

## **Динамика регионального циклогенеза с короткопериодными вариациями ветра в тропических циклонах**

**Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова, С.Н. Артеха, А.А. Лазарев**

*Институт космических исследований РАН, Москва 117997, Россия  
E-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru*

Проведён анализ временной динамики максимальной скорости ветра в тропическом циклоне (ТЦ) и температуры поверхности океана в зоне ТЦ для регионального крупномасштабного циклогенеза (РКЦ) на основе численных расчётов в рамках нелинейной малопараметрической модели (МПМ). Влияние внешних факторов (типа солнечно-земных связей, явления Эль-Ниньо и др.) в принципе может быть учтено введением некоторых аддитивных или мультипликативных функций, каждая из которых связана со своим рассматриваемым явлением, или же введением единой обобщённой функциональной зависимости. Подобные зависимости могут быть определены, например, по статистическим наблюдениям РКЦ в каждом конкретном регионе для каждого конкретного времени года. Выбором свободных параметров задачи рассмотрены варианты временной динамики РКЦ при реализации короткопериодных вариаций скорости ветра в ТЦ (с характерными временами вариаций меньше суток). Из проведённых численных расчётов следует, что сравнительно малые изменения фоновой обстановки могут инициировать значительные вариации скорости ветра в ТЦ при генерации нескольких тайфунов в активном сезоне региона, причём характеристики формирующихся ТЦ (скорость ветра, длительность жизненного цикла и др.) могут существенно различаться. Из выполненного анализа следует возможность описания РКЦ конкретного региона на основе нелинейной малопараметрической модели, которая будет соответствовать данным наблюдений.

**Ключевые слова:** тропические циклоны, региональный циклогенез, малопараметрическая модель, вариации скорости ветра, температура поверхности океана.

### **Введение**

Одной из важных задач в современных исследованиях кризисных явлений в атмосфере является вопрос о прогнозе пространственно-временной динамики мощных крупномасштабных вихрей типа тропических ураганов, тайфунов и внетропических циклонов с учётом влияния солнечной радиации, солнечно-земных связей и других факторов.

Для описания временной динамики тропического циклона ранее была предложена малопараметрическая нелинейная модель (МПМ) вихря в виде системы уравнений для максимальной скорости ветра и температуры поверхности океана в зоне тайфуна. Данная модель достаточно реалистично описывает формирование крупномасштабного вихря из слабой тропической депрессии (ТД), его интенсификацию до уровня тайфуна и квазистационарную фазу (Ярошевич, Ингель, 2004). Позднее были предложены обобщения МПМ, позволяющие изучать полный жизненный цикл тропических циклонов (ТЦ), включая стадию затухания вихря либо при его выходе на сушу, либо вследствие смещения в область более холодной воды (Ерохин, Михайловская, 2007), а также исследовать возможность одновременного существования в заданном регионе двух ТЦ и их конкуренции (Ярошевич, Ингель, 2006). Дальнейшее развитие МПМ (Ерохин и др., 2008) было связано с учётом нестационарности фоновой обстановки, например, температуры поверхности океана,

исследования возможности описания многократной генерации ТЦ в заданном регионе во время активного сезона путём введения эффективных источников атмосферных возмущений, например, обусловленных солнечно-земными связями, вариациями потока солнечной радиации, космических лучей и др. В этой обобщённой модели после формирования крупномасштабного мощного вихря (вследствие развития неустойчивости атмосферы) и последующего затухания ТЦ (по истечении некоторого времени) происходит подготовка системы океан-атмосфера к повторной генерации тайфуна по достижении её параметрами пороговых (для запуска неустойчивости) значений. Обобщённая нелинейная модель содержит ряд параметров, которые могут зависеть от времени, и их выбором можно в значительной степени управлять временной динамикой регионального циклогенеза, например, менять количество образующихся в заданном регионе ТЦ в период активного сезона, их характеристики, включая максимальную скорость ветра, продолжительность жизненного цикла каждого ТЦ, длительности стадии интенсификации вихрей до уровня тайфуна и последующего их затухания.

Таким образом вполне очевидно, что развиваемый на основе МПМ подход с учётом данных наблюдений по параметрам крупномасштабных возмущений типа ТЦ позволяет получить достаточно простую модель описания сезонного хода РКЦ в каждом регионе. Это представляет большой научный и практический интерес, например, для разработки современных методик прогноза кризисных атмосферных явлений, их длительности и интенсивности, исследования их связей с другими крупномасштабными процессами. Это важно и для анализа влияния ТЦ, например, на крупномасштабную циркуляцию атмосферы и пр.

