

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



***АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА МОРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ***

**Н.Н. Зольникова<sup>1</sup>, Н.С. Ерохин<sup>1</sup>, Л.А. Михайловская<sup>1</sup>, Р. Шкевов<sup>2</sup>**

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

***e-mail: [nzolnik@iki.rssi.ru](mailto:nzolnik@iki.rssi.ru),  
[nerokhin@mx.iki.rssi.ru](mailto:nerokhin@mx.iki.rssi.ru)***

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

14 - 18 ноября 2022 г., Москва, ИКИ РАН

Изменения климата в последних десятилетиях и в частности повышения температуры поверхности океана приводит к повышению количества и интенсификации циклогенезиса крупномасштабных вихревых процессов в атмосфере Земли.

Анализ влияния повышения температуры поверхности океана на крупномасштабные вихревые процессы в атмосфере Земли, такие как тропические депрессии, штормы и тропических циклонов (ТЦ), являются важной частью исследований природных опасностей и изменения климата Земли. Характерные скорости ветра для тропических циклонов разных категорий приведены в Таблице 1. Оказывается, что временная динамика и вихревая интенсификация тропических депрессий до уровня тайфунов достаточно хорошо описывается сильно упрощенной нелинейной моделью, смотри работы [1], [2]. Позднее была предложена обобщенная малопараметрическая нелинейная модель (МПНМ) [3], [4]. Последующее развитие этой модели [5], [7], [8] включало учет таких факторов как изменение экологической обстановки, изменение температуры поверхности океана, возможность многократной генерации тропических циклонов в пределах данного региона и введение эффективных источников атмосферных возмущений, обусловленных солнечно-земными связями и в частности вариации солнечной радиации и др. Этими проблемами занимались и другие исследователи [6], [9-12], [17-20].

Таблица 1. Классификация тропических циклонов и подобных явлений - Шкала Саффира-Симпсона (ШСС) [11-13].

<b>Шкала Саффира-Симпсона</b>				
<b>Категория тропического циклона</b>	<b>Скорость ветра (за 1-минуту максимальный устойчивый ветер)</b>			
	м/с	узел (уз)	миль/ч	км/ч
Пятая (К5)	$\geq 70$ м/с	$\geq 137$ уз	$\geq 157$ миль/ч	$\geq 252$ км/ч
Четвертая (К4)	58–70 м/с	113–136 уз	130–156 миль/ч	209–251 км/ч
Третья (К3)	50–58 м/с	96–112 уз	111–129 миль/ч	178–208 км/ч
Вторая (К2)	43–49 м/с	83–95 уз	96–110 миль/ч	154–177 км/ч
Первая (К1)	33–42 м/с	64–82 уз	74–95 миль/ч	119–153 км/ч
Тропический шторм	18–32 м/с	34–63 уз	39–73 миль/ч	63–118 км/ч
Тропическая депрессия	$\leq 17$ м/с	$\leq 33$ уз	$\leq 38$ миль/ч	$\leq 62$ км/ч

# ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

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  $^{\circ}C$

$\tau$  - 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.

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

$$T_f(t) = T_0 + \delta T_f(t) \quad (2)$$

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

$\tau_1, \tau_2$  - характерные времена изменения температуры  $\delta T_f(t)$ , где  $t_1 < t_2$

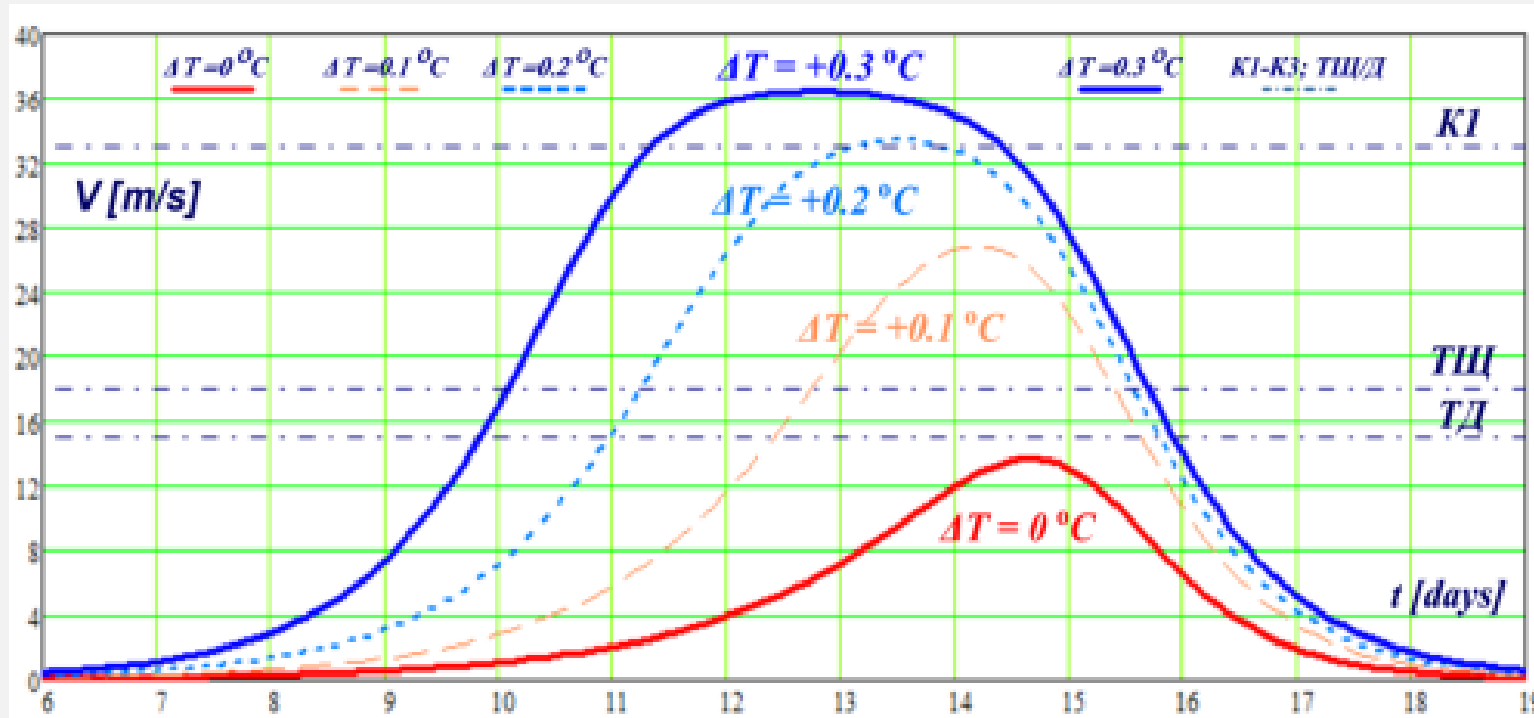
Отметим, что в зоне зарождения тайфуна температура  $T_f(t)$  сначала возрастает на  $2 \cdot \delta T_1$ , и при превышении порогового значения начинается крупномасштабная неустойчивость с генерацией ТЦ .

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 .

