

# ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА», ИКИ РАН



Space Research Institute  
Russian Academy of  
Sciences



Space Research and  
Technology Institute  
Bulgarian Academy of  
Sciences

13 – 17 ноября 2023г., Москва, Россия

**Двадцать первая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН, 13 – 17 ноября 2023г., Москва**

## **Влияние глобального потепления на изменение климата в юго-западной зоне Черного моря**

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

*<sup>1</sup>Институт космических исследований и технологий, Болгарской академии наук, София, Болгария*

*<sup>2</sup>Институт космических исследований, Российской академии наук, Москва, Россия*

*e-mail: [shkevov@space.bas.bg](mailto:shkevov@space.bas.bg), [nzolnik@iki.rssi.ru](mailto:nzolnik@iki.rssi.ru)*

## Влияние глобального потепления на изменение климата в юго-западной зоне Черного моря

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

<sup>1</sup> *Институт космических исследований и технологий, Болгарской академии наук, София, Болгария*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований, Российской академии наук, Москва, Россия*

**Аннотация:** Изменение климата в условиях глобального потепления приводит к наблюдению неожиданных интенсивных явлений, нехарактерных для конкретных географических районов [1-3]. Квази-тропический средиземноморский циклон под названием «Даниэль» в период с 4 - 7 сентября 2023 года вызвал масштабные разрушения в ряде стран, через которые прошла его траектория [4-6]. В настоящей работе анализируются зарегистрированные результаты наблюдений квазитропического шторма, формировавшегося в северо-восточной периферии циклонного вихря в юго-западных районах Черного моря [7-9]. Особое внимание уделено району болгарского побережья южнее города Бургаса в период 4 - 6 сентября 2023 г. [10-13]. Проведенный анализ состоит из трех частей - численное моделирование на основе малопараметрической нелинейной модели тропического циклогенеза [14-20], результаты прогнозирования других моделей и зарегистрированные радиолокационные и спутниковые изображения на период развития шторма [7-13]. К анализу прилагаются и результаты прогноза двух численных моделей для соответствующего временного диапазона и географического региона [21,22]. Данные из Болгарской национальной гидрометеорологической сети на фактически зарегистрированное количество осадков, выпавших в регионе за период с 1 - 7 сентября 2023 года, приведены в работе для проведения корреляции с другими способами исследования [23-25]. Представлены спутниковые изображения в видимой части спектра для соответствующего временного диапазона [7-13]. Показана топология и динамика осадков на основе спутниковых радиолокационных изображений в сравнении с модельными прогнозами осадков [7-13]. Сделаны выводы о возможностях прогноза неожиданных интенсивных явлений, нехарактерных для конкретных географических регионов [7-20]. На основе проведенного анализа выдвинута гипотеза о том, что подобные квази-тропические штормы с максимальными значениями наблюдаемых осадков в юго-западных районах Черного моря являются результатом глобального потепления, приводящего к изменению климата в регионе.

## Квази-тропический шторм в юго-западных районах Черного моря



Разрушения южнее г. Бургаса в юго-западных районах Черного моря, вызванные квази-тропическим штормом, формировавшимся в северо-восточной периферии циклонного вихря «Даниель».

Фотографии [meteobalkans.com]

## ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Согласно работам [14-18], 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 [15].

$T_f(t)$  – 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):

$$T_f(t) = T_0 + \delta T_f(t), \quad \delta T_f(t) = \delta T_1 \cdot \left[ 1 + th \left( \frac{t-t_1}{\tau_1} \right) \right] - \delta T_2 \cdot \left[ 1 + th \left( \frac{t-t_2}{\tau_2} \right) \right] + c \quad (2)$$

$\tau_1, \tau_2$  - 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

Исследована динамика развития одной тропической депрессии (ТД) не переходящей в тропический циклон (ТЦ) с временем жизни около 2 дней на уровне тропической депрессии (ТД). Устойчивые скорости ветра ТД соответствуют категориям тропических циклонов согласно шкале ураганных ветров Саффира-Симпсона (ССШ) [4, 5, 9]

Таблица 1. Классификация тропических циклонов и подобных явлений. Шкала Саффира-Симпсона (ШСС) [4, 5, 9].

Шкала Саффира-Симпсона				
Категория тропического циклона	Скорость ветра (за 1-минуту максимальный устойчивый ветер)			
	м/с	узел (уз)	миль/ч	км/ч
Пятая (К5)	≥ 70 м/с	≥ 137 уз	≥ 157 миль/ч	≥ 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	≤ 17 м/с	≤ 33 уз	≤ 38 миль/ч	≤ 62 км/ч

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА (МПМТЦ)

