

## Нелинейная динамика годового хода регионального циклогенеза в малопараметрической модели

Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова, А.А. Лазарев, Л.А. Михайловская

*Институт космических исследований РАН,  
117997 Москва, Профсоюзная 84/32  
E-mails: nerokhin@iki.rssi.ru;*

На основе системы связанных нелинейных уравнений для средней скорости ветра и температуры поверхности океана в области тропического циклона, описывающих временную динамику мощного атмосферного вихря, продолжен численный анализ самосогласованной малопараметрической модели (МПМ) регионального крупномасштабного циклогенеза (РКЦ), позволяющей исследовать роль солнечно-земных связей, космической погоды и других факторов в сезонном ходе РКЦ, а также исследовать различные сценарии временной динамики РКЦ в зависимости от величин параметров МПМ. Расчетами показано, что соответствующим выбором исходных параметров МПМ возможно получить годовой ход РКЦ с генераций в активном сезоне интересующего региона заданного числа ураганов с различающимися характеристиками вихрей. Следовательно, с помощью нелинейной малопараметрической модели можно изучать особенности временной динамики региональных крупномасштабных циклогенезов в период активного сезона, а также исследовать зависимость их интенсивности от различных внешних факторов, в частности, космической погоды, явления Эль-Ниньо и др.

**Ключевые слова:** нелинейные уравнения, малопараметрическая модель, региональный циклогенез, тропические циклоны, температура поверхности океана, активный сезон.

### Введение

Одной из важных задач в современных исследованиях катастрофических 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 процессов. 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 квазистационарную фазу (Ярошевич, Ингель, 2004). Позднее было проведено обобщение данной малопараметрической модели, позволяющее изучать полный жизненный цикл тропических циклонов (ТЦ) включая стадию затухания вихря 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 малопараметрической модели (Ерохин и др., 2008) было связано с учетом нестационарности фоновой обстановки, например, температуры поверхности океана, возможности многократной генерации ТЦ в заданном регионе, а также введением в задачу эффективных источников атмосферных возмущений, в частности, обусловленных солнечно-земными связями, вариациями потока солнечной радиации и др. В этой модели после генерации крупномасштабного мощного вихря (вследствие развития неустойчивости

атмосферы) и последующего затухания ТЦ (по истечении некоторого времени) происходит подготовка системы океан-атмосфера к повторной генерации тропических циклонов по достижении ее параметрами пороговых для запуска неустойчивости значений.

Поскольку рассматриваемая нелинейная модель содержит свободные параметры, выбором их величин можно в определенной степени управлять временной динамикой регионального циклогенеза. Согласно выполненным численным расчетам можно менять количество образующихся в заданном регионе тайфунов в период активного сезона, а также их характеристики, например, максимальную скорость ветра, продолжительность жизненного цикла каждого ТЦ, длительности интенсификации вихрей до уровня тайфуна и последующего их затухания. Таким образом развиваемый на основе МПМ подход с учетом данных наблюдений по параметрам крупномасштабных возмущений типа ТЦ позволяет получить достаточно простую модель описания сезонного хода регионального крупномасштабного циклогенеза, что представляет большой научный и практический интерес, в частности, для разработки современных методик прогноза кризисных атмосферных явлений, их интенсивности, при анализе влияния ураганов на крупномасштабную циркуляцию атмосферы и т.д.

В настоящей работе на основе уравнений малопараметрической нелинейной модели проведены численные расчеты годового хода крупномасштабного регионального циклогенеза с учетом нестационарности фоновой обстановки. Показано, что можно менять начало и конец активного сезона, число возникающих тайфунов и штормов в этот период, их характеристики. Важно и то, что выполненный анализ решений нелинейной, малопараметрической модели в зоне циклогенеза выявил заметную чувствительность сценария динамики системы океан-атмосфера к изменению значений исходных параметров задачи. В качестве задачи для последующих работ можно указать на приложение развитого подхода к исследованию циклогенеза в конкретных регионах с поиском оптимального выбора параметров, позволяющего описать для заданного годового интервала число образовавшихся ТЦ, времена их существования, максимальные скорости ветров и пр., которые должны соответствовать параметрам ТЦ в имеющихся базах данных наблюдений (см., например, представленные в монографии Покровская, Шарков, 2001).

