

Девятнадцатая международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и
технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)»



ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА И ЕЁ СВЯЗЬ С ИЗМЕНЕНИЯМИ КЛИМАТА В РАМКАХ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Н.Н. Зольникова¹, Н.С. Ерохин¹, Р. Шкевов², Л.А. Михайловская¹

1) *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

***e-mail: nzolnik@iki.rssi.ru,
nerokhin@mx.iki.rssi.ru***

2) *Институт космических исследований и технологий БАН, София, Болгария*

15 - 19 ноября 2021 г., Москва, ИКИ РАН

Исследование энергопереноса в системе океан – атмосфера является важной задачей, поскольку оно связано с прогнозированием таких опасных явлений природы, как ураганы, штормы и тропические циклоны (ТЦ), иначе называемые тайфунами.



Рис. 1. Спутниковое изображение в видимом диапазоне урагана Катрина над Мексиканским заливом, сделанное 28 августа 2005 года (GOES image courtesy of US DOC/NOAA)

Тропические циклоны представляют собой огромные атмосферные вихри, достигающие в диаметре 1000 - 1500 км, а иногда и более, и простирающиеся по вертикали на всю тропосферу (до 15 - 18 км), вращающиеся вокруг области пониженного атмосферного давления

Основные деструктивные факторы ТЦ:

- **Очень сильные ветра**

Максимальная скорость ветра в наиболее мощных ТЦ достигает $v_m = 90 - 100$ м/с (т.е. 300 - 360 км/ч) (пример – тайфун Ирма в сентябре 2017) и минимальное давление у поверхности океана в центре вихря доходит до рекордно низких в метеорологии значений

- **Штормовой нагон**

Подъём воды в прибрежных районах может достигать 6 метров и более

Шкала ураганов Саффира — Симпсона		
Категория	Скорость ветра миль/час (м/с)	Штормовой прилив фт (м)
Пятая	≥156 (≥70)	>18 (>5,5)
Четвертая	131-155 (58-70)	13-18 (3,8-5,5)
Третья	111-130 (49-58)	9-12 (2,6-3,8)
Вторая	96-110 (43-49)	6-8 (1,7-2,6)
Первая	74-95 (33-43)	4-5 (1,0-1,7)
Тропические циклоны доураганной силы		
Тропический шторм	39-73 (17-33)	0-3 (0-1,0)
Тропическая депрессия	0-38 (0-17)	0 (0)

Рис. 2. Шкала ураганов Саффира-Симпсона (на основе скорости ветра, усредненной за 1-минутный период на высоте 10 м над поверхностью океана).

Источник: <https://maglipogoda.ru/shkaly-tropicheskikh-ciklonov/>

В настоящее время наблюдается рост как числа, так и разрушительной силы таких катастрофических явлений. Примерами последних лет могут служить ТЦ:

Категория 3

- Зета (2020),
- Грейс (2021);

Категория 4

- Лаура (2020),
- Ета (2020),
- Йота (2020),
- Ида (2021);

Категория 5

- Ирма (2017)
- Дориан (2019).

Исследования и наблюдения показывают, что в рамках сценария глобального потепления при высоком уровне выбросов изменение климата приведет к повышению уровня моря не только в связи с повышением уровня мирового океана, но и в связи с учащением штормовых явлений. При этом уровень штормовых нагонов возрастет в среднем примерно на 15 % к 2100 году. (Mokhov et al, 2020; Vousdoukas et al, 2016)

При описании динамики циклонов необходимо учитывать большое количество внешних факторов.

Детальное моделирование таких кризисных явлений требует решения сложной нелинейной системы уравнений гидродинамики с большим количеством параметров, что возможно только при использовании мощнейших суперкомпьютеров.

В связи с этим представляет интерес построение и исследование упрощённых моделей, которые тем не менее были бы пригодны для приближённого описания этих процессов.

В частности, в работах (*Ярошевич М.И., Ингель Л.Х 2004, 2006*) была предложена так называемая нелинейная малопараметрическая модель (НМПМ), представляющая собой систему связанных нелинейных дифференциальных уравнений для максимальной скорости ветра в ТЦ и температуры поверхности океана в зоне тайфуна. НМПМ позволяет описать формирование ТЦ из слабой тропической депрессии с последующим усилением его интенсивности до уровня тайфуна. После обобщений и дальнейшего развития этой модели в работах (*Ерохин Н.С. и др. 2008, 2011*), (*Erokhin et al. 2015*), стало возможным описывать процессы зарождения ТЦ, развития и последующего затухания в связи с выходом на побережье.

Затем были предложены обобщения этой модели для изучения полного жизненного цикла тропических циклонов от момента зарождения до затухания вследствие выхода в область, где вода более холодная, или на материк, а также для исследования возможности одновременного существования в заданном регионе двух ТЦ и их конкуренции

Обобщенная нелинейная модель содержит свободные параметры, которые могут зависеть от времени, и их выбором можно в значительной степени управлять временной динамикой регионального циклогенеза, например, менять количество образующихся в заданном регионе тайфунов 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 (*Ерохин Н.С. и др. 2008; Erokhin et al. 2015*).