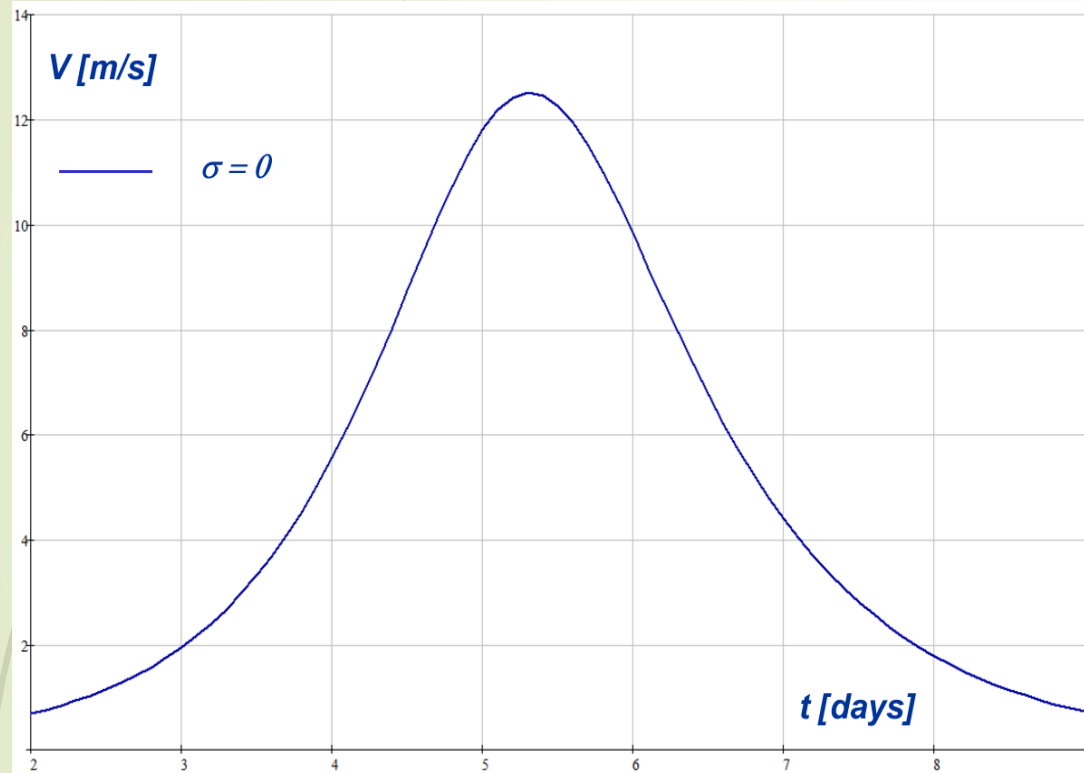


Рис.1. Численное моделирование скорости ветра на основе нелинейной малопараметрической модели тропического циклогенеза (МПМТЦ) при  $\sigma = 0$ ,  $V_{\max} / \sigma = 0 = 12.5 \text{ m/s}$ , [14-20].

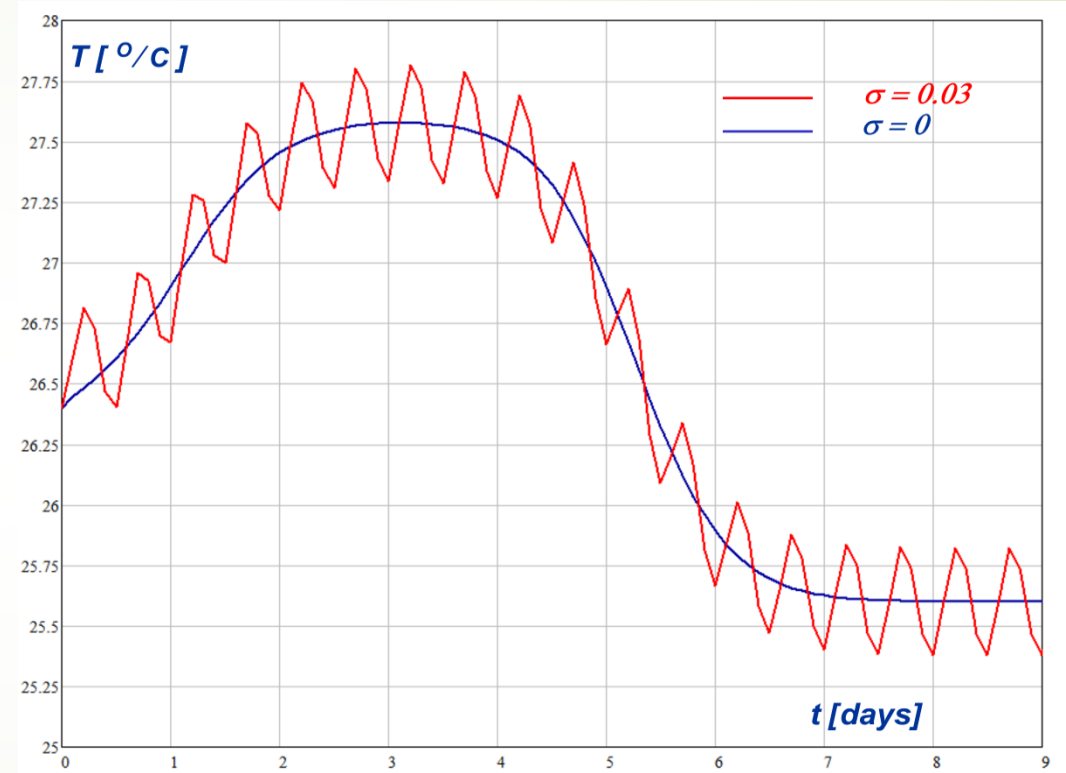


Рис.2. Результаты расчетов температуры водной поверхности на основе нелинейной малопараметрической модели тропического циклогенеза (МПМТЦ) при  $\sigma = 0$   $T_{\max} / \sigma = 0 = 27.6 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\sigma = 0.03$ ,  $T_{\max} / \sigma = 0 = 28.1 \text{ }^\circ\text{C}$  [14-20].