В настоящей статье на основе обобщённых уравнений малопараметрической нелинейной модели изложены результаты численных расчётов временной динамики максимальной скорости ветра в ТЦ и температуры поверхности океана в зоне ТЦ с учётом нестационарности фоновой обстановки. Для этого в уравнения МПМ введена функция с малым параметром, определяющим амплитуду вариаций скорости ветра. Кроме того можно также менять начало и конец активного сезона, число возникающих тайфунов и штормов в этот период, их характеристики. Принципиально то, что проведённый численный анализ решений МПМ выявил заметную чувствительность сценария динамики регионального циклогенеза к изменению величин исходных параметров. Следовательно, развиваемый подход к исследованию РКЦ позволяет оптимизировать выбор параметров модели для заданного годового интервала, чтобы описать число образовавшихся ТЦ, времена их существования, максимальные скорости ветров и другие характеристики, которые должны соответствовать параметрам ТЦ в имеющихся базах данных наблюдений (см., например, данные в монографии (Покровская, Шарков, 2001)).

## Уравнения МПМ и численный анализ их решений

Для описания сезонного хода РКЦ с учётом нестационарности фоновой обстановки и внешних воздействий, воспользуемся следующими уравнениями (Ерохин, Зольникова, Михайловская, 2008; Михайловская, Ерохин и др., 2009):

$$\begin{aligned} dV / dt &= \gamma \cdot (T - T_c) \cdot V - \mu \cdot V^2 + y(t), \\ dT / dt &= -b \cdot (T - T_1) \cdot V^2 + (T_f - T) / \tau, \\ dT_f / dt &= f(t) - \nu \cdot (T_f - T_0). \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) скорость  $V(t)$  измеряется в м/с, температура  $T(t)$  в  $^{\circ}\text{C}$ , время  $t$  в сутках. Напомним, что интенсификация слабых синоптических возмущений начинается при температурах поверхности океана  $T(t)$  выше порогового значения  $T_c$ . В соответствие с рекомендациями работы (Ярошевич, Ингель, 2004) ниже будем полагать  $T_c = 26,5^{\circ}\text{C}$ , а для температуры холодной воды, поднимающейся к поверхности океана, берём значение  $T_1 = 23^{\circ}\text{C}$ . Необходимо однако отметить, что значение  $T_c$ , вообще говоря, зависит от региона (Шарков, Покровская, 2009).

В уравнениях (1) источник  $f(t)$  описывает влияние внешних факторов на температуру поверхности океана, а функция  $y(t)$  - возникновение слабого ветра (при отсутствии тайфуна) под действием малого внешнего возмущения. В качестве внешних факторов могут выступать вариации солнечной активности, характеризуемые, например, числами Вольфа, явление Эль-Ниньо и др.

Чтобы учесть изменение фоновых условий в (1) для переменной температуры  $T_f$  при расчётах динамики одного ТЦ использовалась функция

$$\begin{aligned} T_f(t) &= T_0 + \delta T_f(t), \text{ где} \\ \delta T_f(t) &= \delta T_1 [1 + \text{th } s_1(t)] - \delta T_2 [1 + \text{th } s_2(t)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь введены обозначения  $s_1(t) = (t - t_1) / \tau_1$ ,  $s_2(t) = (t - t_2) / \tau_2$ , а  $\tau_1$  и  $\tau_2$  - характерные времена изменения температуры  $\delta T_f(t)$ , причём полагается  $t_1 < t_2$ .

Отметим, что в зоне зарождения тайфуна температура  $T_f(t)$  вначале возрастает на величину  $2\delta T_1$  и при превышении порогового значения начинается крупномасштабная неустойчивость с генерацией ТЦ. В конце жизненного цикла ТЦ она уменьшается на  $2\delta T_2$  (смещение тайфуна в область более холодной воды), что ведёт к затуханию ТЦ.

В случае описания временной динамики нескольких тайфунов формула для функции  $\delta T_f(t)$  должна содержать сумму слагаемых типа указанных в выражении (2) с параметрами  $\delta T_{n1}$ ,  $\delta T_{n2}$ ,  $\tau_{n1}$ ,  $\tau_{n2}$ ,  $t_{n1}$ ,  $t_{n2}$  для  $n$ -го тайфуна. Здесь следует указать, что представление (2) для функции  $\delta T_f(t)$  является не единственным.