### **Основные уравнения нелинейной малопараметрической модели и анализ их решений**

Для описания сезонного хода регионального тропического циклогенеза с учетом нестационарности фоновой обстановки и внешних воздействий в качестве эффективных источников возмущений используем следующее обобщение малопараметрической модели (Ерохин и др., 2008; Михайловская и др., 2009):  $dV/dt = \gamma \cdot (T - T_c) \cdot V - \mu \cdot V^2 + y(t)$ ,

$$dT/dt = -b \cdot (T - T_1) \cdot V^2 + (T_f - T) / \tau, \quad (1)$$

$$dT_f/dt = f(t) - v \cdot (T_f - T_0).$$

В формулах (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 некоторого порогового значения  $T_c$ . В соответствии с

рекомендациями работы (Ярошевич, Ингель, 2004) ниже будем полагать  $T_c = 26,5$  °С, а для температуры холодной воды, поднимающейся к поверхности океана, берем значение  $T_1 = 23$  °С. Следует отметить, что пороговое 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  $y(t)$  генерацию слабого ветра (при отсутствии тайфуна) малым возмущением. Как указывалось выше, в качестве внешних факторов могут выступать вариации солнечной активности, характеризующиеся, например, числами Вольфа, явление Эль-Ниньо и др.

Чтобы учесть изменение фоновых условий в (1) для переменной температуры  $T_f$  при расчетах динамики тайфунов использовалась следующая функция  $T_f(t) = T_0 + \delta T_f(t)$ , где

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

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 полагаем  $t_1 < t_2$ . 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 крупномасштабная неустойчивость, а позднее она уменьшается на  $2 \cdot \delta T_2$  (смещение тайфуна в область более холодной воды), соответственно ТЦ затухает. В случае описания временной динамики нескольких тайфунов формула для функции  $\delta T_f(t)$  должна содержать несколько 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 ТЦ. Здесь следует указать, что представление (2) для функции  $\delta T_f(t)$  является не единственным. В частности, согласно расчетам вполне подходит замена в формуле (2) функций размытого перехода  $[ 1 + \text{th } s_n(t) ]$  на следующее выражение  $\{ 1 + (t - t_n) / [\tau_n^2 + (t - t_n)^2]^{1/2} \}$  с теми же параметрами  $t_n$ ,  $\tau_n$ . Рассмотрим генерацию в активном сезоне регионального циклогенеза  $6 < t < 113$  трех ТЦ. Для описания формирования и интенсификации первого ТЦ в формуле (2) примем  $\delta T_f(t) = \delta T_{11} [ 1 + \text{th } s_{11}(t) ] - \delta T_{12} [ 1 + \text{th } s_{12}(t) ]$  с функциями  $s_{11}(t) = (t - t_{11}) / \tau_{11}$ ,  $s_{12}(t) = (t - t_{12}) / \tau_{12}$  и параметрами  $t_{11} = 6$ ,  $t_{12} = 27$ ,  $\tau_{11} = \tau_{12} = 1$ ,  $\delta T_{11} = 1$ ,  $\delta T_{12} = 1,4$ . Для второго и третьего ТЦ формы записи фоновой температуры  $\delta T_f(t)$  вполне аналогичны приведенной выше с параметрами:  $t_{21} = 35$ ,  $t_{22} = 57$ ,  $\tau_{21} = \tau_{22} = 1$ ,  $\delta T_{21} = 1,2$ ,  $\delta T_{22} = 1,2$  и  $t_{31} = 73$ ,  $t_{32} = 105$ ,  $\tau_{31} = \tau_{32} = 4$ ,  $\delta T_{31} = 2,2$ ,  $\delta T_{32} = 2,2$  соответственно. Результаты численных расчетов данного варианта представлены на рис.1 графиками зависимости от времени скорости ветра и температуры поверхности океана в зоне ТЦ. Для пороговой температуры было взято значение  $T_c = 26,5$  °С,  $T_0 = 26$  °С.