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА (МПМТЦ)

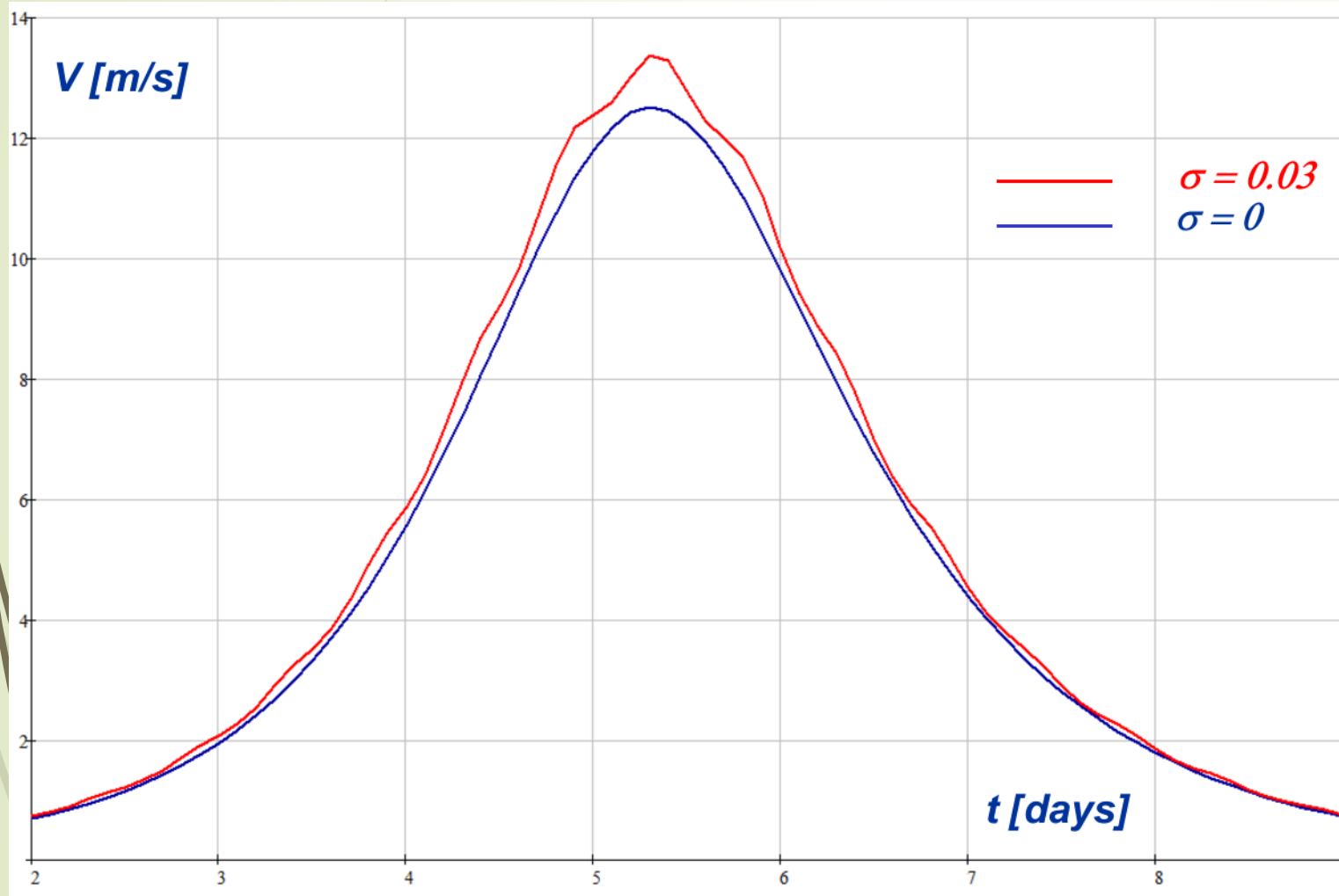


Рис 3. Результаты расчетов максимальной скорости ветра по МПМТЦ при  $\sigma = 0$  и  $\sigma = 0.03$ .

Максимальная скорость ветра в первом случае  
 $V_{\max} / \sigma = 0 = 12.5 \text{ m/s}$ .

Максимальная скорость ветра с учетом порывов достигает  
 $V_{\max} / \sigma = 0.03 = 13.4 \text{ m/s}$ .

Расчетные результаты по МПМТЦ коррелируют с симуляциями других моделей [20, 21] и наблюдаемых параметров процесса [23, 24].





