанскую воду над акваторией и зарождающиеся ТЦ резко уменьшают мощность озонового слоя. В результате увеличиваются потоки инфракрасного и ультрафиолетового излучения, которые, достигая поверхности океана, также нагревают его. При этом стратосфера разогревается, а тропосфера выхолаживается, что приводит к созданию условий зарождения ТЦ.

С учетом этого становится ясно, что для решения задачи раннего обнаружения момента зарождения ТЦ необходимо создать процедуру одновременного использования многих индикаторов, обеспечив их оценку на основе данных аэрокосмического мониторинга и ранжирование по значимости в каждый момент времени.

АДАПТИВНАЯ МНОГОКАНАЛЬНАЯ ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА ИНДИКАТОРОВ-ПРЕДВЕСТНИКОВ ТРОПИЧЕСКОГО УРАГАНА ПО АЭРОКОСМИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Пусть имеются m индикаторов-предвестников $\{x_i, i=1, \dots, m\}$ перехода СОА из фазы шторма в фазу урагана. Схематично процедура принятия решения о таком переходе представлена на рис. 1 [1, 9]. Решение может приниматься по каждому индикатору в отдельности или по их некоторой совокупности. При этом для повышения надежности согласно [1, 9] необходимо накопление информации до принятия решения, что снижает вероятность ошибочного решения и повышает вероятность не пропустить момент смены фазового состояния СОА.

Пусть система аэрокосмического мониторинга СОА осуществляет измерения с помощью n сенсоров (радиометров) в различных диапазонах спектра электромагнитных волн, каждый из которых имеет фиксированную длину волны λ_j ($j=1, \dots, n$). В результате в момент времени t_i на выходе каждого сенсора фиксируются величины Z_{ij} ($i=1, \dots, M$), такие, что $Z_{ij} = T_j + \xi_{ij}$, где T_j – яркостная температура участка поверхности океана на длине волны λ_j , а ξ_{ij} – случайная величина (шум) с нулевым средним и дисперсией σ_j^2 .

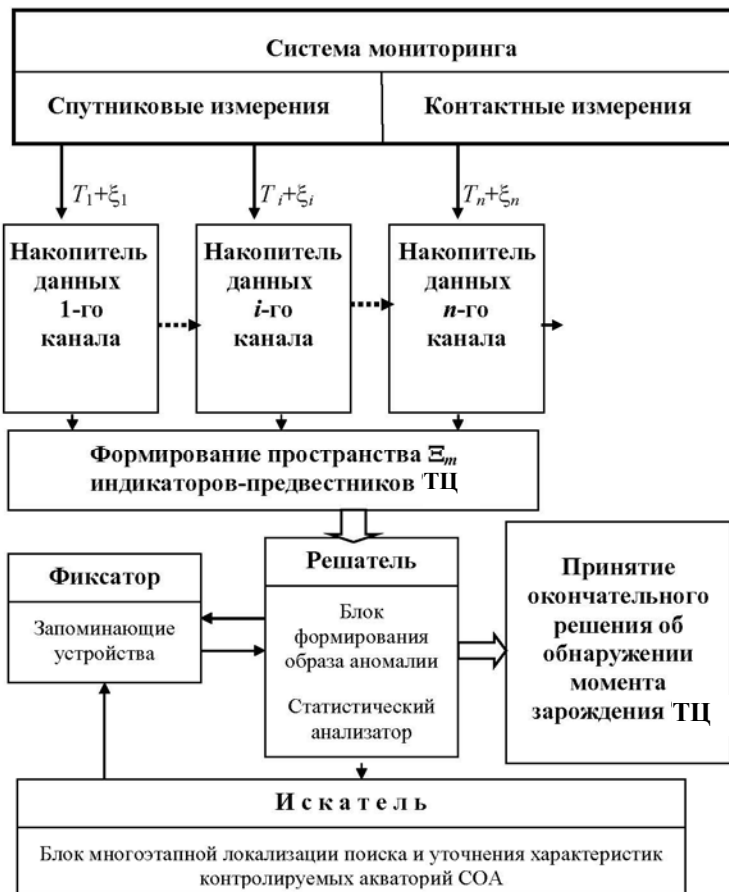


Рис.1. Схема организации системы мониторинга для поиска и обнаружения момента зарождения ТЦ.