Согласно рис.1 для первого тропического циклона полный жизненный цикл (включая интенсификацию возмущения до уровня тайфуна, квазистационарную стадию и затухание ТЦ) соответствует временному интервалу (в сутках)  $12,7 < t < 25,2$ . На стадии формирования первого ТЦ максимальное значение температуры поверхности океана в его зоне имело величину  $T1 \approx 27,99$  °С. На квазистационарной стадии максимальная скорость ветра в данном ТЦ достигла величины  $V1 \approx 41,09$  м / сек. Жизненный цикл второго ТЦ соответствует интервалу  $46,1 < t < 53,4$ . На стадии формирования второго тайфуна максимальное значение температуры поверхности океана в его зоне достигло значения  $T2 \approx 27,6$  °С. На квазистационарной стадии этого ТЦ максимальная скорость ветра имела величину  $V2 \approx 35$  м / сек. Для третьего ТЦ жизненный цикл соответствовал интервалу времени  $82,4 < t < 102,9$ . На стадии формирования третьего тайфуна максимальное значение температуры поверхности

океана в его зоне T2 достигло значения  $T_2 \approx 29,44$  °C, максимальная скорость ветра на квазистационарной стадии была  $V_2 \approx 55,4$  м / сек. После стадии затухания каждого ТЦ температура поверхности океана была  $T \approx 25,21$  °C т.е. ниже порогового значения  $T_c$ . В данном варианте выбора исходных параметров задачи формирование тайфунов проходило через стадии восточной волны (W), тропической депрессии (TD), тропического шторма (TS) и сильного тропического шторма (STS).

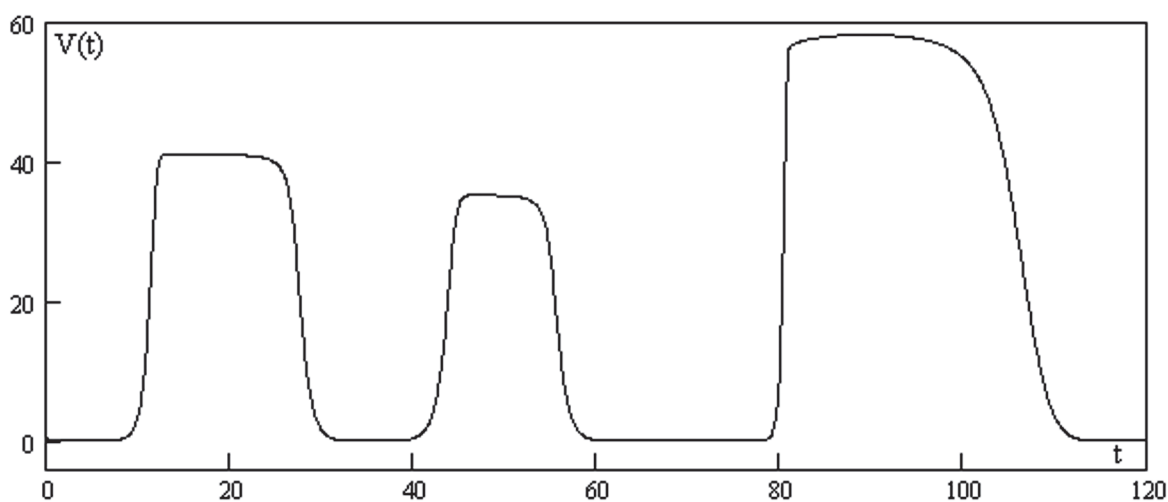


Рис.1а. Временная динамика скорости ветра в ТЦ во время активного сезона регионального крупномасштабного циклогенеза при генерации трех ТЦ