Рис. 4. Квази-тропический средиземноморский циклон под названием «Даниэль» в период с 4 - 7 сентября 2023 года вызвал масштабные разрушения в ряде стран, через которые прошла его траектория [6-8].

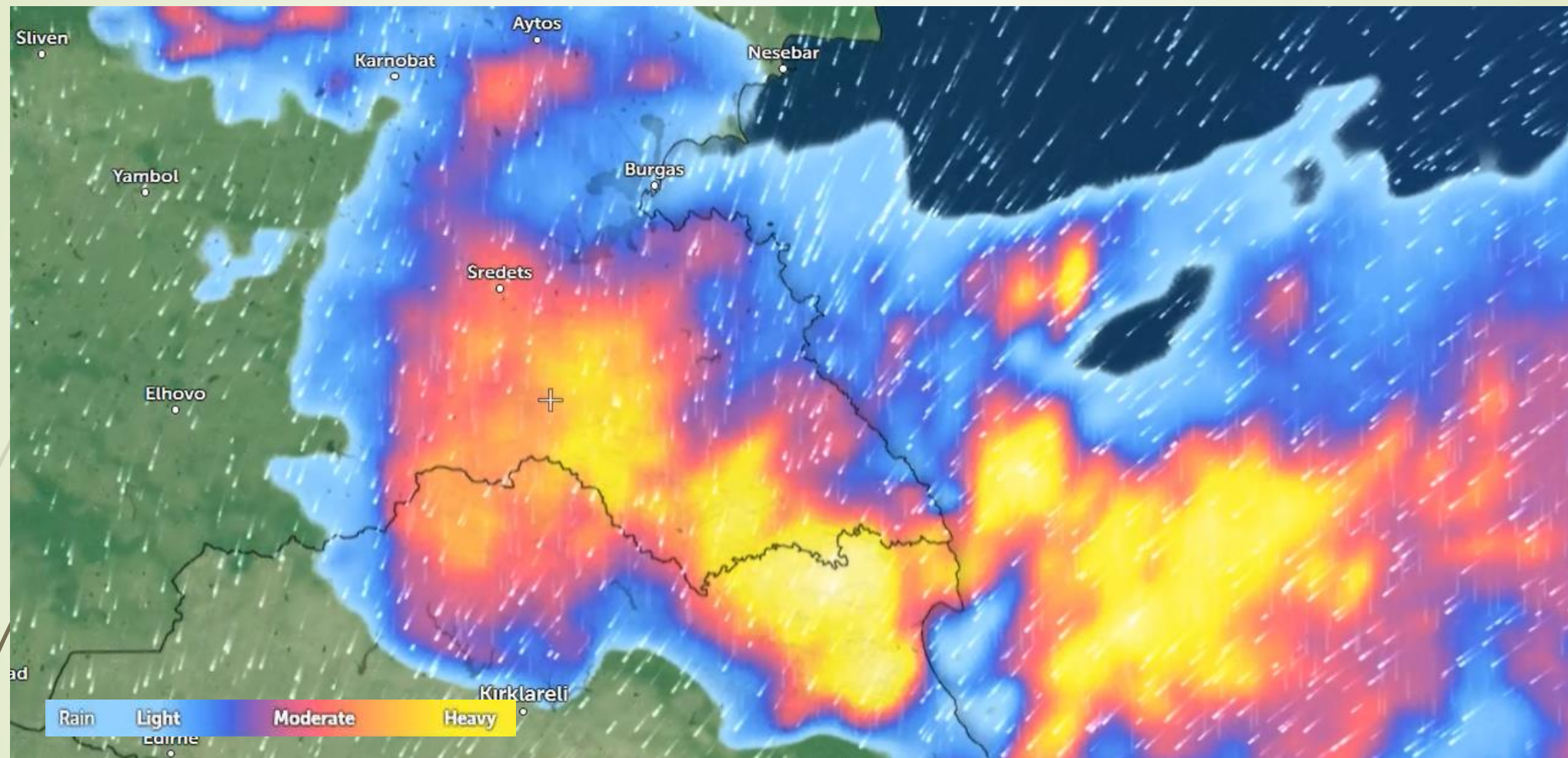


Рис. 5. Радарное изображение интенсивных осадков на территории Бургаского округа и юго-западных районов Черного моря в 04:00 UTC, 05.09.2023. Наблюдаемые параметры – сильный ливень с интенсивностью над сушей 20-40 mm/h. Интенсивность осадков над морем достигает локальных максимумов до 40-60 mm/h [7-13].