Вполне очевидно, что развиваемый на основе МПМ подход с учетом данных наблюдений по параметрам крупномасштабных возмущений типа ТЦ позволяет получить достаточно простую модель описания сезонного хода РКЦ в каждом регионе, что 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 изменений климата в рамках теории глобального потепления на динамику регионального циклогенеза.

ТЕОРИЯ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Согласно работам (Ярошевич М.И., Ингель Л.Х 2004, 2006), (Ерохин Н.С. и др. 2008, 2011), (Erokhin et al. 2015), уравнения нелинейной малопараметрической модели НМПМ имеют вид :

$$\frac{dV}{dt} = \gamma(T - T_c)V - \mu V^2 \quad \frac{dT}{dt} = -b(T - T_1)V^2 + \frac{(T_f - T)}{\tau} \quad (1)$$

$V(t)$ – максимальная скорость ветра, m/s ;

$T(t)$ – температура поверхности океана в $^{\circ}C$

τ - характерное время (в сутках) изменения температуры поверхности океана.

$T_1 = 23^{\circ}C$ – температура холодной воды, поднимающейся к поверхности океана,

$T_c = 26.5^{\circ}C$ - критическая температура поверхности, необходимая для образования ТЦ, она может зависеть от региона (Покровская и Шарков, 2001)

$T_f(t)$ – фоновая температура поверхности океана, в которую включено влияние всех внешних факторов, включая нагрев поверхности океана из-за глобального потепления.

Один ТЦ: Фоновую температуру $T_f(t)$ при расчетах динамики одного ТЦ будем моделировать следующей функцией (отметим, что этот выбор не является единственным):

$$T_f(t) = T_0 + \delta T_f(t)$$

$$\delta T_f(t) = \delta T_1 \cdot \left[1 + th \left(\frac{t-t_1}{\tau_1} \right) \right] - \delta T_2 \cdot \left[1 + th \left(\frac{t-t_2}{\tau_2} \right) \right] + c \quad (2)$$

τ_1, τ_2 - характерные времена изменения температуры $\delta T_f(t)$, где $t_1 < t_2$

Отметим, что в зоне зарождения тайфуна температура $T_f(t)$ сначала возрастает на $2 \cdot \delta T_1$, и при превышении порогового значения начинается крупномасштабная 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 его затуханию .

В НМПМ можно также менять начало и конец активного сезона, число возникающих тайфунов и штормов в этот период и их характеристики.

Случай N ТЦ:

$$\delta T_f(t) = G(t) \cdot \sum_{n=1}^N \left\{ \delta T_{n1} \cdot \left[1 + th \left(\frac{t-t_{n1}}{\tau_{n1}} \right) \right] - \delta T_{n2} \cdot \left[1 + th \left(\frac{t-t_{n2}}{\tau_{n2}} \right) \right] \right\} + c$$

$$G(t) = 1 + \sigma \cdot \sin \left(\frac{2\pi t}{\tau} \right) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАБИЛЬНОЙ ФОНОВОЙ СИТУАЦИИ

Для моделирования циклогенеза был выбран профиль фоновой температуры со следующими параметрами :