Допустим, что связь между яркостной температурой и m индикаторами ТЦ является линейной:

$$\begin{aligned}
 A_{11}x_1 + \dots + A_{1m}x_m &= T_1 + \xi_1 \\
 \dots & \\
 A_{n1}x_1 + \dots + A_{nm}x_m &= T_n + \xi_n
 \end{aligned} \tag{4}$$

где A_{ij} – коэффициенты, определяемые в процессе мониторинга участка поверхности океана с известными параметрами, на основе которых рассчитываются индикаторы $\{x_i\}$.

Решение системы (4) x_i^* находится из условия, чтобы его дисперсия была минимальна, т.е.

$$D[x_i^*] \leq D[\tilde{x}_i],$$

где \tilde{x}_i - оценка индикатора x_i , полученная любым другим способом.

Оценка x_i^* называется σ - решением системы линейных уравнений (4) с возмущенной правой частью [3]. В результате все индикаторы ранжируются и принимающий решение получает возможность выбора наиболее информативных признаков фазового перехода в СОА.

Процедура поиска σ -решения системы (4) состоит в следующем. Предполагается, что $\Xi = \{\xi_1, \dots, \xi_n\}$ имеет нулевое среднее и дисперсию $\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2\}$. Умножим i -ое уравнение системы (4) последовательно на величины c_{1i}, \dots, c_{mi} ($i=1, \dots, m$) и потребуем выполнения условия:

$$\sum_{i=1}^n c_{ji} A_{il} = \begin{cases} 1 & \text{при } j = l; \\ 0 & \text{при } j \neq l \end{cases} \quad (l, j = 1, \dots, m) \quad (5)$$

При выполнении условий (5) находим

$$x_1^0 = \sum_{i=1}^n c_{1i} T_i \quad (6)$$

Аналогичные соотношения записываются для x_j^0 ($j = 2, \dots, m$). Заменяя T на Z в (3), т.е. переходя к системе (4), получим:

$$\tilde{x}_1 = \sum_{i=1}^n c_{1i} (T_i + \xi_i) \quad (7)$$

Из (7) вычисляем дисперсию:

$$D[\tilde{x}_1] = \sum_{i=1}^n c_{1i}^2 \sigma_i^2 \quad (8)$$

Так как средние значения \tilde{x}_1 и x_1^0 совпадают по определению, то для решения поставленной задачи необходимо при соблюдении условий (5) найти минимум (8). Для этого применим метод неопределенных множителей Лагранжа. Составим вспомогательное выражение:

$$\varphi(c_{11}, \dots, c_{1k}) = \sum_{i=1}^n c_{1i}^2 \sigma_i^2 + \mu_1 \left(\sum_{i=1}^n c_{1i} A_{i1} - 1 \right) + \sum_{j=2}^m \mu_j \sum_{i=1}^n c_{1i} A_{ij} \quad (9)$$

Приравнявая первые производные функции (6) к нулю получим:

$$2c_{1k} \sigma_k^2 + \sum_{j=1}^m \mu_j A_{kj} = 0, \quad (k = 1, \dots, n) \quad (10)$$

Соотношения (7) и условия (2) составляют систему $(m+n)$ уравнений, решение которых позволяет определить искомые оптимальные величины c_{ij}^* . Анализ показывает, что $D[x_j] = -\mu_j/2$. Величины μ_j находим из системы уравнений:

$$\sum_{j=1}^m \mu_j \sum_{i=1}^n \frac{A_{ij} A_{i1}}{\sigma_i^2} = -2; \quad \sum_{j=1}^m \mu_j \sum_{i=1}^n \frac{A_{ij} A_{il}}{\sigma_i^2} = 0; \quad l=2, \dots, m. \quad (11)$$

Численные оценки показывают, что σ - решение является предпочтительнее решения, полученного по критерию среднего квадратического отклонения.

Рассмотрим случай $m=2$ и $n=3$, где x_1 и x_2 берутся из табл.1. Из (10) имеем

$$c_{1k}^* = \frac{1}{\Delta \sigma_k^2} \left(A_{k1} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i2}^2}{\sigma_i^2} - A_{k2} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1} A_{i2}}{\sigma_i^2} \right); \quad k = 1, \dots, n;$$

$$c_{2k}^* = \frac{1}{\Delta \sigma_k^2} \left(A_{k2} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1}^2}{\sigma_i^2} - A_{k1} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1} A_{i2}}{\sigma_i^2} \right); \quad k = 1, \dots, n; \quad (12)$$

где

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1}^2}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i2}^2}{\sigma_i^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{A_{i1} A_{i2}}{\sigma_i^2} \right)^2$$