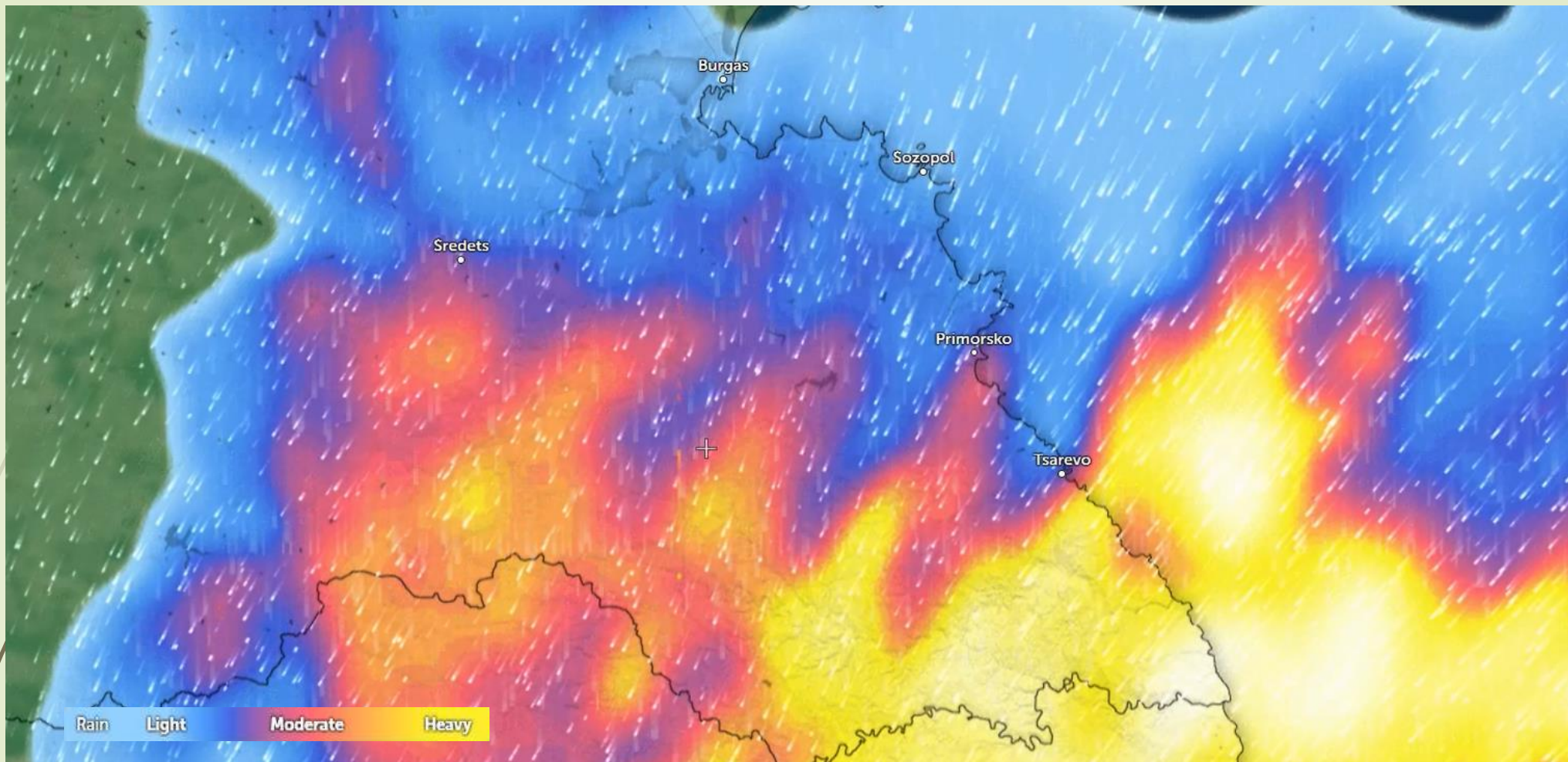


Рис. 6. Радарное изображение Бургаского округа в 04:40 UTC, 05.09.2023. Начало процесса интенсивных осадков. Наблюдаемые параметры – сильный ливень с интенсивностью 26 mm/h и скоростью ветра 8.9 m/s [7-13]. В южной зоне интенсивность осадков достигает 195 mm/h.



Рис. 7. Спутниковое изображение Бургаского округа и юго-западных районов Черного моря в 04:00 UTC, 05.09.2023. Реальное состояние облачности на всей территории региона [7-13].