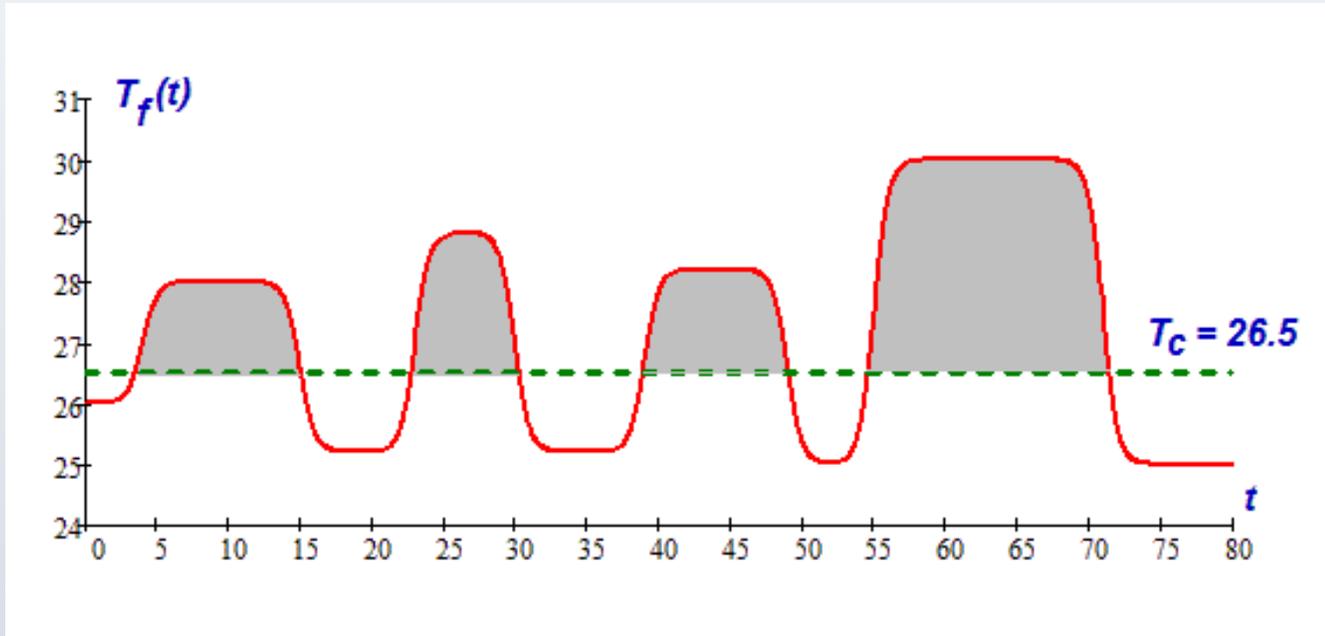


Рис.3. Фоновая температура поверхности океана $T_f(t)$ в °C для стабильной фоновой ситуации, $(\sigma = 0, c = 0)$ – красная линия. Зелёный пунктир соответствует критической температуре $T_c = 26,5$ °C. Серым цветом показаны области, где возможно зарождение Тропических циклонов, т.е. где выполнено условие $T_f(t) > T_c$.

$$\begin{aligned} \gamma &= 1, \mu = 3 \cdot 10^{-3}, b = 9 \cdot 10^{-4}, \\ \tau &= 0.25, T_c = 26.5, T_1 = 23, \delta T_{11} = 1, \\ \delta T_{12} &= 1.4, \delta T_{21} = 1.8, \delta T_{22} = 1.8, \\ \delta T_{31} &= 1.5, \delta T_{32} = 1.6, \delta T_{41} = 2.5, \\ \delta T_{42} &= 2.5, \tau_{n1} = \tau_{n2} = 1, t_{11} = 4, \\ t_{12} &= 15, t_{21} = 23, t_{22} = 30, t_{31} = 39, \\ t_{32} &= 49, t_{41} = 55, t_{42} = 71. \end{aligned}$$

Система уравнений (1) интегрировалась для следующих начальных условий:

$$V(0) = 0.3, T(0) = 26$$

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАБИЛЬНОЙ ФОНОВОЙ СИТУАЦИИ

Были смоделированы четыре тропических циклона с разным временем жизни: ТЦ1 -11 дней, ТЦ2 -7 дней, ТЦ3-9 дней и ТЦ4 -16 дней, и соответствующим различным категориям по шкале Сапфира-Симпсона.