Оптимальная оценка для x_j^* определится соотношением

$$x_j^* = \sum_{i=1}^n c_{ji}^* Z_i \quad (j=1,2) \quad (13)$$

Дисперсия оценки x_j^* имеет значение

$$D[x_1^*] = \Delta^{-1} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i2}^2}{\sigma_i^2}; \quad D[x_2^*] = \Delta^{-1} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1}^2}{\sigma_i^2} \quad (14)$$

Ясно, что принятие решения о возможности фазового перехода в СОА по одному измерению набора индикаторов с учетом нестабильности будет иметь высокую вероятность ошибки первого рода. Поэтому в [1, 9] была предложена структурная схема мониторинговой системы, позволяющая за счет накопления информации во времени и многоэтапной локализации процедуры поиска аномалий в окружающей среде снижать эту ошибку. В рассматриваемом случае эта схема представлена на рис. 1.

Общая функциональная схема системы мониторинга представляется в виде совокупности трех подсистем: фиксатора, решателя и искателя [1, 9]. Фиксатор регистрирует данные от сенсоров, решает систему уравнений (1) и запоминает «подозрительные» элементы, фиксируя координаты и значения индикаторов. Решатель анализирует поступающие данные от фиксатора и выносит решение о сигнальном (аномальном) или шумовом (фоновом) характере этих элементов. Искатель, подчиняясь командам решателя, локализует аномалию и начинает координировать функции искателя и решателя по уточнению данных об обнаруженной аномалии.

Состояние аномальности СОА задается критерием, определяемым для каждого индикатора или их совокупности. В частности, одним из решений здесь может быть разграничение пространства индикаторов на кластеры и использование ренорм-преобразования [7].

Рассмотрим пространство индикаторов $\Xi_m = \{\Xi_{i_1, \dots, i_m}\}$ размерности n , разделенное на пиксели со стороной h . Поток данных, поступающих от системы мониторинга, характеризуется поступлением вектора $\bar{x} = \{x_i; i=1, \dots, n\}$ с определенным интервалом времени. Выберем ограниченный интервал времени мониторинга T , характеризуемый набором последовательных моментов $\{t_j; j=1, \dots, N\}$ поступления данных о состоянии выбранного сектора СОА.

С течением времени будем закрашивать ячейки Ξ_{i_1, \dots, i_m} , в которые попадает точка $\{\xi_1(t_j), \dots, \xi_d(t_j)\}$, где $\xi_i(t_j)$ - измеренная величина i -го индикатора в момент времени $t_j \in T$. Следуя теории перколяции [11], будем формировать кластеры, объединяя смежные контактирующие окрашенные ячейки в единую цепочку и оценивая долю крашенных ячеек 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 аномалия. В рассматриваемом здесь случае приближение характерных параметров СОА к критическим значениям будет соответствовать приближению момента зарождения тропического циклона.

Средний размер кластера S (число закрашенных ячеек) и корреляционная длина ξ (линейный размер кластера) хорошо аппроксимируются соотношениями:

$$S(\lambda) \approx |\lambda - \lambda^*|^{-\gamma}, \quad \xi(\lambda) \approx |\lambda - \lambda^*|^{-\nu}, \quad (15)$$

где параметры γ и ν зависят от размерности пространства m и в конкретном случае определяются эмпирически.

Функции S и ξ при приближении момента зарождения тропического урагана начинают резко возрастать.

Рис. 2 иллюстрирует процедуру использования ренорм-преобразования в случае $m=2$ и $T=7$ часов для периода зарождения и прохождения тропического циклона Катрина в 2005 г. При этом использованы два индикатора-предвестника: x_1 – скорость ветра и x_2 – атмосферное давление. Видно, что фазовый переход от фонового уровня к шторму реализовался при $\lambda^*=0.203$, а переход к фазе урагана произошел при $\lambda^*=0.377$.

Поскольку поток данных от системы мониторинга СОА поступает регулярно с частотой Δt (например, от системы ТАО/TRITON/PIRATA/RAMA и наземных метеорологических станций через 30 мин.-1 час, со спутников через часы и сутки), то расчет вероятности перколяционного перехода СОА зависит от этого режима. Фактически происходит случайное блуждание точки $x=\{x_1, \dots, x_m\}$ в фазовом пространстве Ξ_m , а перколяционные переходы соответствуют перемещению этой точки между кластерами.