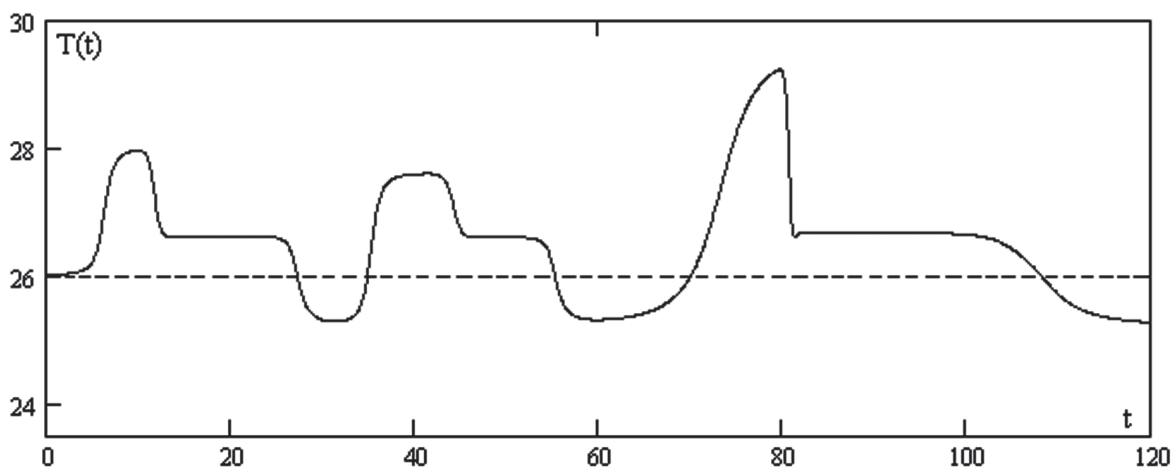


Рис.1б. Временная динамика температуры поверхности океана во время активного сезона регионального крупномасштабного циклогенеза при генерации трех ТЦ

Рассмотрим генерацию в активном сезоне регионального циклогенеза  $5 < t < 101$  четырех тайфунов. Аналогично предыдущему варианту для пороговой температуры было взято значение  $T_c = 26,5$  °C,  $T_0 = 26$  °C. Параметры первого тайфуна следующие  $t_{11} = 4$ ,  $t_{12} = 20$ ,  $\tau_{11} = \tau_{12} = 1$ ,  $\delta T_{11} = 1$ ,  $\delta T_{12} = 1,4$ . В этом варианте для второго и третьего ТЦ было взято  $t_{21} = 27$ ,  $t_{22} = 47$ ,  $t_{31} = 53$ ,  $t_{32} = 65$ ,  $\tau_{21} = \tau_{22} = \tau_{31} = \tau_{32} = 1$ ,  $\delta T_{21} = \delta T_{22} = 1,8$ ,  $\delta T_{31} = 1,2$ ,  $\delta T_{32} = 1,4$ . Для четвертого тайфуна выбраны значения  $t_{41} = 73$ ,  $t_{42} = 96$ ,  $\tau_{41} = \tau_{42} = 1$ ,  $\delta T_{41} = \delta T_{42} = 2,6$ . Результаты численных расчетов генерации четырех ТЦ в активном сезоне приведены на рис. 2 в виде графиков скорости ветра и температуры поверхности океана.

Согласно рис.2 для первого тропического циклона полный жизненный цикл соответствует временному интервалу (в сутках)  $6,4 < t < 23,5$ , для второго, третьего и четвертого имеем  $30 < t < 49,7$ ,  $57,6 < t < 67$ ,  $76,3 < t < 98,5$ . На стадии формирования ТЦ максимальные значения температуры поверхности океана в зоне тайфунов были следующие  $T1 \approx 27,98$  °С,  $T2 \approx 28,76$  °С,  $T3 \approx 27,59$  °С,  $T4 \approx 29,95$  °С. После затухания первого и второго ТЦ температура снизилась до  $25,25$  °С, а для третьего и четвертого ТЦ стала  $24,8$  °С. Приведем также максимальные значения скорости ветра в тайфунах на квазистационарной стадии их жизненного цикла. Согласно рис.2а имеем :  $V1 \approx 41,09$  м/с,  $V2 \approx 51,1$  м/с,  $V3 \approx 35$  м/с,  $V4 \approx 63,1$  м/с. В этом варианте исходных параметров задачи формирование тайфунов проходило аналогично предыдущему через стадии восточной волны, тропической депрессии, тропического шторма и сильного тропического шторма.