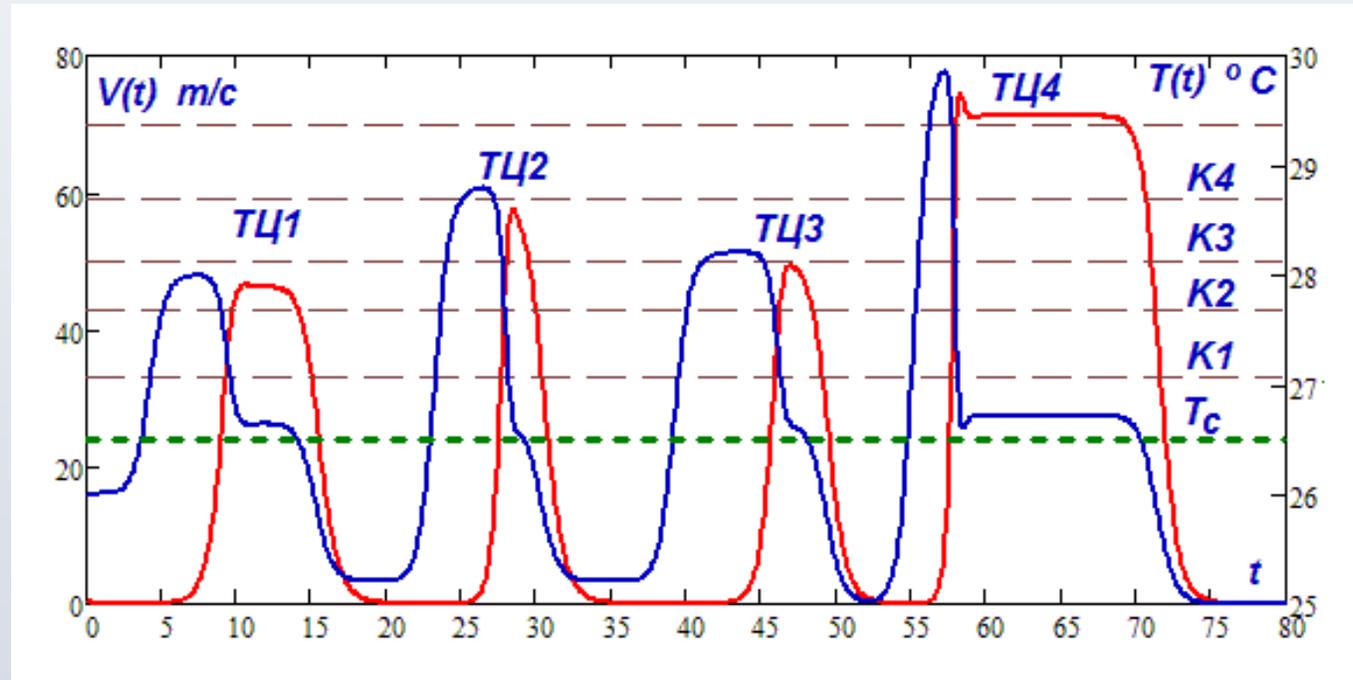


Рис.4. Моделирование ТЦ при стабильной фоновой обстановке и без нагрева поверхности океана ($\sigma = 0$, $c = 0$). Красным показаны профили скорости ветра $V(t)$ в м/с, (левая ось), синяя кривая и правая ось соответствуют температуре поверхности океана $T(t)$ в $^{\circ}\text{C}$. Коричневые пунктирные линии показывают категории ураганов $K1 - K5$ согласно шкале Сапфира-Симпсона. Зелёный пунктир соответствует критической температуре поверхности океана $T_c = 26,5^{\circ}\text{C}$

УЧЁТ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА

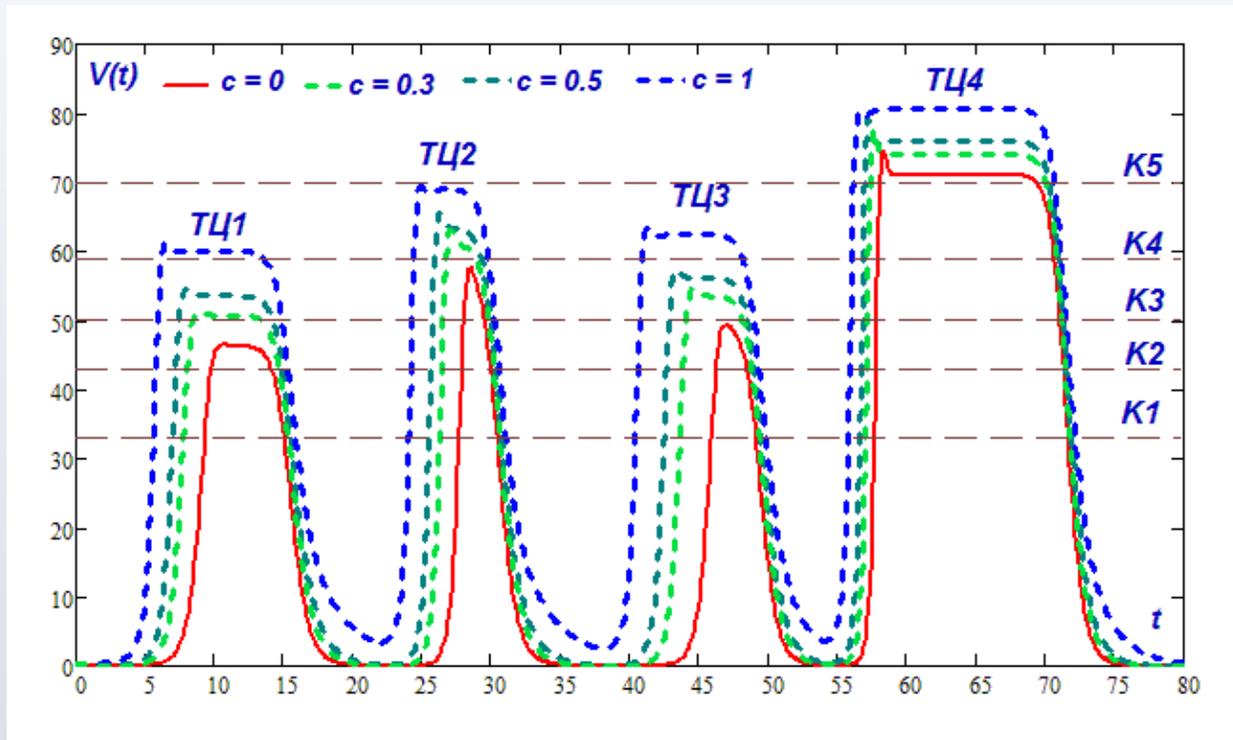


Рис. 5. Временная динамика скорости ветра $V(t)$ в m/s при параметре нестационарности $\sigma = 0$, $c = 0$ (отсутствие нагрева) – красная линия; $\sigma = 0$, $c = 0.3$, ($+0.3^{\circ}C$) – салатовая $\sigma = 0$, $c = 0.5$, ($+0.5^{\circ}C$) – зелёная пунктирная линия; $\sigma = 0$, $c = 1.0$, ($+1^{\circ}C$) – синяя пунктирная линия. Коричневые пунктирные линии показывают категории ураганов $K1 - K5$ согласно шкале Саффира-Симпсона.