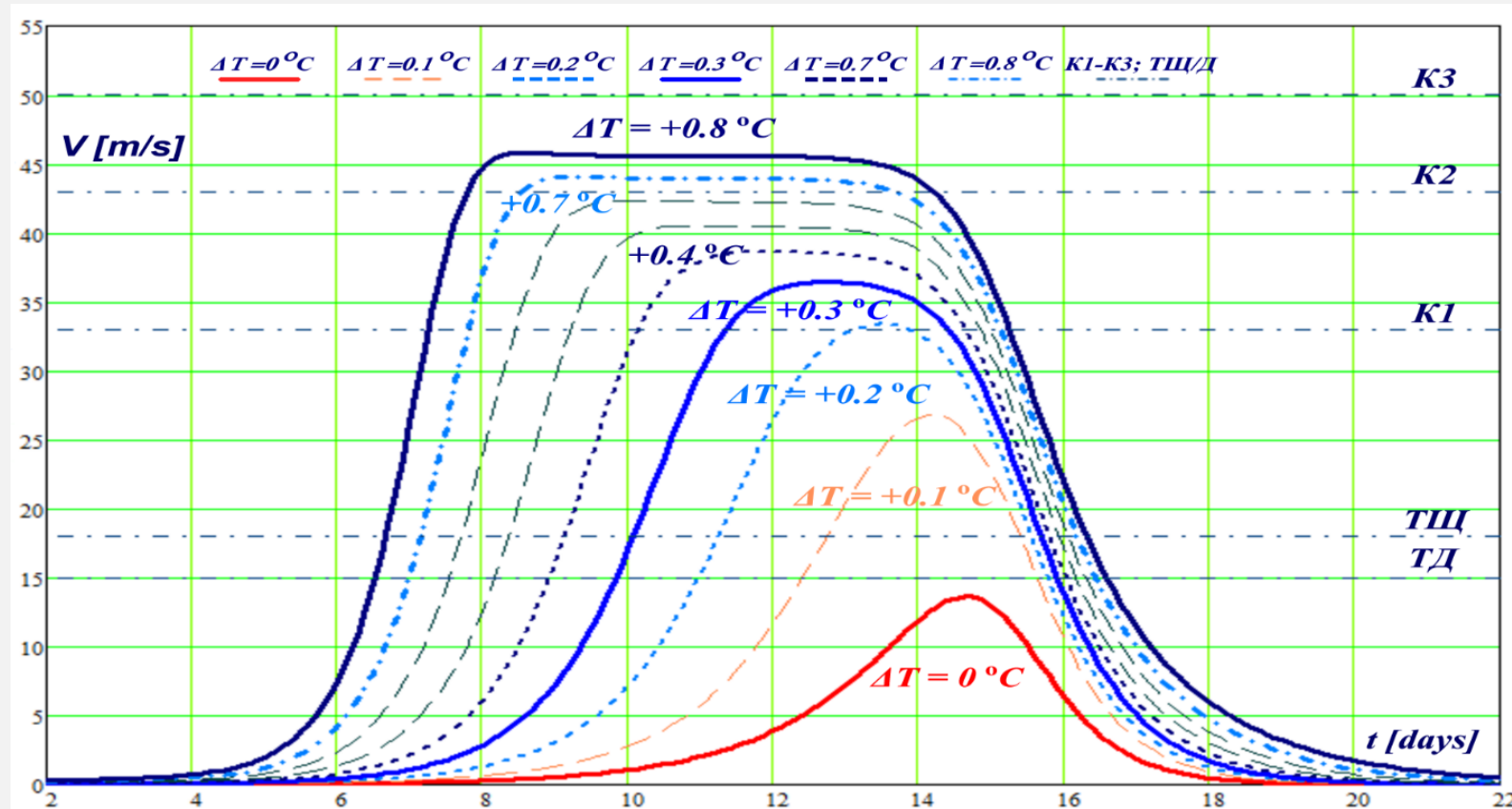
В НМПМ можно также менять начало и конец активного сезона, число возникающих тайфунов и штормов в этот период и их характеристики.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Мы исследуем динамику одной тропической депрессии (ТД) переходящей в тропический циклон (ТЦ) с временем жизни около 3 дней на уровне ТЦ первой категории (К1). Устойчивые скорости ветра ТЦ соответствуют категориям тропических циклонов согласно шкале ураганных ветров Саффира-Симпсона (ССШ)



**Рисунок 1** Результаты расчета динамики развития тропической депрессии (ТД,  $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ ) до тропического циклона первой категории (ТЦ, К1) с изменением фоновой температуры океана на  $\Delta T = 0.3^\circ\text{C}$  на основе малопараметрической модели тропического циклогенеза (МПМТЦ) представлена на Рисунке 1 для следующих значений параметров задачи:  $\gamma = 1$ ;  $\mu = 3 \cdot 10^{-3}$ ;  $b = 7 \cdot 10^{-4}$ ;  $\tau = 1$ ;  $\delta T_1 = 0.58$ ;  $\delta T_2 = 1.03$ ; с начальными условиями  $V(0) = 0.2$ ;  $T(0) = 26$ .



**Рисунок. 2.** Динамика развития тропического циклона (ТЦ) с учетом изменением фоновой температуры поверхности океана. Численные расчеты динамики силы ветра и изменение категории циклона на основе малопараметрической модели тропического циклогенеза шагом  $0.1^\circ\text{C}$  в интервале  $\Delta T = 0^\circ\text{C} \div 0.8^\circ\text{C}$ .

Численные расчеты на основе МПМТЦ показывают развитие ТЦ следующим образом:

- Тропическая депрессия (ТД) - этап 1 с максимальной скоростью ветра  $V_{\max} = 13.6$  м/с и временем жизни  $\approx 1$  день на уровне, близком к ТД с  $V_{\max} = 15$  м/с - этап 1.
- Тропический циклон первой категории (Рисунок 2, ТЦ-К1,  $\Delta T = 0.3^{\circ}$  С) по Шкале Саффира-Симпсона (ШСС) [11-13] с ( $V_{\max} = 33.4$  м/с) - этап 2.
- ТЦ второй категории с началом жизни как ТД на 7 день ( ТЦ-К2,  $\Delta T = 0.8^{\circ}$  С) с  $V_{\max} = 45.8$  м/с - этап 3
- Затухание ТЦ К2 - переход обратно в ТД на 17 день с  $V = 11.4$  м/с - этап 4.