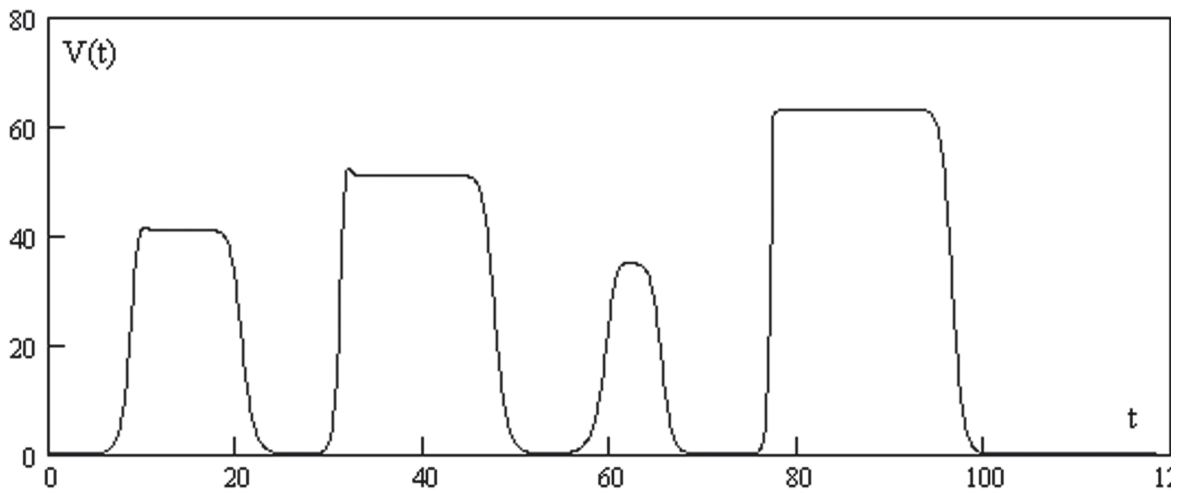


Рис.2а. Временная динамика скорости ветра в ТЦ во время активного сезона регионального крупномасштабного циклогенеза при генерации четырех ТЦ

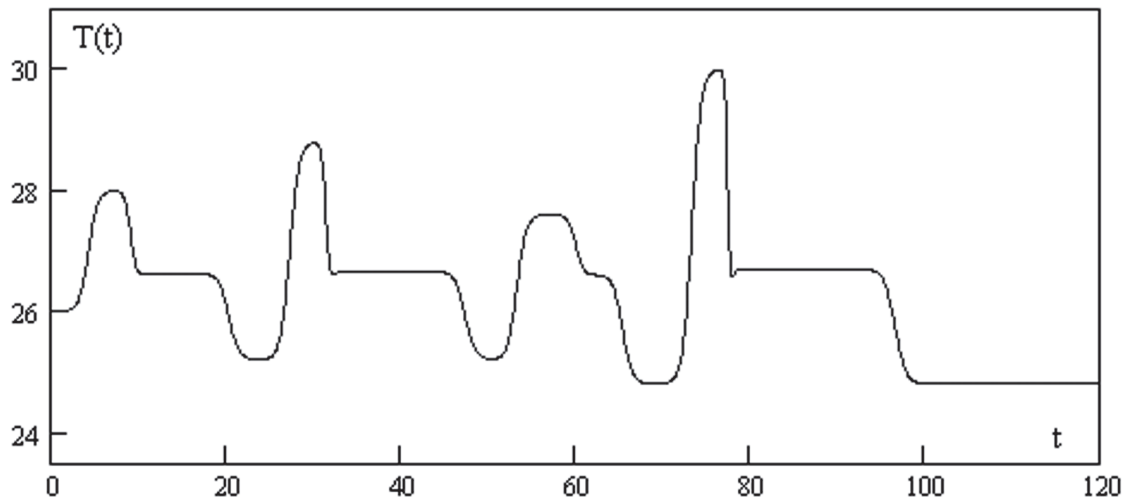


Рис.2б. Временная динамика температуры поверхности океана во время активного сезона регионального крупномасштабного циклогенеза при генерации четырех ТЦ

Таким образом, выполненный в данной работе численный анализ малопараметрической, нелинейной модели регионального тропического циклогенеза подтвердил, что путем подбора исходных параметров задачи, учета нестационарности фоновой обстановки, обусловленной, например, перемещением вихря по поверхности океана, можно получать раз-