На рисунке 5 показаны сравнительные изменения профилей скорости ветра в зависимости от величины нагрева поверхности океана (на $0^{\circ}C$, $0.3^{\circ}C$, $0.5^{\circ}C$ and $1^{\circ}C$) без учёта эффектов нестационарности. За учёт нагрева в уравнениях отвечает параметр c . При моделировании указанным значениям нагрева поверхности соответствуют значения $c = 0$, $c = 0.3$, $c = 0.5$, $c = 1$.

Видно, что при увеличении нагрева все ТЦ переходят в более высокие категории, например, при нагреве на $1^{\circ}C$, ТЦ2 из верхней границы категории $K3$ оказывается на нижней границе $K5$. К тому же увеличивается время жизни ТЦ малой и средней длительности и появляется явно выраженное плато, характеризующее развитую стадию жизненного цикла ураганов.

УЧЁТ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА

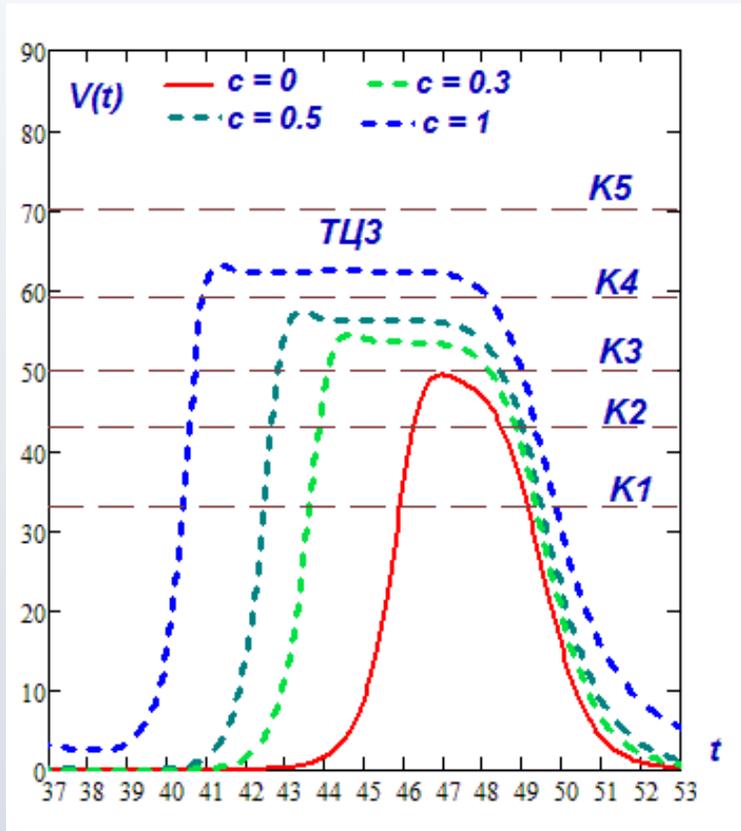
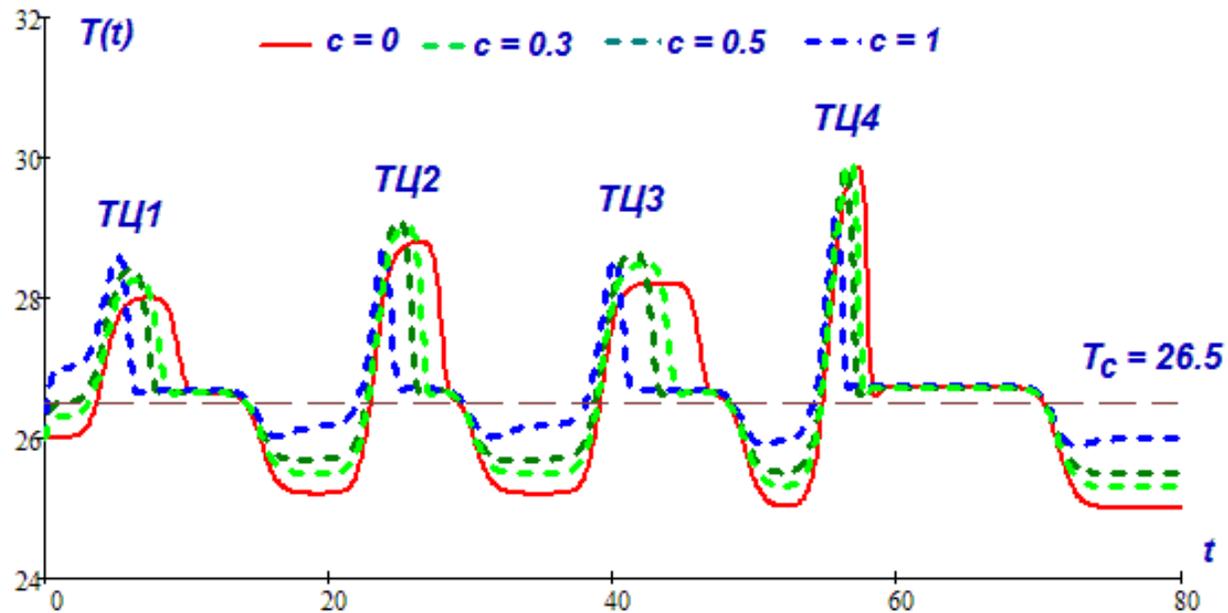