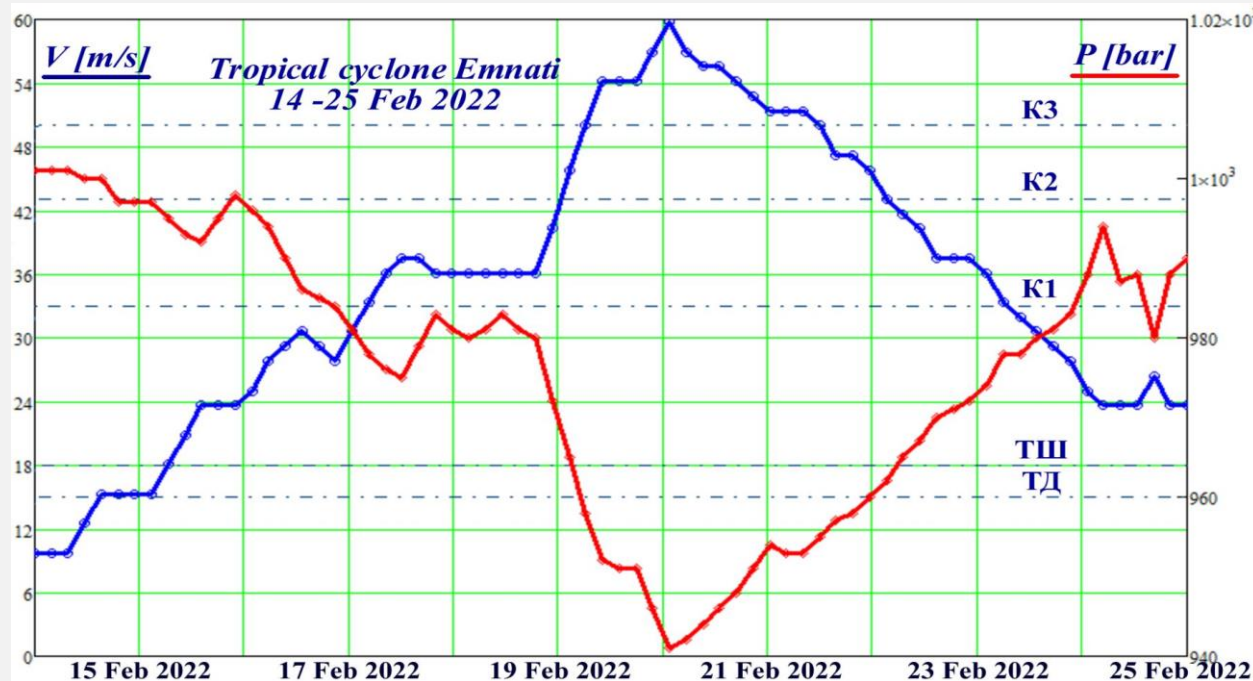
Таким образом, показано, что при нагреве поверхности океана на  $\Delta T = 0.8^{\circ}$  С, атмосферное возмущение, несколько меньшее по амплитуде, чем граница ТД, развивается в ТЦ К2 с временем существования порядка 10 дней (начало-конец) на уровне ТД с  $V = 15$  м/с (день 6.5:  $V = 15$  м/с; день 16.6:  $V = 15$  м/с).

Результаты показали что максимальная скорость ветра в зависимости от изменения температуры поверхности океана на основе МПНМ достигается на 8.5 день с  $V_{\max} = 45.8$  м/с, что соответствует второй категории по Шкале Саффира-Симпсона (ШСС). При дальнейшем увеличении температуры поверхности океана на  $0.9^{\circ}$  С или  $1.0^{\circ}$  С амплитуда ТЦ может достигнуть или превысить К3



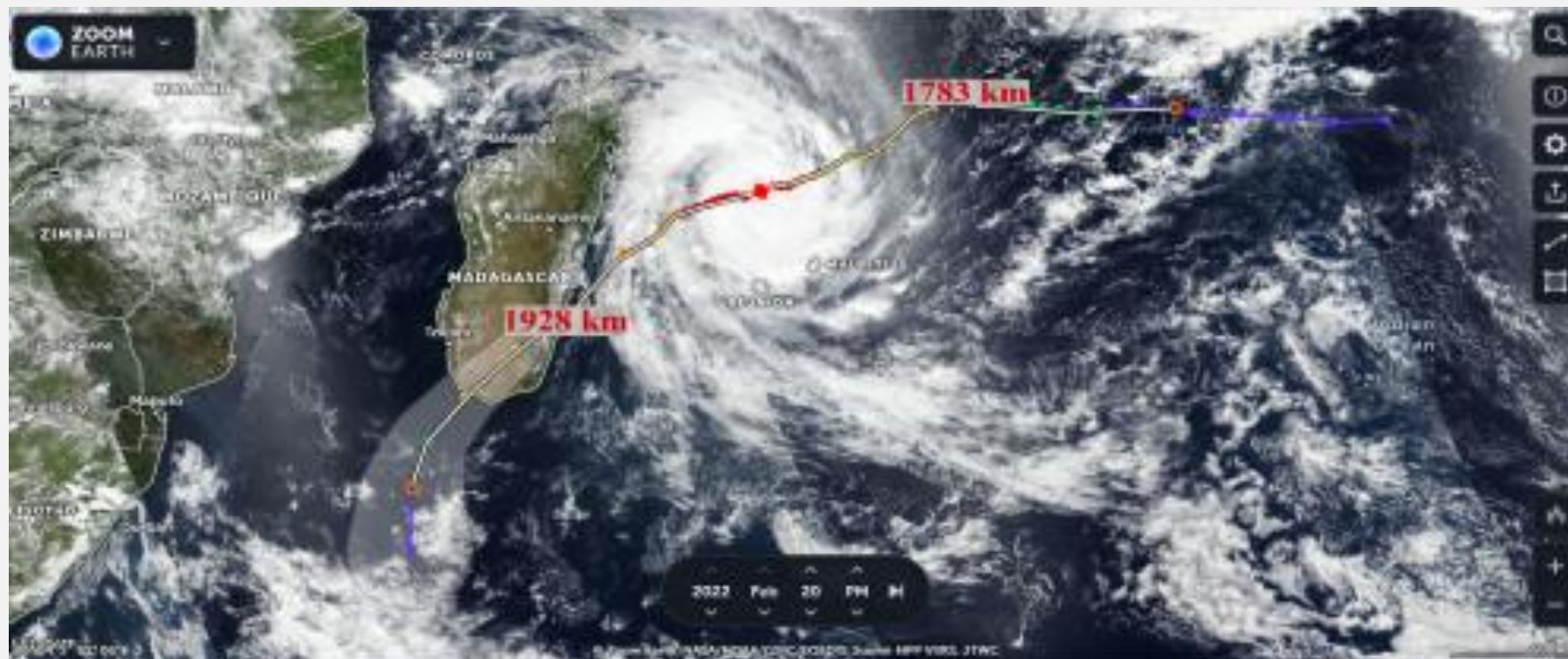
## АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЦИКЛОНА НА МОРСКОЙ ТРАНСПОРТ

В качестве примера для сравнения теоретических предсказаний с данными метеорологических наблюдений был выбран тропический циклон Эмнати в Мозамбикском проливе, имевший место 14-23 февраля 2022г. Поскольку этот пролив является одной из главных транспортных артерий, соединяющих Индийский и Атлантический океаны, влияние циклона на движение судов оказалось очень существенным. Все данные и спутниковые изображения, представленные в данном разделе, получены из источников [14], [15], [16].



