

## ДИНАМИКА ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА С ВАРИАЦИЯМИ СКОРОСТИ ВЕТРА

Николай Ерохин<sup>1</sup>, Надежда Зольникова<sup>1</sup>, Людмила Михайловская<sup>1</sup>, Румен Шкевов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований – Российская академия наук

<sup>2</sup>Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките  
e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru, shkevov@space.bas.bg

**Ключевые слова:** Нелинейная малопараметрическая модель, региональный циклогенез, тропические циклоны, скорость ветра, температура поверхности океана, активный сезон.

**Аннотация:** На основе численных расчетов в рамках нелинейной малопараметрической модели (МППМ) для максимальной скорости ветра в тайфуне (ТЦ) и температуры поверхности океана в зоне ТЦ продолжен анализ временной динамики регионального крупномасштабного циклогенеза (РКЦ) с учетом влияния внешних факторов (типа солнечно-земных связей, явления Эль-Ниньо и др.), определяющих нестационарность фоновой обстановки и интенсивность РКЦ. Выбором параметров задачи рассмотрены варианты временной динамики РКЦ при реализации вариаций фоновой обстановки с характерным временем этих вариаций порядка суток и параметром амплитуды вариаций 0.01 при генерации трех ТЦ в активный сезон. Из проведенных численных расчетов следует, что сравнительно малые изменения фоновой обстановки могут инициировать значительные вариации скорости ветра в ТЦ при генерации нескольких тайфунов в активном сезоне региона причем характеристики формирующихся ТЦ (скорость ветра, длительность жизненного цикла и др.) могут существенно различаться. Из проведенных расчетов следует возможность описания РКЦ конкретного региона на основе используемой нелинейной малопараметрической модели при соответствующем подборе параметров МППМ, которое будет соответствовать данным наблюдений.

## TROPICAL CYCLOGENESIS DYNAMICS WITH WIND VELOCITY VARIATIONS

Nikolay Erokhin<sup>1</sup>, Ludmila Mikhailovskaya<sup>1</sup>, Nadezhda Zolnikova<sup>1</sup>, Rumen Shkevov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Space Research Institute – Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup>Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru, shkevov@space.bas.bg

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

**Abstract:** On the basis of numerical calculations in the frame of nonlinear model with reduced (small?) number of parameters (NMRNP) for the maximum wind speed in a tropical cyclone (TC) and sea surface temperature in the area of the TC, we continued the analysis of the temporal dynamics of regional large-scale cyclogenesis (RCC), taking into account the influence of external factors (such as solar-terrestrial relations, El Niño phenomenon, etc.) which determines the nonstationarity of the RCC's background conditions and intensity. By choosing the system parameters, variants of RCC's temporal dynamics were described, realizing variation in background conditions with variation characteristic time of the order of 24 hours and amplitude variation parameter of 0.01, when generating three TC during the active season. The numerical results show that relatively small changes in background conditions can trigger significant variations of the wind speed in TC, when generating a couple of typhoons in the active season and the characteristics of the forming TC (wind speed, life cycle duration, etc.) can vary significantly. Taking into account the calculations, it became possible to describe the RCC of specific region, selecting the adequate parameters and on the basis of the NMRNP, to obtain results matching the observational data.

## 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 учетом 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, которая достаточно реалистично описывает формирование крупномасштабного вихря из слабой тропической депрессии (ТД), его интенсификацию до уровня тайфуна и квази-стационарную фазу [1]. Позднее были предложены обобщения МПМ, позволяющие изучать полный жизненный цикл тропических циклонов (ТЦ) включая стадию затухания вихря при его выходе на сушу либо вследствие смещения в область более холодной воды [2], а также исследовать возможность одновременного существования в заданном регионе двух ТЦ и их конкуренции [3].