Рис. 6. Временная динамика скорости ветра $V(t)$ в m/s для ТЦЗ при параметре нестационарности $\sigma = 0$, $c = 0$ (отсутствие нагрева) – красная линия; $\sigma = 0$, $c = 0.3$, ($+0.3^{\circ}C$) – салатовая; $\sigma = 0$, $c = 0.5$, ($+0.5^{\circ}C$) – зелёная пунктирная линия; $\sigma = 0$, $c = 1.0$, ($+1^{\circ}C$) – синяя пунктирная линия. Коричневые пунктирные линии показывают категории ураганов $K1 - K5$ согласно шкале Саффира-Симпсона.

Для самого слабого тайфуна ТЦЗ при нагреве поверхности на $0.3^{\circ}C$ и $0.5^{\circ}C$ максимальная скорость ветра увеличивается на 5 и $8 m/s$ соответственно, и с верхней границы $K2$ он переходит в категорию $K3$ по шкале Саффира-Симпсона; в случае нагрева на $1^{\circ}C$ максимальная скорость ветра в ТЦЗ составит примерно $62.3 m/s$, а прирост скорости будет $\Delta V \approx 13.8 m/s$

Также заметно резкое увеличение времени жизни ТЦЗ, что характеризуется появлением плато на развитой стадии жизненного цикла

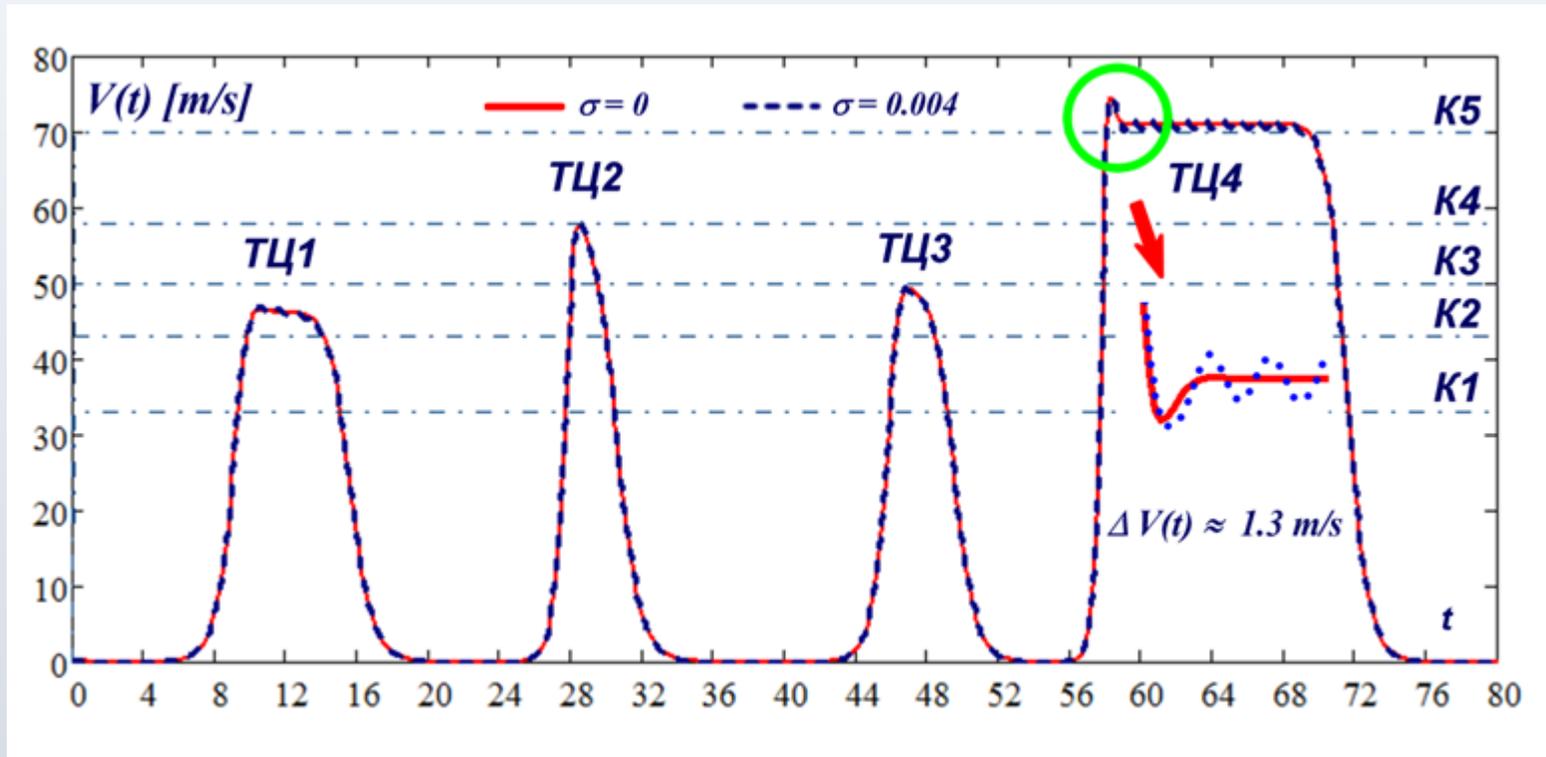
УЧЁТ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА