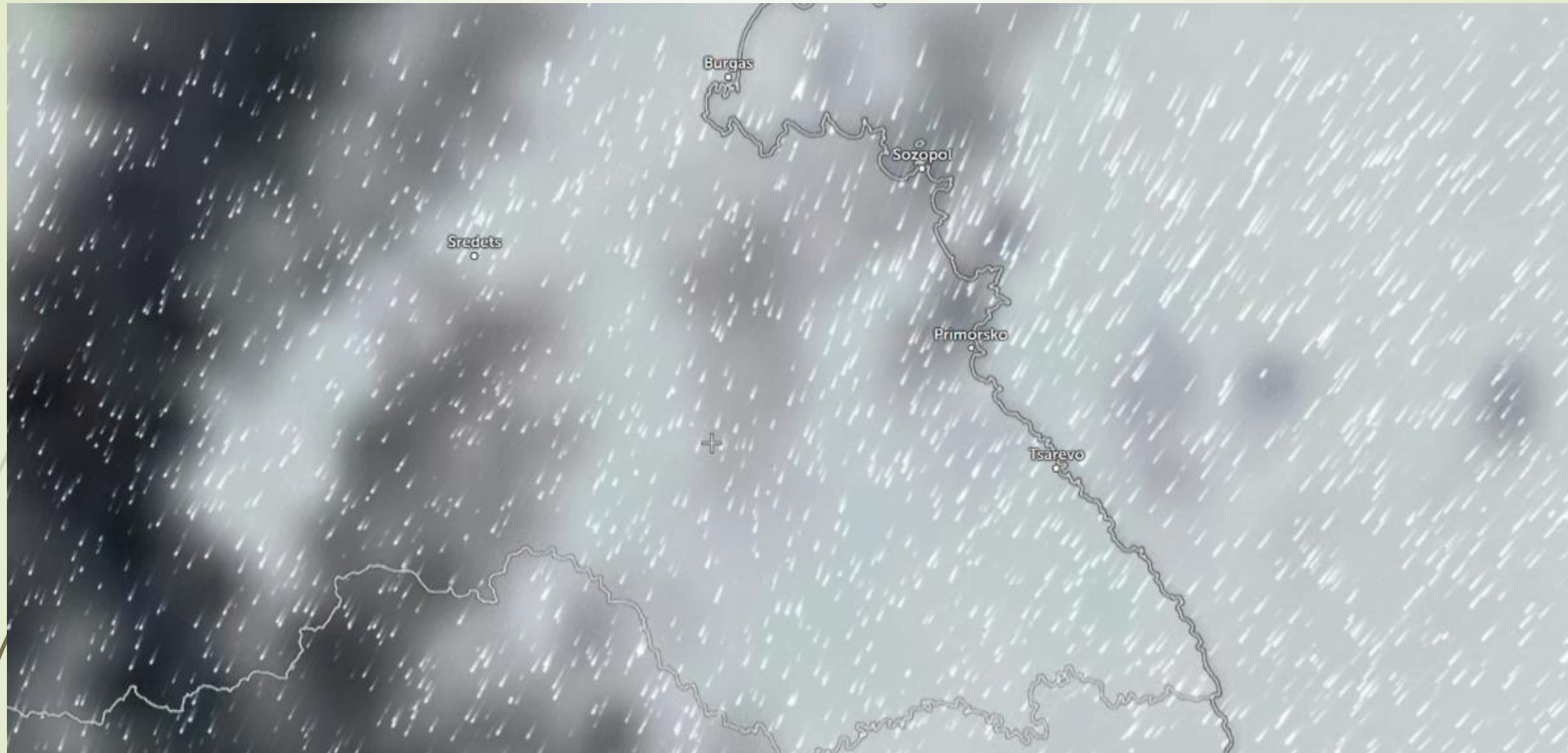


Рис. 7а. Спутниковое изображение Бургаского округа и юго-западных районов Черного моря в 05:00 UTC, 05.09.2023. Реальное состояние облачности на всей территории региона [7-13].