Рассмотрим процесс генерации в активном сезоне РКЦ  $6 < t < 90$  трёх ТЦ в простейшем случае  $y(t) = 0$ ,  $f(t) = 0$ ,  $\nu = 0$ . Для описания динамики циклогенеза в формуле (2) для  $\delta T_f(t)$  используем представление

$$\delta T_f(t) = G(t) \cdot \sum_n \{ \delta T_{n1} [1 + \text{th} s_{n1}(t)] - \delta T_{n2} [1 + \text{th} s_{n2}(t)] \}, \quad (3)$$

$$G(t) = 1 + \sigma \cdot \sin(2\pi t / 4,2), \quad n = 1, 2, 3.$$

Здесь период фоновых вариаций  $\delta T_f(t)$  составляет 4,2 суток. Ниже будут приведены графики скорости ветра и температуры поверхности океана для следующего варианта выбора параметров в (3) при численных расчётах решения системы уравнений (1):

$$\gamma = 1, \quad \mu = 3 \cdot 10^{-3}, \quad b = 9 \cdot 10^{-4}, \quad \tau = 1, \quad T_c = 26, \quad T_1 = 23, \quad V(0) = 0,3, \quad T(0) = 26,$$

$$\delta T_{11} = 1, \quad \delta T_{12} = 1,4, \quad \delta T_{21} = 1,8, \quad \delta T_{22} = 1,8, \quad \delta T_{31} = 2,6, \quad \delta T_{32} = 2,6, \quad (4)$$

$$\tau_{n1} = \tau_{n2} = 1, \quad t_{11} = 4, \quad t_{12} = 20, \quad t_{21} = 27, \quad t_{22} = 47, \quad t_{31} = 64, \quad t_{32} = 85.$$

Для параметра  $\sigma$ , определяющего амплитуду вариаций скорости ветра в ТЦ, примем значение  $\sigma = 0,07$ . На *рис. 1* дан график скорости ветра в тайфунах  $V(t)$ .

Согласно *рис. 1*, для выбранного значения параметра  $\sigma$  вариации величины скорости ветра наблюдаются на квазистационарной стадии тайфунов и порядка 47,4 м/с (амплитуда вариаций порядка 24 м/с), т.е. велики. Длительность жизненного цикла первого ТЦ 16 суток. Длительность жизненного цикла второго и третьего ТЦ 20 суток. Для них наблюдаются 5 вариаций  $V(t)$ . Отметим, что в среднем для первого ТЦ скорость ветра близка к 40 м/с, а для третьего она около величины 64,7 м/с. В промежутке времени между ТЦ вариации  $V(t)$  не видны. Динамика температуры поверхности океана  $T$  в зоне ТЦ показана на *рис. 2*. Видно, что на квазистационарной стадии ТЦ вариации  $T$  порядка  $1^\circ\text{C}$ , но имеется сильный всплеск  $\delta T$  порядка  $3^\circ\text{C}$  для третьего тайфуна на стадии его формирования. Между ТЦ в отличие от скорости  $V(t)$  вариации температуры  $T(t)$  не малы - порядка  $3^\circ\text{C}$ .

Графики фоновой температуры  $T_f(t)$  при  $\sigma = 0,07$  (кривая 1) и для  $\sigma = 0$  (кривая 2) представлены на *рис. 3*. Амплитуда быстрых вариаций  $\delta T_f(t)$  при  $\sigma = 0,07$  порядка  $2,05^\circ\text{C}$ . При уменьшении параметра  $\sigma$  эти вариации также ослабевают по амплитуде.