Таким образом можно видеть, что глобальное потепление и связанное с ним повышение температуры океана даже на 0.3°C - 1°C приводит к образованию циклонов более высоких категорий по шкале Саффира-Симпсона, а также к увеличению длительности их активной фазы

Рис. 7. Временная динамика температуры поверхности океана $T(t)$ (в $^{\circ}\text{C}$) в области смоделированных ТЦ при параметре нестационарности $\sigma = 0$, $c = 0$ (отсутствие нагрева) – красная линия; $\sigma = 0$, $c = 0.3$, ($+0.3^{\circ}\text{C}$) – салатовая $\sigma = 0$, $c = 0.5$, ($+0.5^{\circ}\text{C}$) – зелёная пунктирная линия; $\sigma = 0$, $c = 1.0$, ($+1^{\circ}\text{C}$) – синяя пунктирная линия. Коричневый пунктир соответствует критической температуре поверхности океана $T_c = 26,5$ $^{\circ}\text{C}$

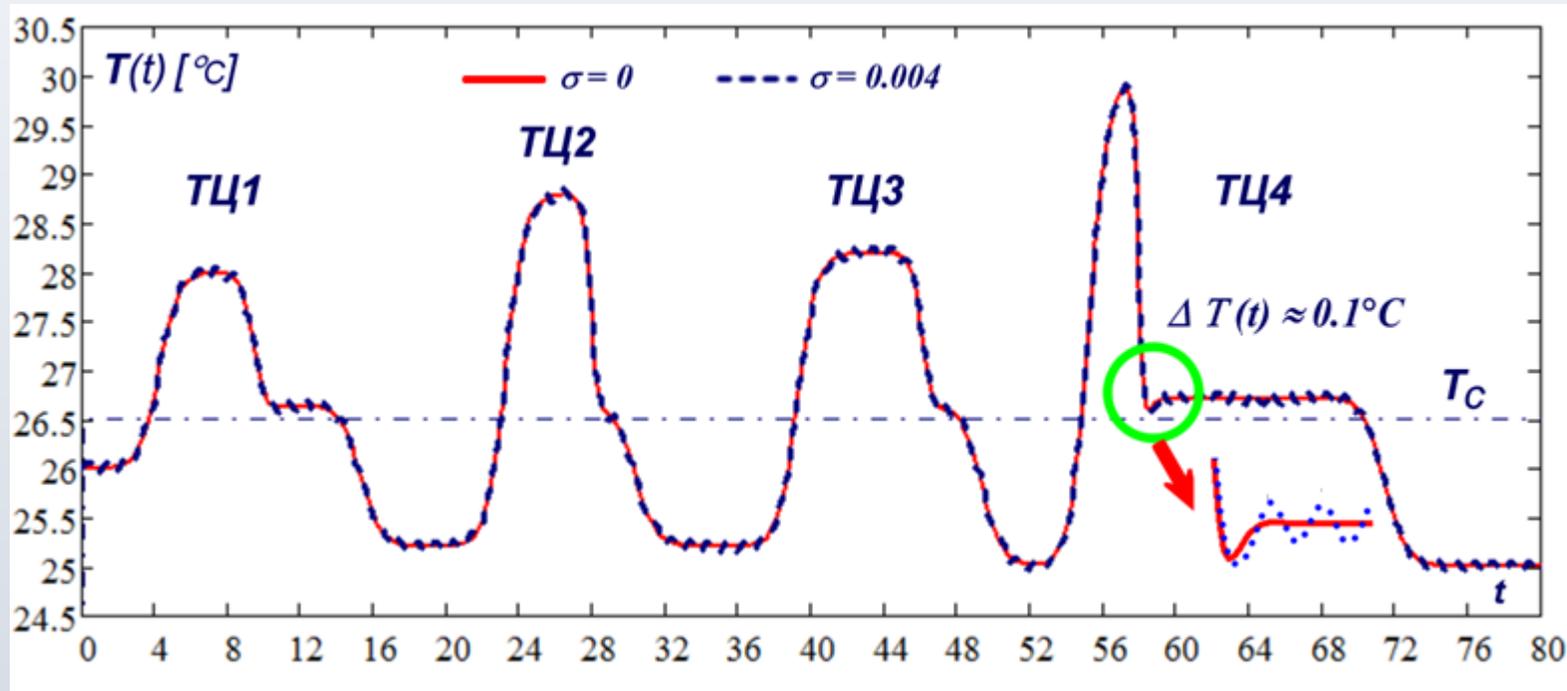
ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ (ДЕНЬ-НОЧЬ) ВАРИАЦИЙ ФОНОВОЙ ОБСТАНОВКИ