Для каждого индикатора-предвестника в случае двух фазовых состояний ($\Xi_m = \Xi_1 \cup \Xi_2$) это блуждание эквивалентно смещению проекции точки x на некоторое направление η между кластерами. Отклонение этой проекции от начальной точки отсчета A , выбранной, например, так, чтобы ее координаты были минимальными, представляет собой сумму Σ_ν случайного числа случайных слагаемых.

Распределение нормированных моментов $\tau = \nu / E\nu$ первого перехода точки x , например, из Ξ_1 в Ξ_2 описывается функцией распределения Вальда [12]:

$$P(\tau < y) = W_c(y) = \int_0^y w_c(z) dz, \quad (16)$$

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 $c = (E\nu)^2 (D\nu)^{-1}$, $E\nu$ - среднее значение времени блуждания точки x до ее входа в зону Ξ_2 , $D\nu$ - дисперсия параметра ν .

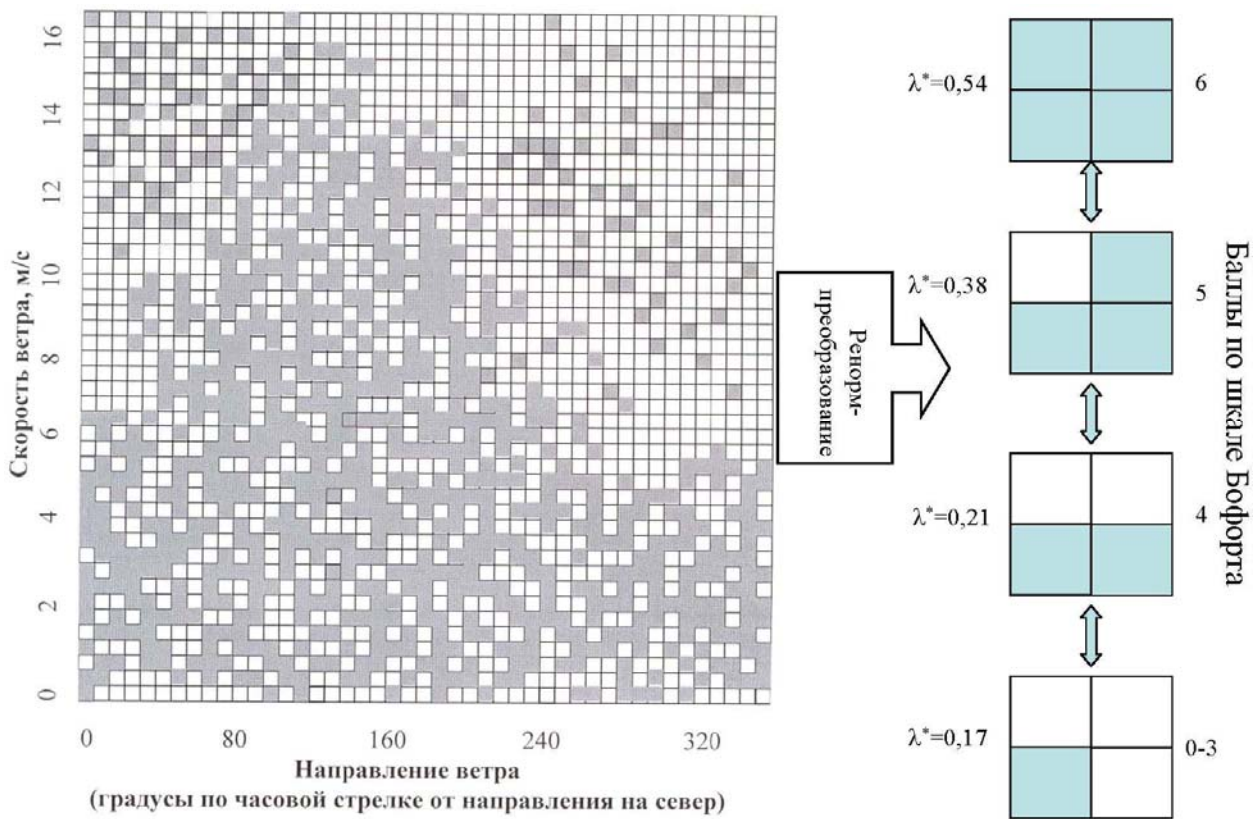


Рис.2. Фазовый портрет перколяционного перехода метеорологической обстановки до и после возникновения урагана Dolly по данным метеостанций 42057 (16°50'2''N, 81°30'2''W) и 42056 (19°52'27''N, 85°3'33''W), июль 2008 г. Ураган был зафиксирован 20 июля восточнее побережья Гондураса и действовал до 24 июля 2008 г. Максимальная скорость ветра достигала $x_2 = 170$ км/ч, минимальное атмосферное давление было на уровне $x_9 = 902$ миллибар (676.6 мм рт.ст.)