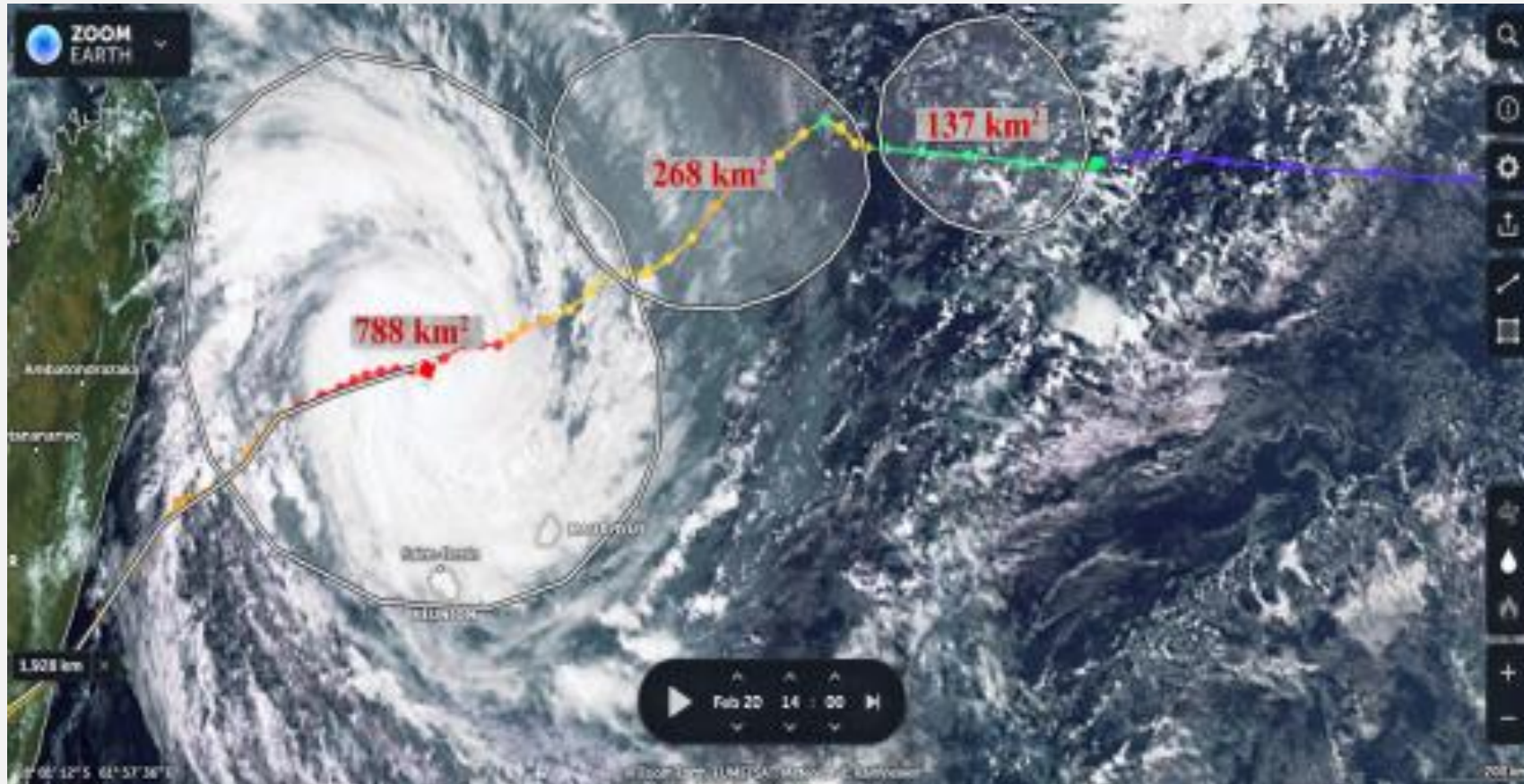
**Рисунок 3.** Максимальная скорость ветра  $V$  в [м/с] и давление  $P$  в [бар] во время жизни тропического циклона Эмнати - 14-23 февраля 2022г. [14], [15].

Эмнати зародился в 537 км к юго-юго-западу от Антананариву, Мадагаскар, и первые 6 часов перемещался на юго-запад со скоростью 33 км/ч (18 узлов). Затем Эмнати продолжил движение на юго-запад под влиянием субтропического хребта и достиг Мозамбикского пролива незадолго до 12-го часа существования. К 24 часу он сдвинулся южнее, огибая западный край субтропического хребта. Взаимодействие с пересеченной местностью, затем более низкие ( $24^{\circ}$  C) температуры поверхности моря и сильный 56 км/ч + (30 узлов +) сдвиг ветра, компенсируемый сильным оттоком к полюсу в Мозамбикском проливе, привели к постепенному снижению - до 85 км/ч (45 узлов) через 2 дня. При этом через 36 часов Эмнати начал субтропический переход и через 2 дня превратился в субтропическую систему с расширяющимся полем ветра. Информация предоставлена Объединенным центром предупреждения о тайфунах (Joint Typhoon Warning Center - JTWC) [14] и Zoom Earth [15].



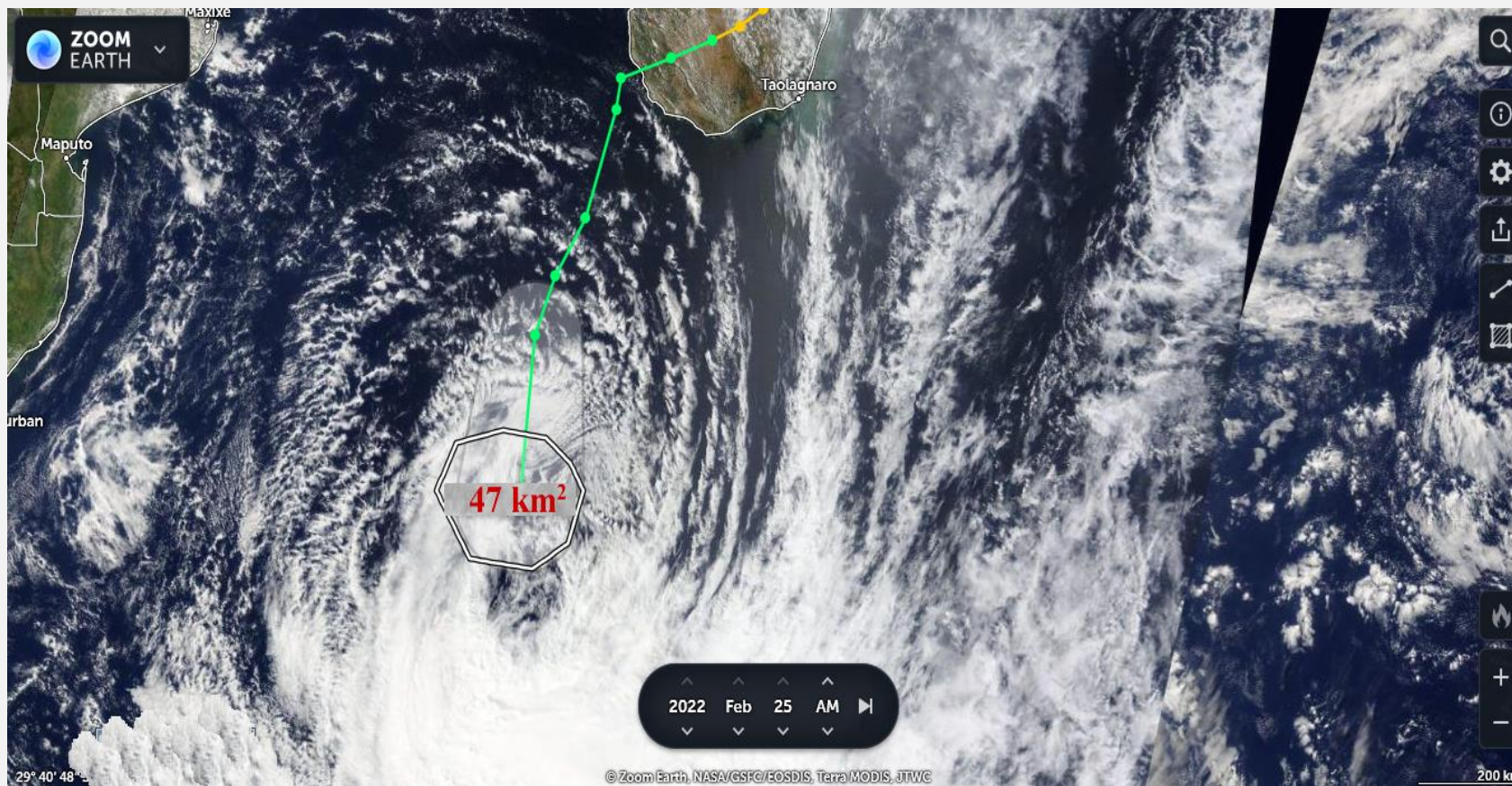
**Рисунок 4.** Траектория и длина пути тропического циклона Эмнати - 14-23 февраля 2022, циклон третьей категории, длина активной траектории 3711 km.