Рассматривалась временная динамика ТЦ в случае слабых суточных вариаций фоновой обстановки при отсутствии постоянного нагрева поверхности океана. В НМПМ-модели за нестационарность отвечает параметр σ . Для слабых колебаний фона мы выбрали $\sigma = 0.004$ и $c = 0$ (нагрев отсутствует).

Рис. 8 . Временная динамика скорости ветра $V(t)$ в м/с при параметре нестационарности $\sigma = 0.004$, и $c = 0$ — синий пунктир; случай $\sigma = 0$, $c = 0$ — красная кривая. Суточный размах изменения скорости ветра $\Delta V(t) \approx 1.3$ м/с.

ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ (ДЕНЬ-НОЧЬ) ВАРИАЦИЙ ФОНОВОЙ ОБСТАНОВКИ



Как видно из проведённых вычислений, 24-х часовые (день-ночь) слабые колебания фоновой обстановки практически не влияют на динамику циклонов.

Рис. 9 . Временная динамика температуры поверхности океана $T(t)$ в $^{\circ}\text{C}$ при параметре нестационарности $\sigma = 0.004$, и $c = 0$ – синий пунктир; случай $\sigma = 0$, $c = 0$ – красная кривая. Суточный размах изменения температуры $\Delta T(t) \approx 0.1^{\circ}\text{C}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Проведено дальнейшее обобщение нелинейной малопараметрической модели для описания влияния вариаций фоновой обстановки на динамику тропических циклонов и их жизненный цикл.
- Из численных расчётов следует, что при нагреве поверхности океана на $0.3 - 1$ °С, резко возрастает скорость ветра в тропических циклонах, а также возрастает длительность их развитой стадии. Таким образом в рамках малопараметрической модели показано, что глобальное потепление приводит к увеличению категории образовавшихся тропических циклонов и времени их жизни.
- Согласно расчётам, особенно сильно эффект нагрева поверхности океана влияет на более слабые вихри, что приводит к их переходу в более высокую категорию
- Показано, что слабые короткопериодные (день-ночь) колебания фоновой температуры океана практически не влияют на динамику развития ТЦ.
- Показано, что данная обобщенная малопараметрическая нелинейная модель позволяет исследовать особенности динамики региональных крупномасштабных циклогенезов в период активного сезона, а также изучать их зависимость от различных внешних факторов, например, вариаций космической погоды и др., которые ранее рассматривались на основе стандартного метода корреляционного анализа.
- Малопараметрическая нелинейная модель - полезный инструмент для прогнозирования продолжительности жизни и интенсивности тропических циклонов, что соответствует последним наблюдениям.

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. *Н.С.Ерохин, Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А.* Химическая физика тропического циклогенеза. *Химическая физика*, 2011, т.30, № 5, с. 80-83.
3. *Покровская И.В., Шарков Е.А.* Тропические циклоны тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 2.1 (1983-2000). // М.: Полиграф сервис, 2001. 548 с.
4. *Ярошевич М.И., Ингель Л.Х.* // Тропический циклон как элемент системы океан- атмосфера. ДАН, 2004. Т.399. № 3. С.397-400.
5. *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.
6. *Erokhin, N.S., Zolnikova, N.N., Mikhailovskaya, L.A., Shkevov R.* Small parametric non-linear model to study the features of regional large-scale cyclogenesis. // *Sun and Geosphere*, 2009. V 4(1), P. 13-15
7. *I. I. Mokhov, A. V. Chernockulsky, I. A. Repina.* Climate Change: Causes, Risks, Consequences, Problems of Adaptation and Management. 2020 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **606** 011001
8. *Vousdoukas, M.I., Voukouvalas, E., Annunziato, A., Giardino, A., Feyen, L.* Projections of extreme storm surge levels along Europe. *Climate Dynamics* (2016) 47: 3171. doi:10.1007/s00382-016-3019-5

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

**Работа выполнена в рамках сотрудничества
между ИКИ РАН и SRTI-BAS, проект
СЕРФОТРОН**