Дальнейшее развитие модели [4] было связано с учетом нестационарности фоновой обстановки, например, температуры поверхности океана, возможности описания многократной генерации ТЦ в заданном регионе во время активного сезона, а также введением эффективных источников атмосферных возмущений, например, обусловленных солнечно-земными связями, вариациями потока солнечной радиации, космических лучей и др. В этой обобщенной модели после формирования крупно-масштабного 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 ее параметрами пороговых (для запуска неустойчивости) значений. Обобщенная 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 развиваемый на основе МПМ подход с учетом данных наблюдений по параметрам крупно-масштабных возмущений типа ТЦ позволяет получить достаточно простую модель описания сезонного хода РКЦ в каждом регионе с учетом данных наблюдений и анализа его корреляций с другими процессами.

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 крупно-масштабными процессами. Это важно и для анализа влияния ТЦ, например, на крупномасштабную циркуляцию атмосферы и пр.

На основе обобщенных уравнений малопараметрической нелинейной модели изложены результаты численных расчетов сезонного хода крупномасштабного регионального циклогенеза (РКЦ) с учетом нестационарности фоновой обстановки, приводящей к вариациям скорости ветра в ТЦ. 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 проведенный численный анализ решений нелинейной МПМ выявил заметную чувствительность сценария динамики регионального циклогенеза к изменению величин исходных параметров задачи.

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 данным наблюдений [5].

## Уравнения МПМ и численный анализ их решений

Для описания сезонного хода РКЦ с учетом нестационарности фоновой обстановки и внешних воздействий, воспользуемся следующими уравнениями [4,6]:

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

В (1) скорость  $V(t)$  измеряется в м/сек, 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 соответствии с рекомендациями работы [1] ниже будем полагать  $T_c = 26.5^{\circ}\text{C}$ , а для температуры холодной воды, поднимающейся к поверхности океана, берем значение  $T_1 = 23^{\circ}\text{C}$ . Необходимо однако отметить, что значение  $T_c$  вообще говоря зависит от региона [7].

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 расчетах динамики одного ТЦ использовалась функция

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

Здесь введены обозначения  $s_1(t) = (t - t_1) / \tau_1$ ,  $s_2(t) = (t - t_2) / \tau_2$ , а  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  характерные времена изменения температуры  $\delta T_f(t)$ , причем полагается  $t_1 < t_2$ . Отметим, что в зоне зарождения тайфуна температура  $T_f(t)$  вначале возрастает на величину  $2 \cdot \delta T_1$  и при превышении порогового значения начинается крупно-масштабная неустойчивость с генерацией ТЦ. В конце жизненного цикла ТЦ она уменьшается на  $2 \cdot \delta T_2$  (смещение тайфуна в область более холодной воды), что ведет 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  $1 < t < 65$  трех ТЦ в простейшем случае  $y(t) = 0$ ,  $f(t) = 0$ ,  $v = 0$ . Для описания динамики циклогенеза в формуле (2) для  $\delta T_f(t)$  используем представление

$$(3) \quad \delta T_f(t) = G(t) \cdot \sum_n \{ \delta T_{n1} [1 + \text{th } s_{n1}(t)] - \delta T_{n2} [1 + \text{th } s_{n2}(t)] \}, n = 1, 2, 3.$$

$$G(t) = 1 + \sigma \cdot \sin (2 \cdot \pi \cdot t / 1.2), \text{ где } \sigma \text{ параметр вариаций фоновой температуры.}$$

Ниже будут приведены графики скорости ветра и температуры поверхности океана для следующего варианта выбора параметров в (3) при численных расчетах решения системы уравнений (1), соответствующего генерации трех тайфунов в активном сезоне,

$$\gamma = 1, \mu = 3 \cdot 10^{-3}, b = 9 \cdot 10^{-4}, \tau = 1, T_c = 26.5, T_1 = 23, V(0) = 0.3, T(0) = 26,$$

$$(4) \quad \delta T_{11} = 1, \delta T_{12} = 1.4, \delta T_{21} = 1.4, \delta T_{22} = 1.7, \delta T_{31} = 1.9, \delta T_{32} = 1.9,$$

$$\tau_{n1} = \tau_{n2} = 1, t_{11} = 1, t_{12} = 7, t_{21} = 14, t_{22} = 29, t_{31} = 38, t_{32} = 60.$$

Для параметра  $\sigma$ , определяющего амплитуду вариаций скорости ветра в ТЦ, примем значение  $\sigma = 0.01$ . На рис.1 дан график скорости ветра в тайфунах  $V(t)$ .