**Рисунок 5.** Временная динамика развития тропического циклона Эмнати - 14-23 февраля 2022. Показано нарастание площади активной зоны циклона охваченной сильными ветрами. Измерение площади показывает её сильный рост: 17.02.2022г. - 137 км<sup>2</sup>; 18.02.2022г. - 267 км<sup>2</sup> и 20.02.2022г. - 788 км<sup>2</sup>. Видно, что 20.02.2022г. ТЦ Эмнати достигает третьей категории (К3) по ШСС.

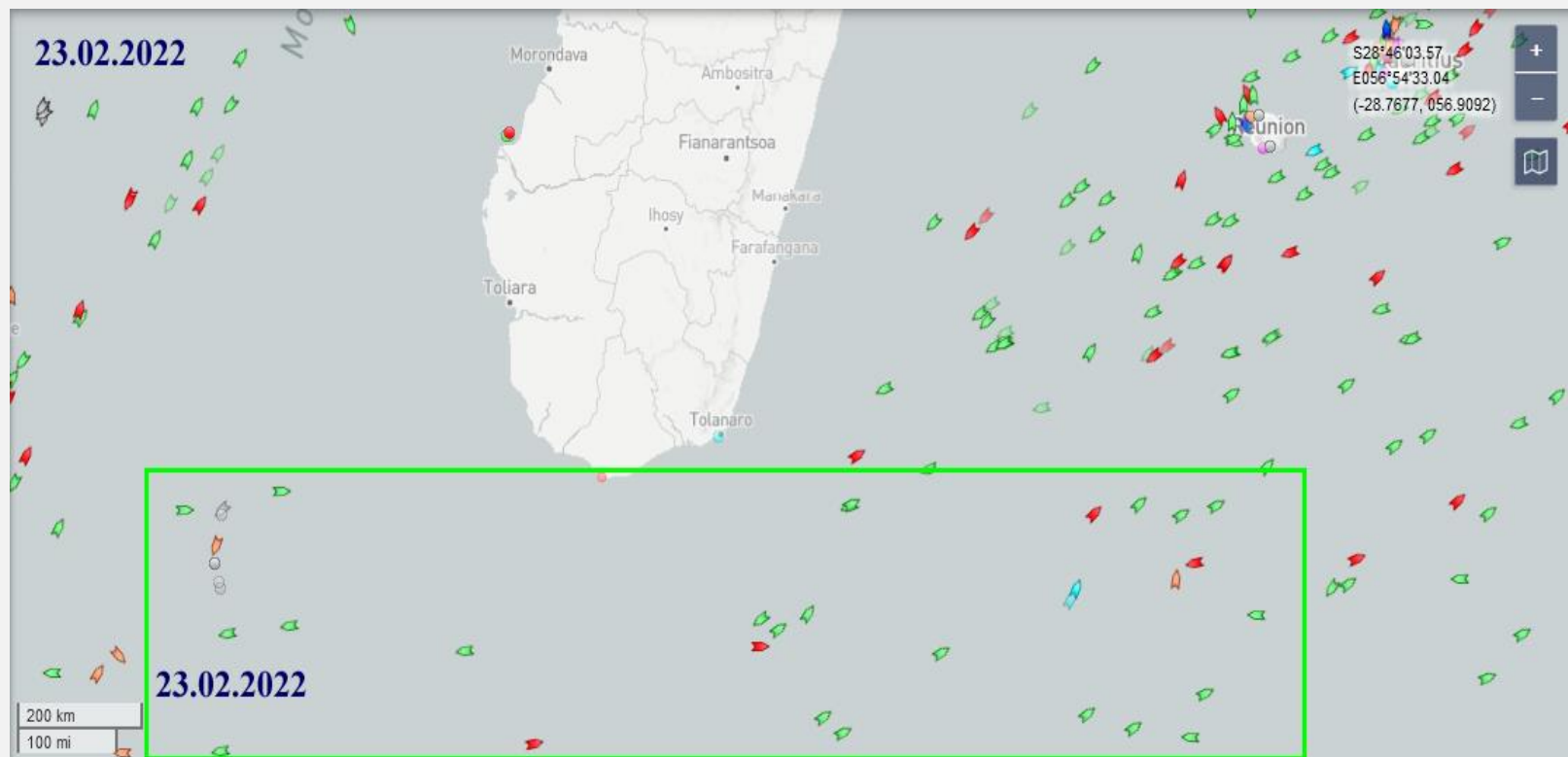




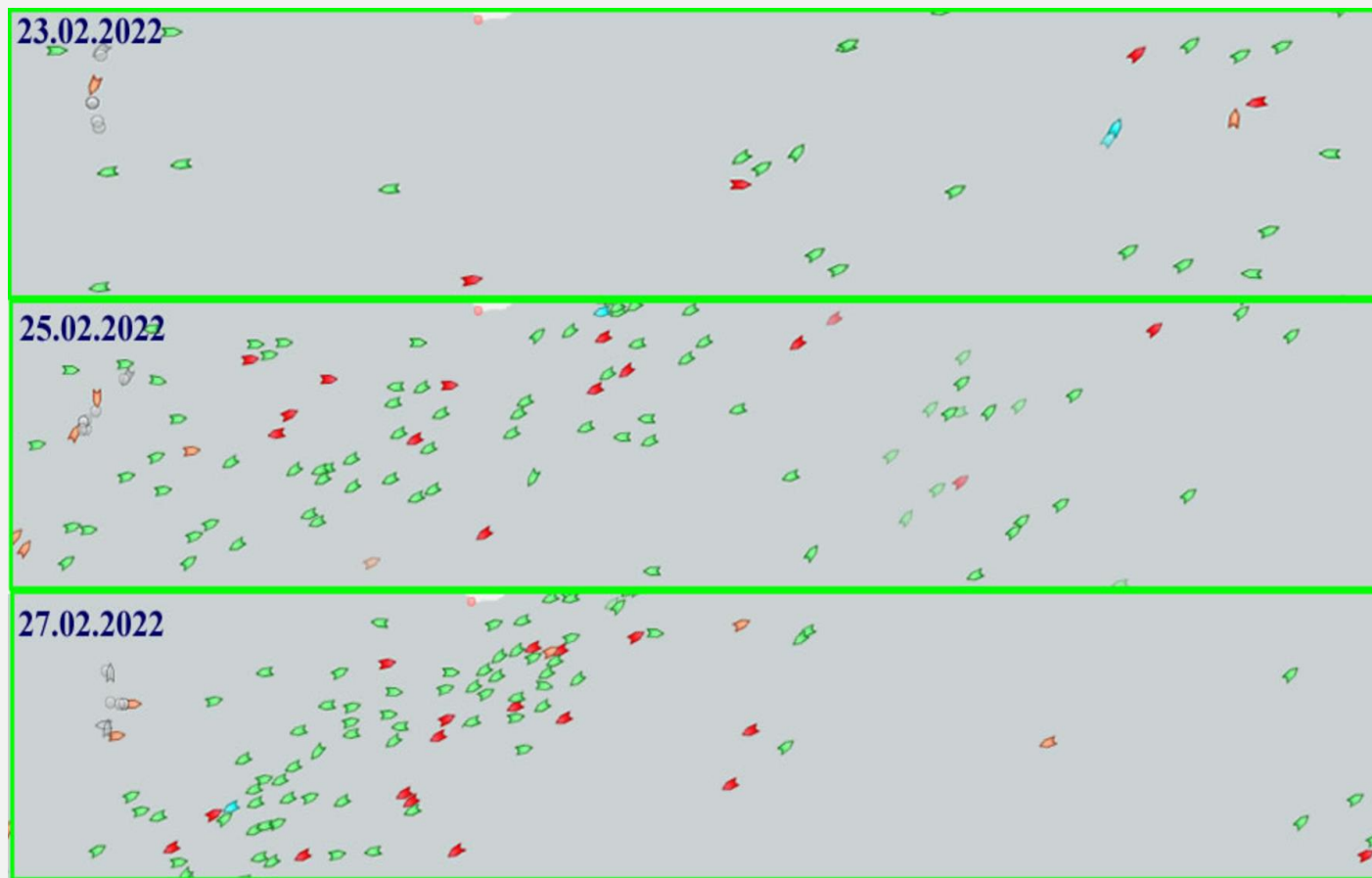
**Рисунок 6.** Затухание циклона Эмнати. Активная площадь на 25.02.2022 составляет 47 км<sup>2</sup>. ТЦ в этот период становится циклоном со статусом тропического шторма, скорость ветра снижается до  $V = 25$  m/s.

В целях определения влияния глобального потепления на морской транспорт, выбрана условная контрольная зона трафика, которая находится на пути ТЦ Эмнати, ограниченная зеленым прямоугольником на Рисунке 8. На основе данных с [16] на 23, 25 и 27.02.2022г. учитывались изменения