личные сценарии генерации тропических циклонов и полярных ураганов в активном сезоне регионального, крупномасштабного циклогенеза и отсутствие таких кризисных событий в остальное время года. При этом параметры ТЦ будут соответствовать результатам наблюдений циклогенеза. Данные наблюдений, например, спутниковой аппаратурой необходимы для корректного выбора исходных параметров задачи в нелинейной малопараметрической модели, решения которой будут соответствовать характеристикам сформировавшихся в конкретном регионе ТЦ, а также для правильного описания влияния внешних источников на крупномасштабный тропический циклогенез с помощью эффективных схем параметризации в численном исследовании пространственно-временной динамики ТЦ. В частности, это необходимо для учета в последующих исследованиях крупномасштабного циклогенеза существенной роли заряженных подсистем мощных атмосферных вихрей, спиральности ветровых потоков, выделения скрытой теплоты фазовых преобразований атмосферной влаги.

### Заключение

Изложенные выше результаты состоят в следующем. Показано, что на основе обобщенной малопараметрической, нелинейной модели можно исследовать особенности сезонного хода временной динамики региональных крупномасштабных циклогенезов в период активного сезона, а также изучать их зависимость от различных внешних факторов, например, вариаций солнечной активности, явления Эль-Ниньо и др., которые ранее рассматривались на основе метода корреляционного анализа. Развитый в данной работе подход на основе МПМ анализа РКЦ с учетом экспериментальных данных по характеристикам крупномасштабных тропических возмущений типа тайфунов позволяет получить аналитическую 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 выявления их связей с другими процессами.

Вполне очевидно также, что в данном подходе можно также 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. Исследование данного вопроса на основе малопараметрической модели циклогенеза будет проведено в последующих работах.

Можно ожидать, что наиболее эффективно, например, солнечно-земные связи могут воздействовать на крупномасштабный циклогенез в регионах, где атмосфера чаще находится вблизи порога устойчивости, а действие других факторов заметно ослаблено. Поэтому именно в этих регионах в первую очередь должен реализовываться триггерный запуск ге-

нерации мощных спиральных вихрей за счет развития крупномасштабной неустойчивости в системе океан-атмосфера.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-05-00060) и программы ОФН-11 РАН.

## Литература

1. Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А. (2008) 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. (2007) 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. (2009) Аналитическая модель регионального крупномасштабного циклогенеза с переменным числом кризисных событий. // Международная конференция МСС-09 <sup>2</sup>Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность<sup>2</sup>. Сборник трудов. Изд-во <sup>2</sup>URSS<sup>2</sup>, Москва. 2009. С. 329-334.
4. Покровская И.В., Шарков Е.А. (2001) Тропические циклоны 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. (2004) Тропический циклон как элемент системы океан- атмосфера // ДАН, 2004. Т. 399. № 3. С. 397-400.
6. Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. (2006) Опыт «синергетического» подхода к исследованию взаимодействия тропических циклонов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2006. Т. 42. № 6. С. 1-5.

## The Nonlinear Dynamics of Annual Behaviour of Regional Cyclogenesis in Small-Parametric Model

N.S. Erokhin, N.N. Zolnikova, F.F. Lazarev, L.A. Mikhailovskaya

*Space Research Institute of RAS  
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.  
E-mails: nerokhin@iki.rssi.ru ;*

It is continued the analysis of regional large-scale cyclogenesis (RLSC) temporal dynamics on the basis of self-consistent nonlinear small-parametric model (NSPM) containing nonlinear equations for the wind velocity and ocean surface temperature inside tropical cyclone. This model allows to study the role of solar-terrestrial relations, the space weather and other external factors on the RLSC seasonal behaviour and to investigate also different scenarios of RLSC development in the dependence on NSPM parameters. Numerical calculations have shown that by the suitable choice of NSPM parameters it is possible to obtain the RLSC annual behaviour with the generation of a given number of typhoons during the RLSC active season and these vortices characteristics may differ significantly. Therefore it is possible now to study features of RLSC temporal dynamics during the active season and to investigate the dependence of RLSC characteristics on a number of external factors like the space weather, El-Ninio phenomena an so on.

**Keywords:** nonlinear equations, small-parametric model, regional cyclogenesis, tropical cyclones, ocean surface temperature, active season