После большого числа шагов t блуждания точки x при отсутствии критических переходов среднее число N_t закрашенных пикселей пространства Ξ_m будет равно $N_t = t^{\theta/2}$, где параметр $\theta \in [1.29-2.84]$ оценивается в каждом конкретном случае по результатам моделирования.

На рис. 3 приведен пример расчета вероятности перехода СОА между фазами при использовании индикатора неустойчивости I в случае ТЦ Flossie, который сформировался в западном секторе Тихого океана и достиг Гавайских островов 15 августа 2007 г. Видно, что все фазовые изменения можно было предсказать с вероятностью более 0.7.

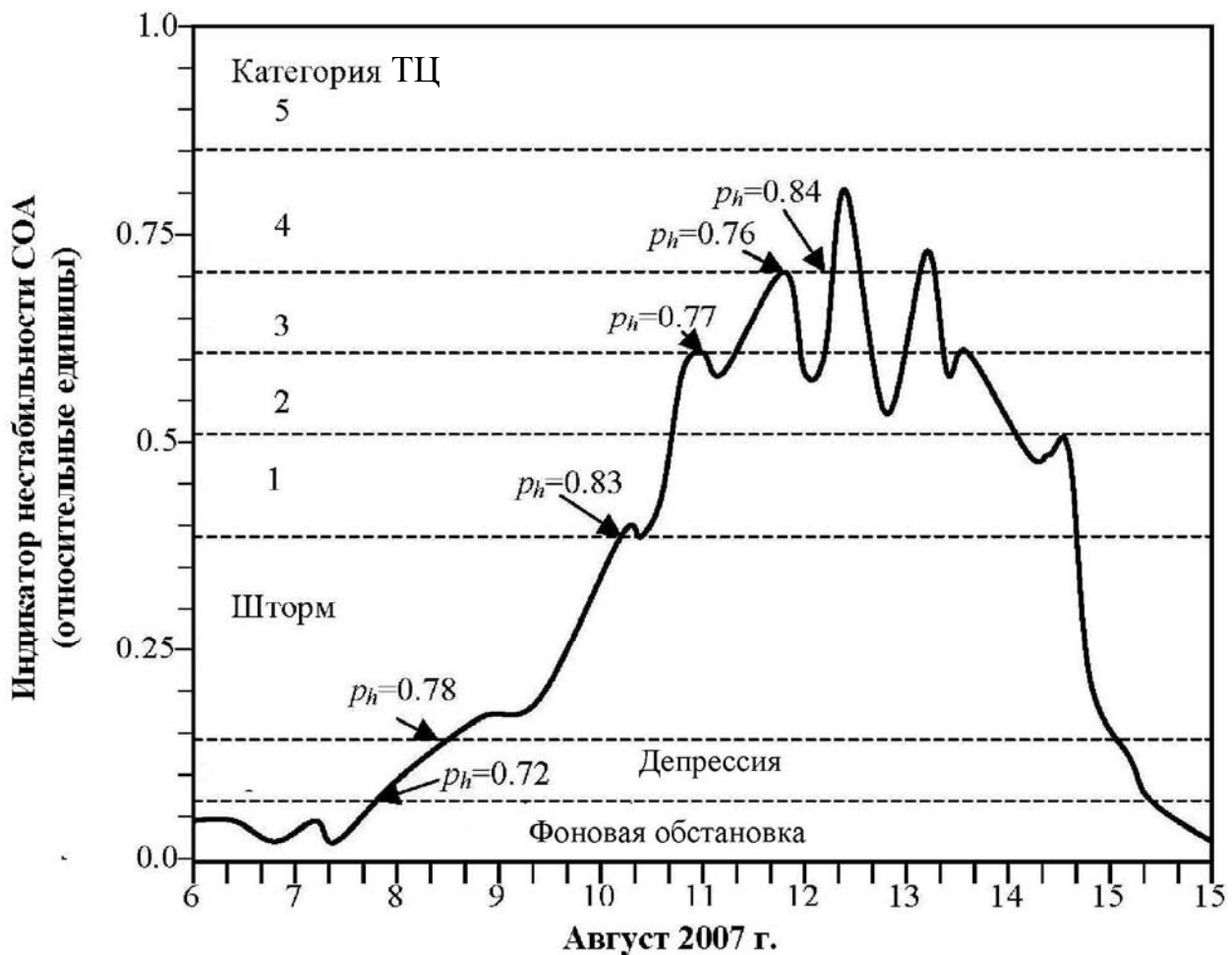


Рис. 3. Динамика состояния СОА по индикатору I для случая ТУ Flossie. Для расчета индикатора использованы данные метеорологической станции No. 51003 (19°22'N, 160°82'). Обозначение: p_h - вероятность фазового перехода, рассчитанная по методу последовательного анализа Вальда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние годы в проблеме аэрокосмического мониторинга Земли сформировалось новое направление, связанное с оперативным исследованием параметров СОА по отношению к первичным временным фазам эволюции ТЦ [13]. При этом в первую очередь стоит вопрос о прогнозировании возникновения первичных форм тропического возмущения с последующим его переходом в развитую форму тропического урагана. В связи с этим возникает проблема детальности дистанционного мониторинга структурных, динамических и термодинамических особенностей тропического возмущения непосредственно в момент образования зрелой формы ТЦ.

Описанная в данной работе процедура непрерывного последовательного мониторинга СОА требует дальнейшего совершенствования, в том числе за счет уточнения набора индикаторов-предвестников ТЦ и разработки строгого математического аппарата для прогнозирования фазовых переходов от фона к пятой категории урагана с расчетом соответствующих вероятностных характеристик.

Рассмотренные в настоящей работе схемы обработки данных мониторинга и примеры прогнозирования моментов зарождения ТЦ показывают перспективность предложенного подхода. Но предложенные схемы требуют оптимизации, как по структуре сбора данных, так и по составу измеряемых параметров СОА. Возникающие здесь задачи требуют дальнейшего рассмотрения множества индикаторов-предвестников и выбора алгоритмов их согласованного применения.