трафика морского транспорта. В этот период времени велся пересчет количества судов в контрольной зоне. Как видно из Рисунков 8 и 10, на период прохождения ТЦ Эмнати 19-23 февраля через основной морской путь сквозь Мозамбикский пролив в направлении Индийского полуострова и обратно, движение судов было практически остановлено. Поток судов начинает нарастать 25-го февраля и к 27.02.2022 восстанавливается полностью.

При моделировании поведения ТЦ на основе МПНМ, показанном на Рисунке 2, видно, что при отсутствии нагрева поверхности океана -  $\Delta T = 0^{\circ} \text{C}$ , атмосферное возмущение, которое было ниже тропической депрессии с  $V_{\max} = 13.6 \text{ м/с}$ , вообще не дошло бы до ТЦ К1 или тем более К3.

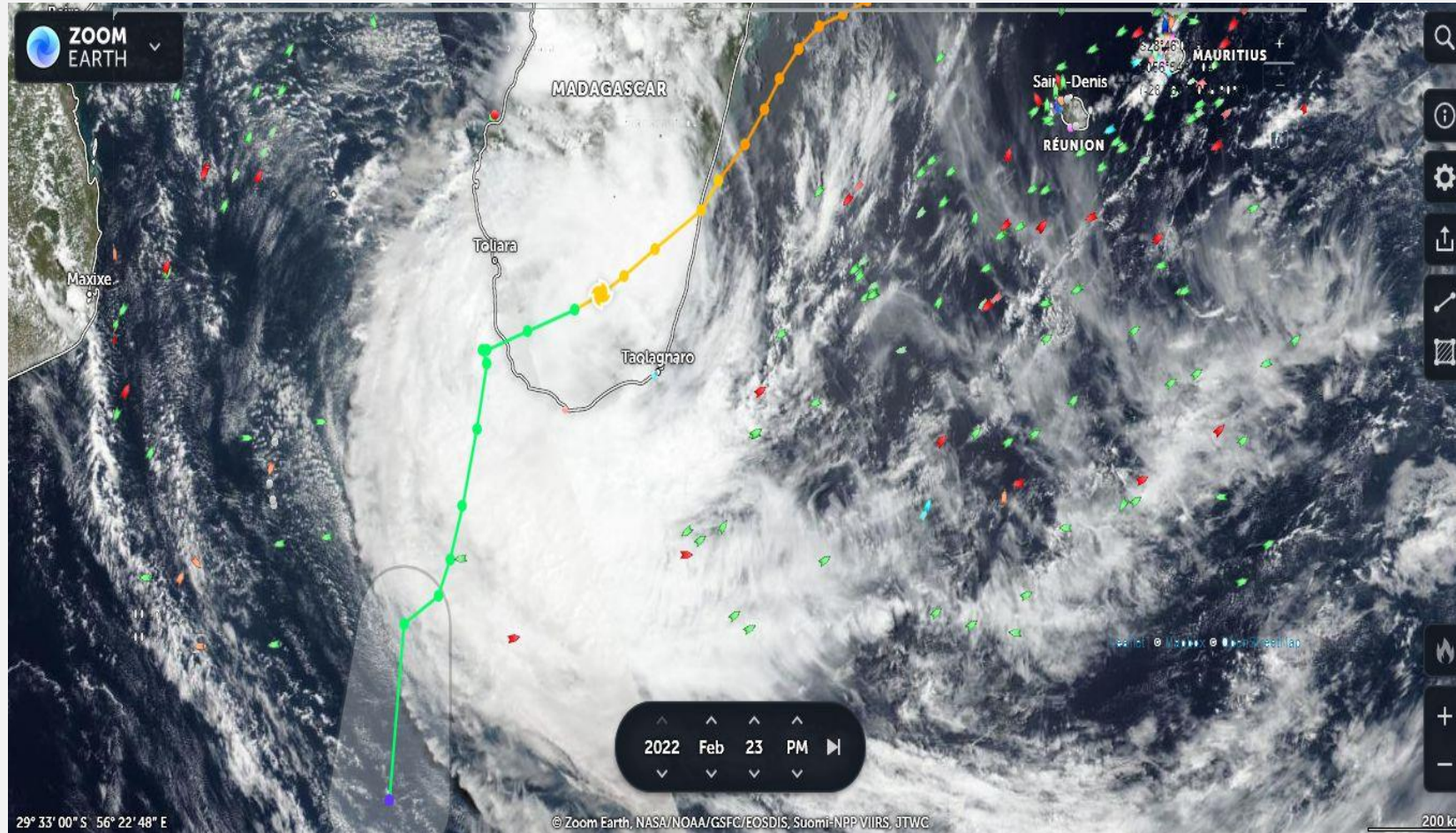


**Рисунок 7.** По данным [16] на 23.02.2022г. в условной контрольной зоне трафика, обозначенной зеленой линией находилось всего 37 кораблей. Как видно, в активной зоне циклона практически нет кораблей