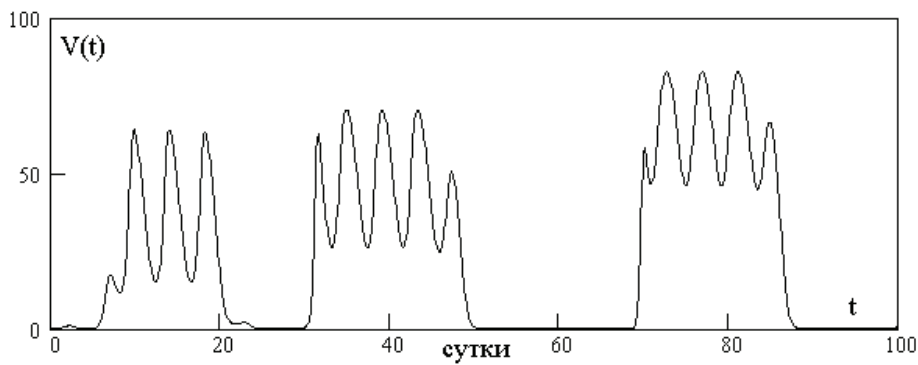


Рис. 1. Вариации скорости ветра в серии из трёх тайфунов

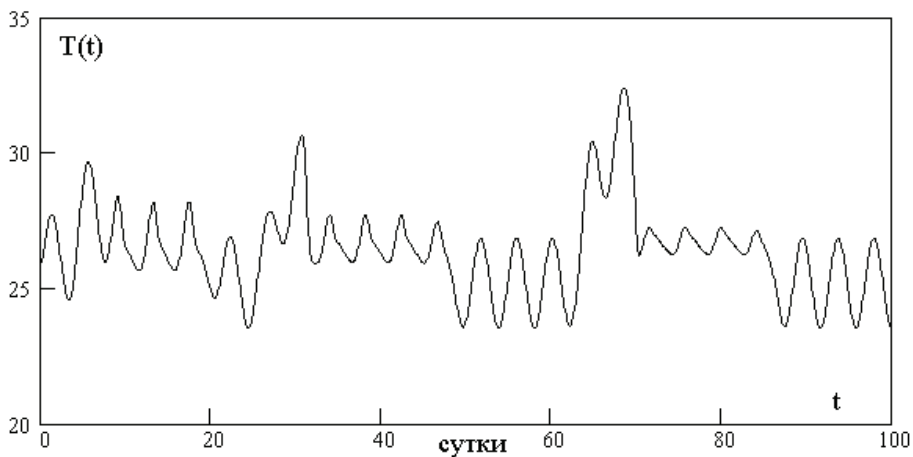


Рис. 2. Временная динамика температуры поверхности океана в зоне ТЦ при генерации трёх тайфунов

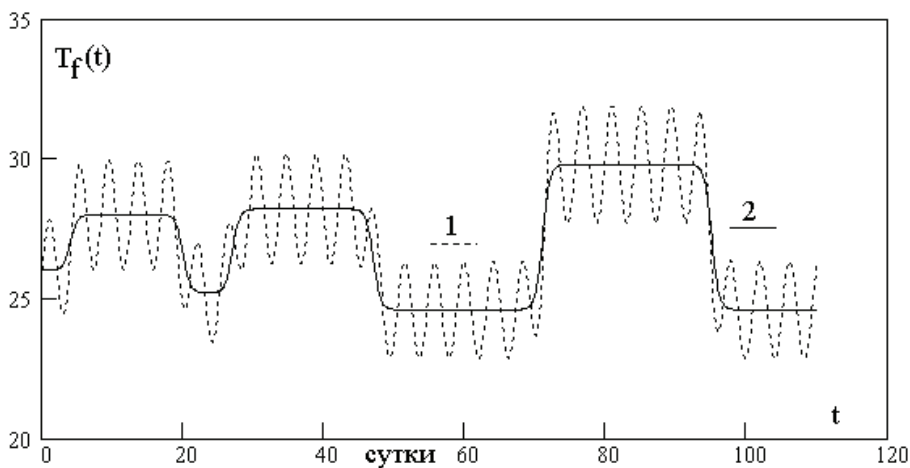


Рис. 3. Графики фоновой температуры  $T_f(t)$  при  $\sigma = 0,07$  (кривая 1) и  $\sigma = 0$  (кривая 2)

Таким образом, проведённый в работе численный анализ динамики максимальной скорости ветра в ТЦ и температуры поверхности океана в зоне ТЦ для сезонного хода крупномасштабного РКЦ подтвердил, что в рамках малопараметрической нелинейной модели, путём подбора исходных параметров задачи и учёта нестационарности фоновой обстановки, можно получать различные сценарии генерации тропических циклонов в активном сезоне с существенными вариациями скорости ветра на квазистационарной стадии ТЦ.

В остальное время года эти кризисные события отсутствуют. При соответствующем подборе параметров модели характеристики образовавшихся ТЦ будут соответствовать данным наблюдений крупномасштабного циклогенеза в исследуемом регионе.