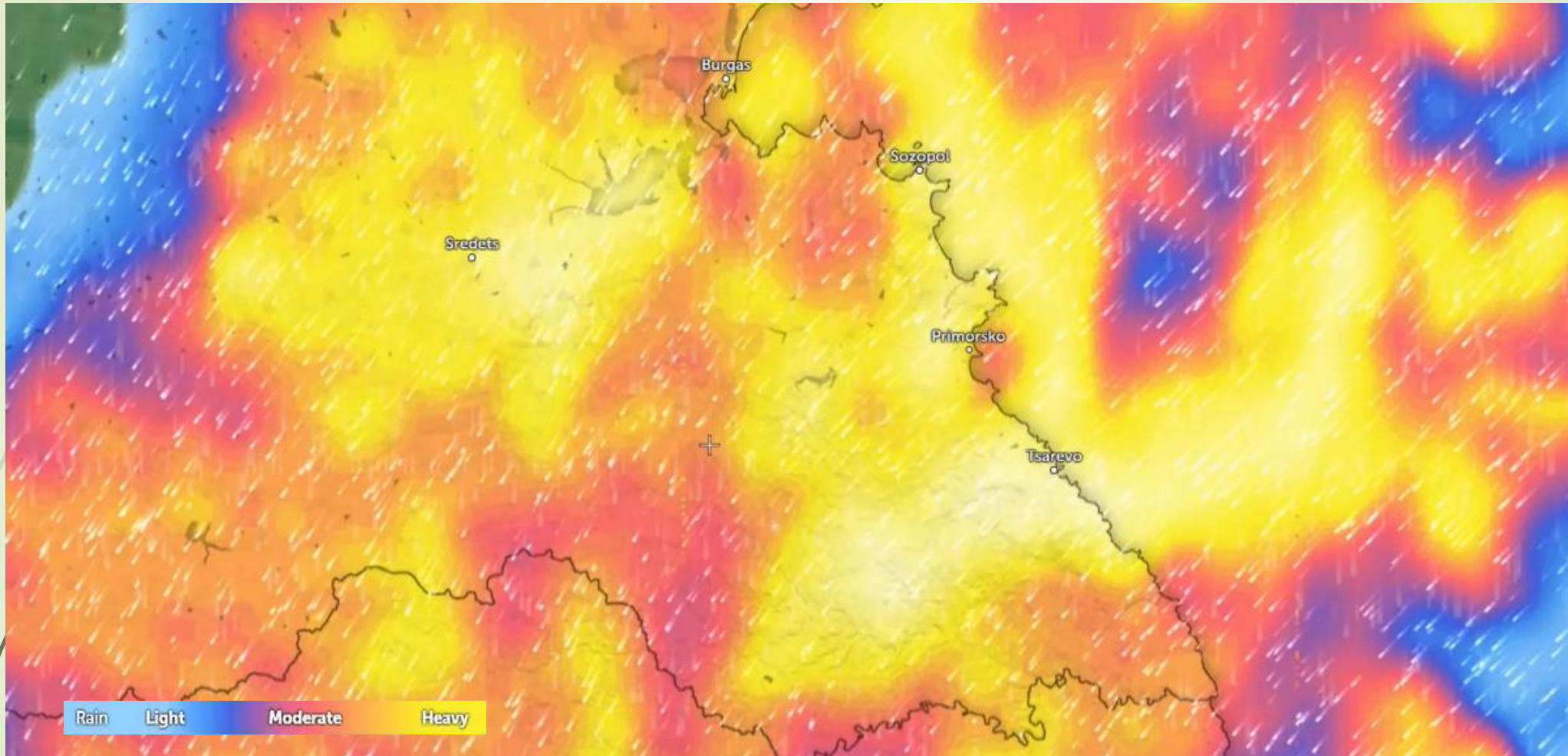


Рис. 8. Радарное изображение Бургаского округа в 07:00 UTC, 05.09.2023. Интенсивность осадков в с. Царево достигает 95 мм/ч. Наблюдаемые параметры – квази-тропического циклона - сильный ливень с интенсивностью 70 - 95 мм/ч [7-13]. В зоне моря интенсивность осадков достигает 70 - 95 мм/ч.