Длительность жизненного цикла второго 16, а третьего ТЦ 23 сутки. Для них наблюдаются 6 и 10 вариаций  $V(t)$ . Отметим, что в среднем для первого ТЦ скорость ветра близка к 38.2 м / с, а для третьего она около величины 47.7 м / с. Важно, что 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  $0.4^{\circ}\text{C}$  в виду малости параметра  $\sigma$ . Между ТЦ, в отличие от скорости  $V(t)$ , вариации температуры  $T(t)$  того же порядка  $0.4^{\circ}\text{C}$ .

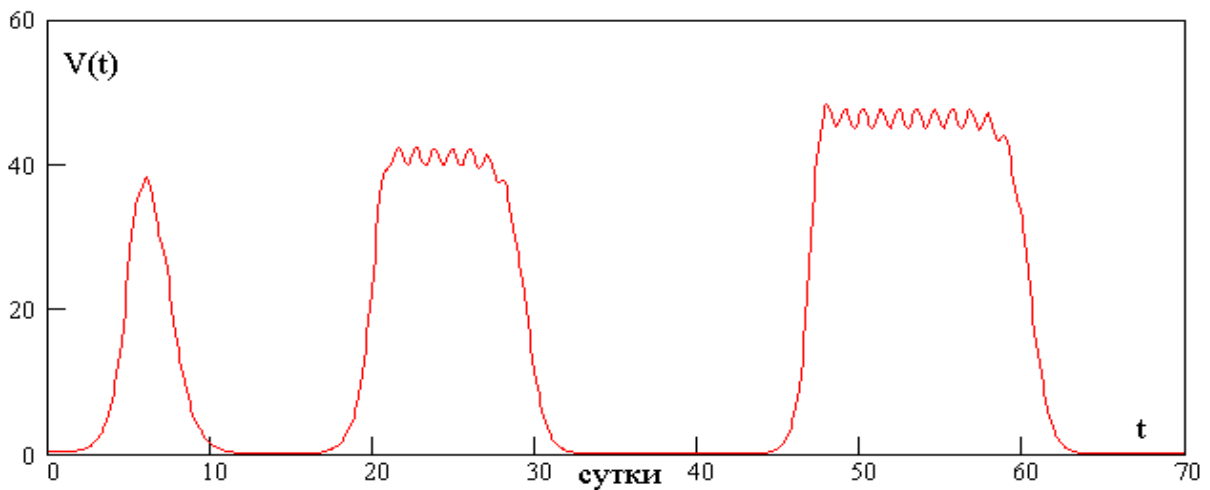


Рис. 1. График скорости ветра в тайфунах  $V(t)$  при генерации трех ТЦ

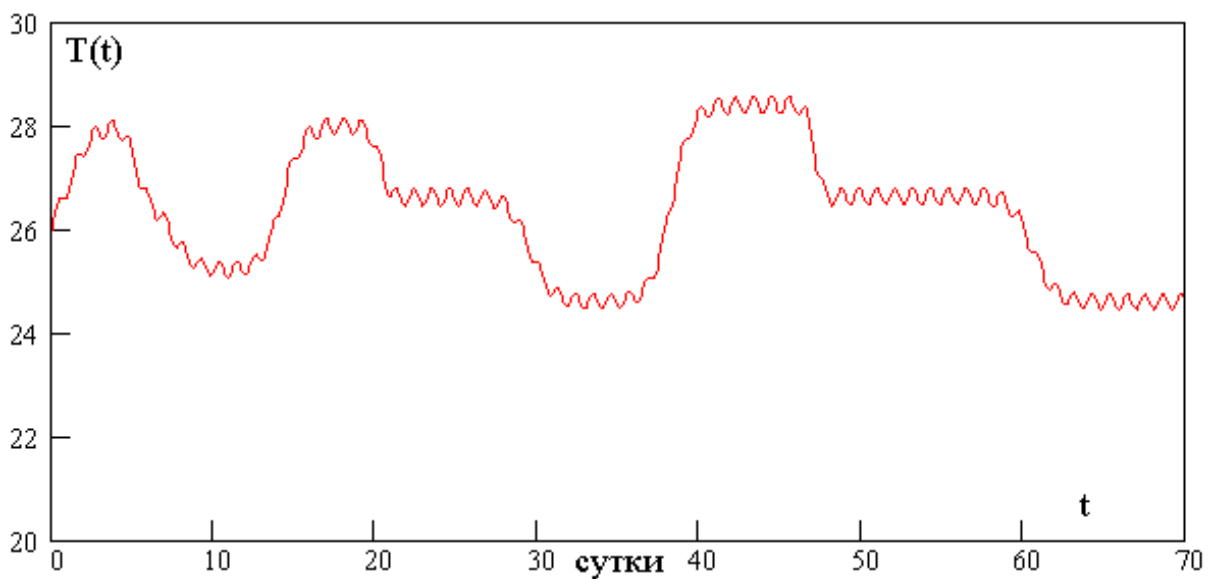


Рис. 2. Временная динамика температуры поверхности океана в зоне ТЦ при генерации трех тайфунов

Графики фоновой температуры  $T_f(t)$  при  $\sigma = 0.01$  (кривая 1) и для  $\sigma = 0$  ( $T_{f0}(t)$ , кривая 2) представлены на рис.3. Амплитуда вариаций  $\delta T_f(t)$  при  $\sigma = 0.01$  порядка  $0.6^\circ \text{C}$ . Таким образом проведенный в работе численный анализ динамики сезонного хода крупномасштабного регионального тропического циклогенеза (РКЦ) подтвердил, что в рамках малопараметрической, нелинейной модели путем подбора исходных параметров задачи, учета нестационарности фоновой обстановки, можно получать совершенно различные сценарии генерации тропических циклонов и полярных ураганов в активном сезоне с разной амплитудой вариаций 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. Необходимо отметить, что амплитуда вариаций скорости ветра и температуры поверхности океана в зоне ТЦ существенно зависит от величины параметра  $\sigma$ , характеризующего нестационарность фоновой обстановки.