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, °С;
- 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°С, м;
- x_7 - температура воды на глубине h_i , °С
- 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, °С;
- x_{11} - соленость морской воды, ‰;
- x_{12} - высота волнения океанской поверхности, м;
- x_{13} - период преобладающей волны, с;
- x_{14} - период средней волны, с;
- x_{15} - направление, от которого преобладающая волна начинает движение, градусы;
- x_{16} - температура точки росы, °С;
- x_{17} - зона обзора метеорологической станции, км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. // М.: Научный мир. 2009. 692 с.
2. Хаин А. И. Влияние влажности воздуха и начального вихря на зарождение и развитие тропических циклонов. // Метеорология и гидрология. 1983. № 12. С. 62-68.
3. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Varotsos C.A. Natural Disasters as Interactive Components of Global Ecodynamics. Chichester, UK: Springer/Praxis. 2006. 578 p.
4. McBride J.L. Observation analysis of tropical cyclone formation. Part 1 Basic description of data sets // J. Atmos. Sci. 1981. Vol.38. № 6. P. 1117—1131.
5. Dunnavan G.M., Diericks J.W. An analysis of super typhoon Tip (October, 1979) // Mon. Wea.Rev. 1980. Vol.108. №11. P.1915-1923.
6. Montgomery M.T., Farrell B.F. Tropical Cyclone Formation // J. Atmos. Sci. 1993. Vol.50. № 2. P.285-310.
7. Солдатов В.Ю. Диагностика системы океан-атмосфера с помощью перколяционной модели. // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2007. №5. С. 52-64.
8. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: ООО "Геоинформцентр". 2002. 250 с.
9. 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.
10. Camargo S.J., Emanuel K., and Sobel A.H. Use of a genesis potential index to diagnose ENSO effects on tropical cyclone genesis.// Journal of Climate, American Meteorological Society. 2007. vol. 20. P. 4819-4834.
11. Stauffer D. and Aharony A.. Introduction to percolation theory. Plenum Press. New York. 1994. 215 pp.
12. Wald A. Sequential Analysis. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1947. 212 p.
13. Шарков Е.А. Аэрокосмические исследования тропических циклонов.// Исследование Земли из космоса. 1997. №6. С. 87-111.

14. LaRosa R. Hurricane suppression by sea surface cooling. Systems, Applications and Technology Conference. 2006. LISAT 2006. IEEE Long Island. P. 1-5.