**Рисунок 8.** Состояние в контрольной зоне трафика на 23, 25 и 27.02.2022 г. В ней соответственно находились 23.02.2022 - 37 кораблей; 25.02.2022 - 112 кораблей и на 27.02.2022 наблюдаются 111 кораблей. Очевидно восстановление трафика после 25.02.2022г.





**Рисунок 9.** На спутниковом изображении ТЦ Эмнати наложены данные трафика из [16]. Показано состояние трафика морского транспорта на 23.02.2022. На этот день (как видно из Рисунка 4) скорость ветра составляет  $V = 36 \text{ m/s}$  и соответственно ТЦ находится в первой категории по ШСС.



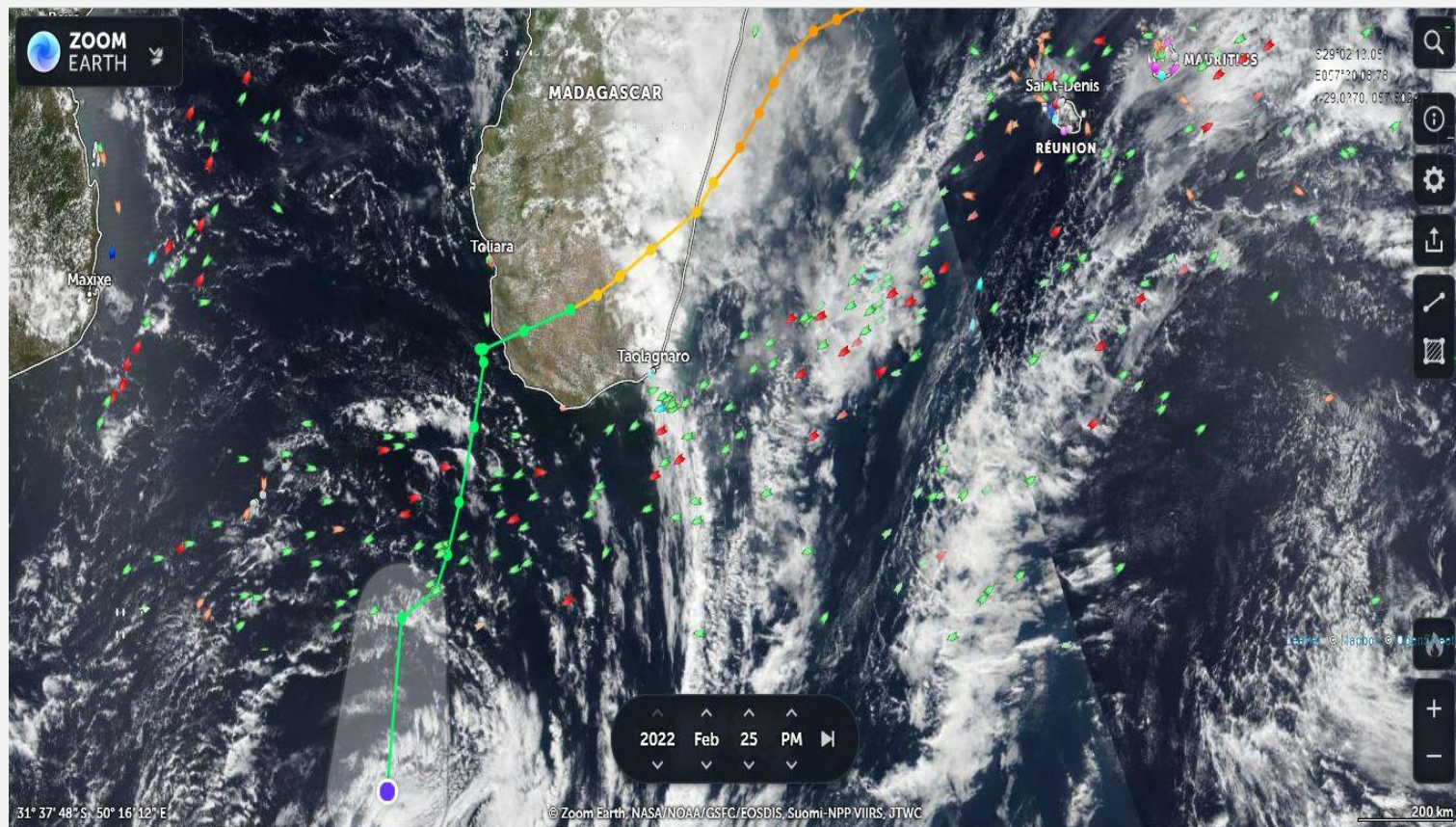
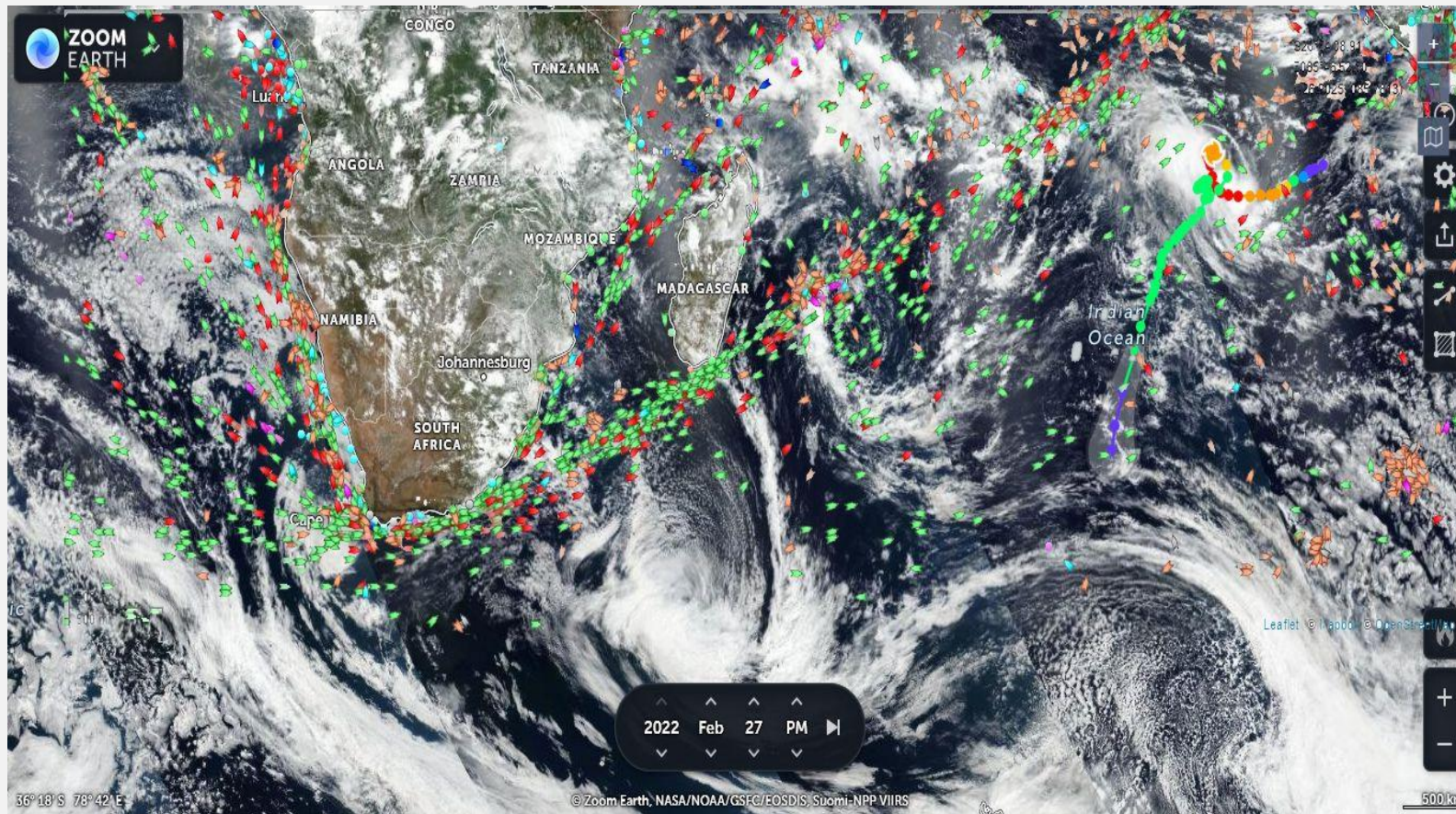