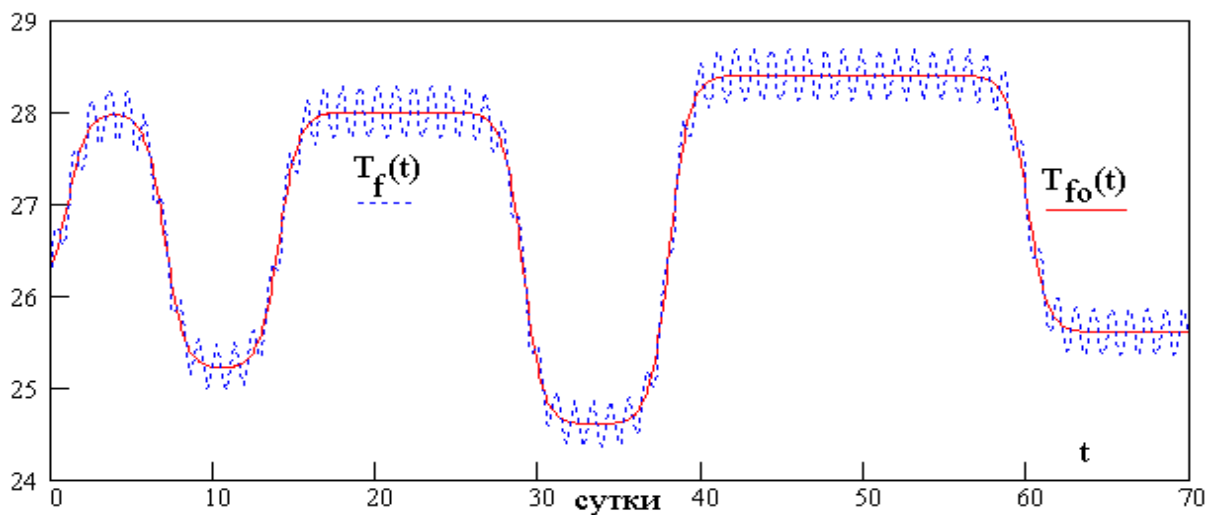


Рис. 3. Графики фоновой температуры  $T_f(t)$  при  $\sigma = 0.01$  и  $T_{f0}(t)$  для  $\sigma = 0$

Так ранее проведенные численные расчеты показали, что при  $\sigma = 0.08$  в зоне тайфунов колебания максимальной скорости ветра увеличиваются до 16 м/с, но в зоне штормов возмущения значительно меньше. Для  $\sigma = 0.08$  согласно расчетам вариации температуры поверхности океана в зоне ТЦ возрастают до величины порядка  $2^\circ\text{C}$ . Указанные обстоятельства связаны с тем, что когда в зоне ТЦ параметры соответствуют неустойчивой системе океан-атмосфера воздействия вариаций фоновой обстановки резко усиливаются по амплитуде вызываемых ими колебаний  $V(t)$  и  $T(t)$ . При параметрах системы океан-атмосфера, соответствующих стабильной динамике индуцируемые колебания  $V(t)$  остаются достаточно малыми ввиду малости  $\sigma$ .

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 трехмерной пространственно-временной динамики ТЦ.

Представляет также интерес учет в последующем анализе крупномасштабного циклогенеза существенной роли заряженных подсистем мощных атмосферных вихрей, спиральности ветровых потоков, выделения скрытой теплоты фазовых преобразований атмосферной влаги. Заметим, что в мощном тайфуне в сутки (в среднем) выпадает до 30 млрд тонн осадков. Так что выделяемая при этом тепловая энергия почти на два порядка превосходит кинетическую энергию ветров в тайфуне.

### Заключение

Результаты проведенного исследования состоят в следующем:

- Продолжен анализ обобщенной нелинейной МПМ для описания возможности 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 др., 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 была 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. Я р о ш е в и ч , М . И . , Л . Х . Ингель. Тропический циклон как элемент системы океан-атмосфера. ДАН, 2004. Т.399. № 3. с.397-400.
2. Е р о х и н , Н . С . , Л . А . Михайловская, Н . Н . Е р о х и 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. Я р о ш е в и ч , М . И . , Л . Х . Ингель. Опыт "синергетического" подхода к исследованию взаимодействия тропических циклонов. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2006. Т.42. № 6, с.1-5.
4. Е р о х и н , Н . С . , Н . Н . З о л ь н и к о в а , Л . А . М и х а й л о в с к а я . Малопараметрическая модель сезонного хода регионального циклогенеза. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып.5. Т.1, с. 546-549.
5. П о к р о в с к а я , И . В . , Е . А . Шарков. Тропические циклоны тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 2.1 ( 1983-2000). М.: Полиграф сервис, 2001. 548 с.
6. М и х а й л о в с к а я , Л . А . , Н . С . Е р о х и н , Н . Н . З о л ь н и к о в а , Р . Ш к е в о в . Аналитическая модель регионального крупномасштабного циклогенеза с переменным числом кризисных событий. Международная конференция МСС-09 "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность". Сборник трудов. Изд-во "URSS", Москва. 2009. с.329-334.
7. Ш а р к о в Е . А . , П о к р о в с к а я И . В . Особенности региональных тропических циклогенезов в поле поверхностной температуры Мирового океана по данным дистанционного зондирования . Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. научн. статей. Вып. 6. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2009. с. 259-265.