Конечно, существует ряд достаточно продвинутых численных моделей, описывающих динамику тропических циклонов. Однако они вовлекают большое количество экспериментальных данных и требуют громадных вычислительных ресурсов. Несмотря на это, даже с учётом коррекции прогнозов, их предсказания часто оказываются неудовлетворительными. С другой стороны, МПМ гораздо проще в вычислительном плане и позволяет изучать физику влияния отдельных внешних факторов на рассматриваемый процесс. Разрабатываемая модель МПМ позволяет достаточно простыми расчётами (без использования суперкомпьютеров) изучать зависимость характеристик тропических циклонов от исходных параметров, включая температуру поверхности океана, её изменение во времени, количество ТЦ в активном сезоне, длительность их жизненного цикла и т.д. Это даёт возможность корректной интерпретации данных наблюдений, понимания механизмов эволюции ТЦ, а также возможность обоснованного выбора исходных данных для последующих расчётов (весьма большого объёма) в трёхмерной задаче пространственно-временной динамики этих вихрей с использованием суперкомпьютеров (огромное количество пространственных ячеек, выбор оптимального шага по времени в численных расчётах). Такие расчёты необходимы для подтверждения предсказанных МПМ особенностей эволюции ТЦ, выявления пространственной структуры ветровых потоков и пр. Отметим также, что коэффициенты МПМ выбираются исходя из статистических наблюдений, а это значит, что они некоторым усреднённым образом учитывают отклик планеты на внешнее воздействие для конкретного места и конкретного времени года. Следовательно, такая модель может помочь прогнозировать наиболее вероятное поведение системы.

Необходимо отметить, что данные наблюдений РКЦ, в частности спутниковой аппаратурой, необходимы для обоснованного выбора исходных параметров задачи в нелинейной малопараметрической модели, решения которой должны соответствовать характеристикам сформировавшихся в конкретном регионе тайфунов, а также для правильного описания влияния внешних источников на крупномасштабный тропический циклогенез, например, с помощью эффективных схем параметризации в численном исследовании трёхмерной пространственно-временной динамики ТЦ. Представляет интерес учёт в последующем анализе крупномасштабного циклогенеза существенной роли заряженных подсистем мощных атмосферных вихрей, спиральности ветровых потоков, выделения скрытой теплоты фазовых преобразований атмосферной влаги.

## Заключение

Результаты проведенного исследования состоят в следующем. Выполнен анализ обобщенной нелинейной МПМ для описания вариаций скорости ветра в тропических циклонах на квазистационарной стадии их жизненного цикла.

Численными расчетами показано, что на основе обобщенной малопараметрической, нелинейной модели можно исследовать особенности динамики региональных крупномасштабных циклогенезов в период активного сезона, изучать их зависимость от различных внешних факторов, например, вариаций космической погоды и других факторов, которые ранее рассматривались на основе стандартного метода корреляционного анализа.

Развиваемый подход к исследованию динамики РКЦ на основе нелинейной МПМ с учетом экспериментальных данных по характеристикам крупномасштабных тропических возмущений типа тайфунов позволит получить модель сезонного хода интенсивности циклогенеза в конкретном регионе, что представляет большой научный и практический интерес, в том числе для разработки современных методов прогноза крупномасштабных кризисных атмосферных явлений и моделирования их связей с другими процессами. Можно полагать, что в данном подходе удастся получить объяснение наблюдаемых трендов интенсивности крупномасштабного циклогенеза на временных интервалах порядка 11-летних циклов солнечной активности.

Как известно, корреляционные связи между солнечной активностью и кризисными процессами в нижней атмосфере были замечены сравнительно давно. Однако позднее, более детальные исследования на временных интервалах большей длительности выявили их изменчивость. В частности, выяснилось, что эти связи могут ослабевать, исчезать или даже менять знак. Например, ослабив в исходных данных наблюдений влияние явления Эль-Ниньо на тропический циклогенез, удалось выявить 11-летнюю цикличность в тропическом циклогенезе для северо-западной части Тихого океана и показать, что она находится в противофазе с солнечной активностью. Представляет интерес исследование данного вопроса на основе малопараметрической модели циклогенеза в последующих работах.

## Литература

1. *Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А.* Малопараметрическая модель сезонного хода регионального циклогенеза // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 546–549.
2. *Ерохин Н.С., Михайловская Л.А., Ерохин Н.Н.* Нелинейная модель описания временной динамики полного жизненного цикла тропического урагана // Научная сессия МИФИ-2007. Сборник трудов. Изд-во МИФИ, Москва. 2007. Т. 5. С. 72–73.
3. *Михайловская Л.А., Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Шкевов Р.* Аналитическая модель регионального крупномасштабного циклогенеза с переменным числом кризисных событий // Международная конференция МСС-09 "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность". Сборник трудов. М.: ЛЕНАНД. 2009. С. 329–334.