Рисунок 10. Восстановление движения морского транспорта после 25.02.2022г.





**Рисунок 11.** На 27.02.2022, по данным [14-16], движение морского транспорта после прохождения тропического циклона Эмнати 14-25.02.2022г. полностью восстановлен

Рисунок 10 показывает восстановление трафика морского транспорта после 25.02.2022г. Скорость ветра  $V = 24 \text{ m/s}$  и, соответственно, интенсивность ТЦ находится в зоне тропического шторма. Комплексное спутниковое изображение (Рисунок 11), полученное при помощи информации с [14-16], за 27.02.2022г. сделано в период сразу после прохождения тропического циклона Эмнати 14-25.02.2022г. На нем видно полное восстановление морского транспорта в этой зоне мирового океана.

При помощи информации выложенной на Рисунках 2—12 и на основе малопараметрической нелинейной модели тропического циклогенеза (МПНМ), используемой в качестве платформы для численного моделирования, показано влияние глобального потепления на морской транспорт. Анализы расчетов показали, что повышение температуры поверхности океана на  $0.3^{\circ} \text{C}$  приводит к вынужденному простоя морского транспорта как минимум на трое суток.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основе малопараметрической нелинейной модели (МПНМ) тропического циклогенеза, проведен анализ влияния глобального потепления на морской трафик. Из сделанных сопоставлении численных расчетов (Рисунки 2, 3, 4) с данными спутниковых изображений [14], [15] и положением судов в мировом океане [16] сделаны следующие выводы:

- Повышение температуры поверхности океана на  $\Delta T = 0.3^{\circ} C$  приводит к нарастанию силы ТД до ТЦ-К1 (Рисунок 2).
- При ТЦ-К1 в наблюдаемой контрольной зоне движение судов практически останавливается на три дня (Рисунки. 2, 3, 9) [14], [15].
- При сопоставлении результатов численных расчетов с данными ТЦ Эмнати - 14-23 февраля 2022г. наблюдается достаточно хорошее согласие.
- Продемонстрирована связь между глобальным потеплением и убытками в морских перевозках (Рисунки 2, 3, 4, 9, 10, 11).
- Доказано, что повышение температуры поверхности океана на  $\Delta T = 0.3^{\circ} C - 0.8^{\circ} C$  приводит к потерям за счет вынужденных простоев порядка трех-пяти суток.

Изучено влияние повышения температуры поверхности океана на глобальный морской транспорт. Представленная информация позволяет оценить возможные задержки судов и изменение их маршрутов из-за изменения атмосферных условия под влиянием глобального потепления и изменения климата.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. // Тропический циклон как элемент системы океан- атмосфера. ДАН, – 2004. – Т.399. № 3. – С.397-400.
2. 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.
3. Ерохин Н.С., Михайловская Л.А., Ерохин Н.Н., Научная сессия МИФИ-2007. Труды научной сессии 2007, Москва, – 2007. – Т.5. – С.72.
4. 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.
5. Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А. Химическая физика тропического циклогенеза. // Химическая физика, – 2011, – Т.30, № 5, – С. 80-83.
6. 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.
7. 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
8. Zolnikova, N., Shkevov, R., Erokhin, N., Mikhailovskaya, L., Sheiretsky K. and Nikolov H. Climate change: numerical simulations of tropical cyclones behavior in the context of the global warming. // Conference Proceedings, 11th Congress of the Balkan Geophysical Society, Oct 2021, Volume 2021, P.1-5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202149BGS76>
9. Mokhov, I. I., 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
10. 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
11. Saffir, H. S. Hurricane wind and storm surge. // The Military Engineer, – 1973. – V.65(423), – P. 4-5.
12. Simpson, R. H. and Saffir, H. The hurricane disaster potential scale. // Weatherwise. – 1974. – 27(8), – P.169–186.
13. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center URL: <https://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php> (дата обращения: 28.02.2022)
14. Joint Typhoon Warning Center - JTWC.URL: <https://www.metoc.navy.mil/jtwc/jtwc.html?tropical> (дата обращения: 28.02.2022)
15. Zoom Earth. URL: <https://zoom.earth/storms/emnati-2022/#layers=daily> (дата обращения: 28.02.2022)
16. URL: <https://www.marinetraffic.com/> (дата обращения: 28.02.2022)
17. Astafieva N.M., Raev M.D. Influence of a large-scale remote atmospheric environment on the trajectories of tropical cyclones // Modern problems of the Earth remote sensing from space. – 2010, – V.7, No 1, – P.61.
18. Pankov V., Gusev A., Pugacheva G., Voitskovsky M., Prokhin V., Martin I. Influence of solar activity on the tropical cyclogenesis in Western Pacific \ COSPAR-2006-A-01016. – 2006, Session C2.1-0049-06
19. Tinsley B.A. Influence of solar wind on the global electric circuit and inferred effects on cloud microphysics, temperature and dynamics in the troposphere // Space Science Reviews, – 2000. – V.94. P.231-258.
20. Tsiropoul S. Influence of solar activity variability in meteorological parameters // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, – 2003. – V.65. – P.469-482.