4. Покровская И.В., Шарков Е.А. Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 2.1 (1983-2000). М.: Полиграф сервис, 2001. 548 с.
5. Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. Тропический циклон как элемент системы океан-атмосфера // ДАН. 2004. Т. 399. № 3. С. 397–400.
6. Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. Опыт "синергетического" подхода к исследованию взаимодействия тропических циклонов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 6. С. 1–5.

## The dynamics of regional cyclogenesis with short-period variations of wind in tropical cyclones

N.S. Erokhin, N.N. Zolnikova, S.N. Artekha, A.A. Lazarev

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

*E-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru*

An analysis of the temporal dynamics of the maximum wind speed in a tropical cyclone (TC) and sea surface temperature in the area of TC regional large-scale cyclogenesis (RLSC) is made on the basis of numerical calculations in the framework of the nonlinear small-parametric model (NSPM). Choosing the free parameters of the problem, different variants of temporal dynamics of RLSC may be considered in the implementation of short-period variations of wind speed in the TC (with characteristic times of variation of the order few days or less). It follows from these numerical results that the relatively small changes in background conditions can trigger considerable variations of wind speed in the TC during the activity season of this region when several typhoons are generated. According to the analysis performed, the characteristics of emerging TCs (wind speed, the duration of the life cycle, etc.) can vary significantly. From the calculations a possibility also follows to describe the RLSC-dynamics of a specific region on the basis of the nonlinear small-parametric model that will be consistent with observations. Moreover, the effect of external factors (such as solar-terrestrial relations, El Nino phenomenon, etc.) can be taken into account in NSPM-calculations by introducing some additive or multiplicative functions, each of which is associated with phenomenon under consideration, or by introducing single generic functional dependence. For example, similar dependences can be identified using statistical observations of RLSCs in each region for each season.

**Keywords:** tropical cyclones, regional cyclogenesis, small-parametric model, wind velocity variations, ocean surface temperature.

### References

1. Erokhin N.S., Zolnikova N.N., Mikhailovskaya L.A., Maloparametricheskaya model' sezonnogo khoda regional'nogo tsiklogeneza (Small-parametric model of seasonal variation of regional cyclogenesis), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Issue 5, Vol. 1, pp. 546–549.
2. Erokhin N.S., Mikhailovskaya L.A., Erokhin N.N., Nelineinaya model' opisaniya vremennoi dinamiki polnogo zhiznennogo tsikla tropicheskogo uragana (The nonlinear model describing temporal dynamics of the full life cycle of a tropical cyclone), *Nauchnaya Sessiya MIFI-2007*, Proc. Conf., Moscow: Izdatelstvo MIFI, 2007, Vol. 5, pp. 72–73.
3. Mikhailovskaya L.A., Erokhin N.S., Zolnikova N.N., Shkevov R., Analiticheskaya model' regional'nogo krupnomasshtabnogo tsiklogeneza s peremennym chislom krizisnykh sobytii (Analytical model for large-scale regional cyclogenesis with a variable number of crisis events), *Proc. International Conference MSS-09 "Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence"*, Moscow: LENAND, 2009, pp. 329–334.
4. Pokrovskaya I.V., Sharkov E.A., *Tropicheskie tsiklony i tropicheskie vozmushcheniya Mirovogo okeana: khronologiya i evolyutsiya. Versiya 2.1 (1983-2000)* (Tropical cyclones and tropical disturbances of the World Ocean: chronology and evolution. Version 2.1 (1983-2000)), Moscow: Poligrafservis, 2001, 548 p.
5. Yaroshevich M.I., Ingel' L.Kh., Tropicheskii tsiklon kak element sistemy okean-atmosfera (Tropical cyclone: an element of the ocean-atmosphere system), *Doklady Akademii Nauk*, 2004, Vol. 399, No 3, pp. 397–400.
6. Yaroshevich M.I., Ingel' L.Kh., Opyt "sinergeticheskogo" podkhoda k issledovaniyu vzaimodeistviya tropicheskikh tsiklonov (An experience of the "synergistic" approach to the study of the interaction of tropical cyclones), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2006, Vol. 42, No 6, pp. 1–5.