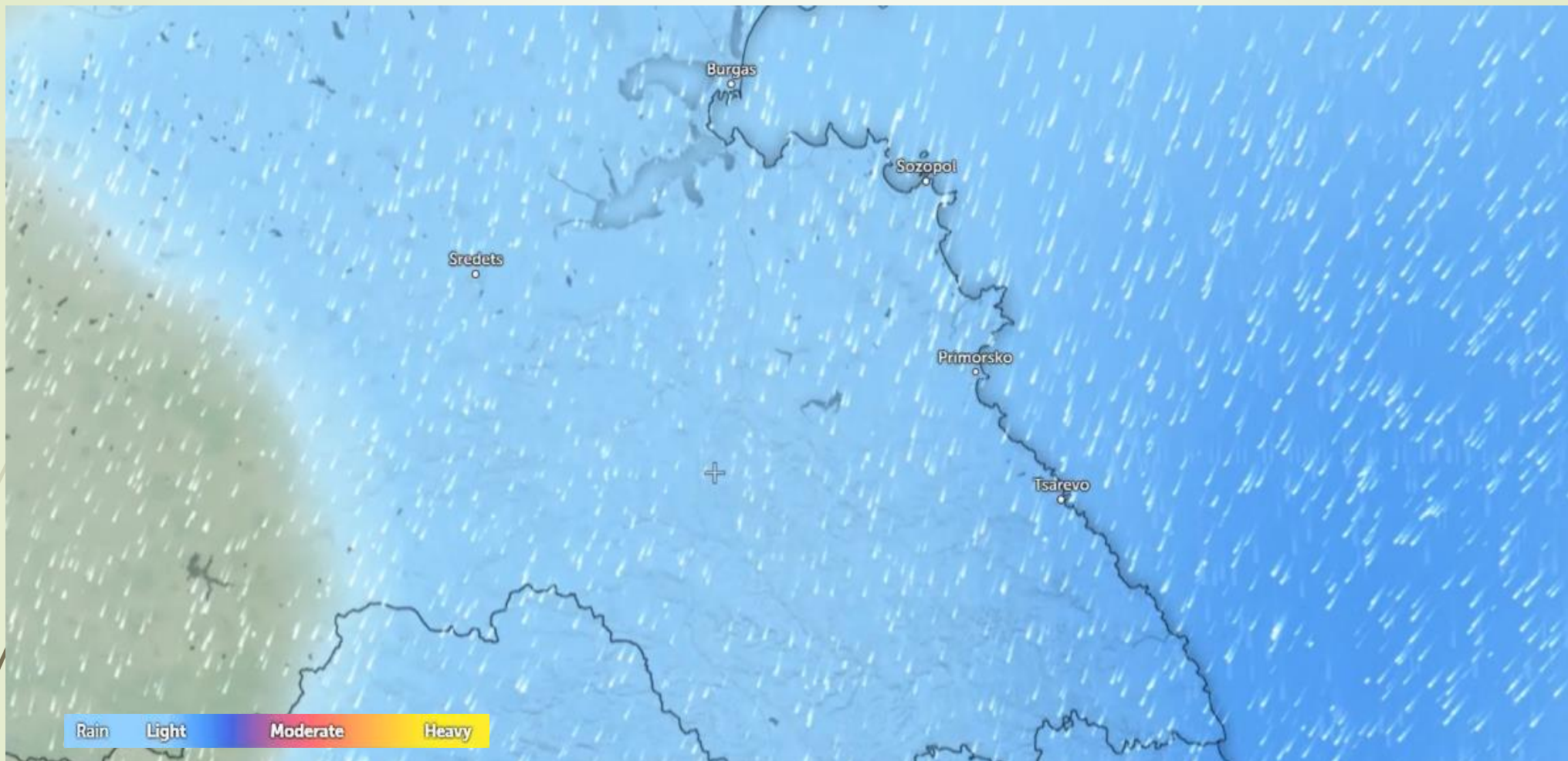


Рис. 9. Прогнозная интенсивность осадков по модели GFS [22] в 04:00 UTC, 05.09.2023. Интенсивность осадков в с. Царево по GFS достигает 0.7-1 mm/h. Очевидна разница между прогнозом и наблюдаемыми радарными интенсивностями осадков [7-13].

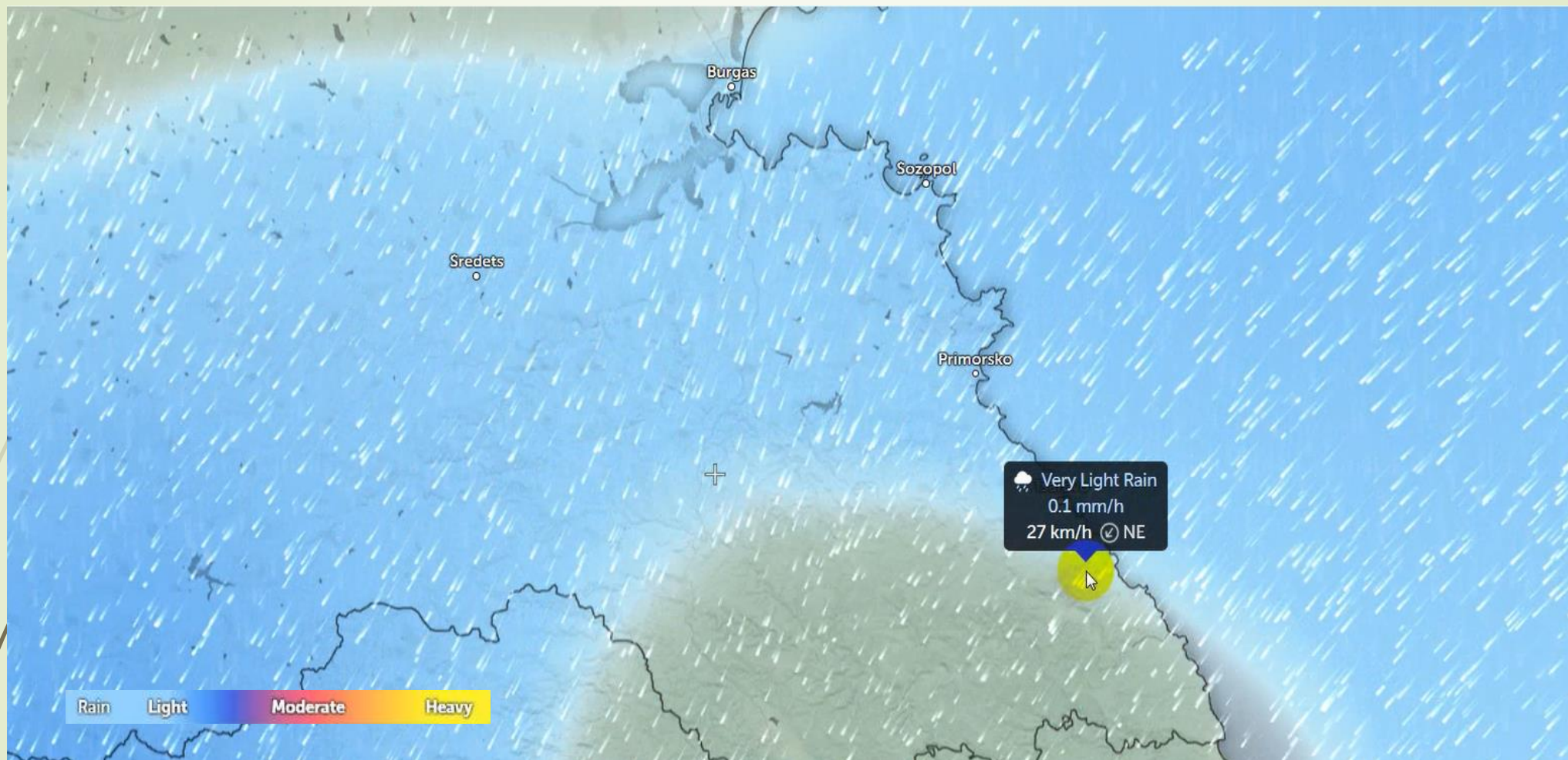


Рис. 10. Прогнозная интенсивность осадков по модели GFS [22] в 07:00 UTC, 05.09.2023. Интенсивность осадков в с. Царево по GFS 0.1 mm/h. Наблюдается полное несоответствие между прогнозом и результатами измерений радарным методом интенсивности осадков [7-13].



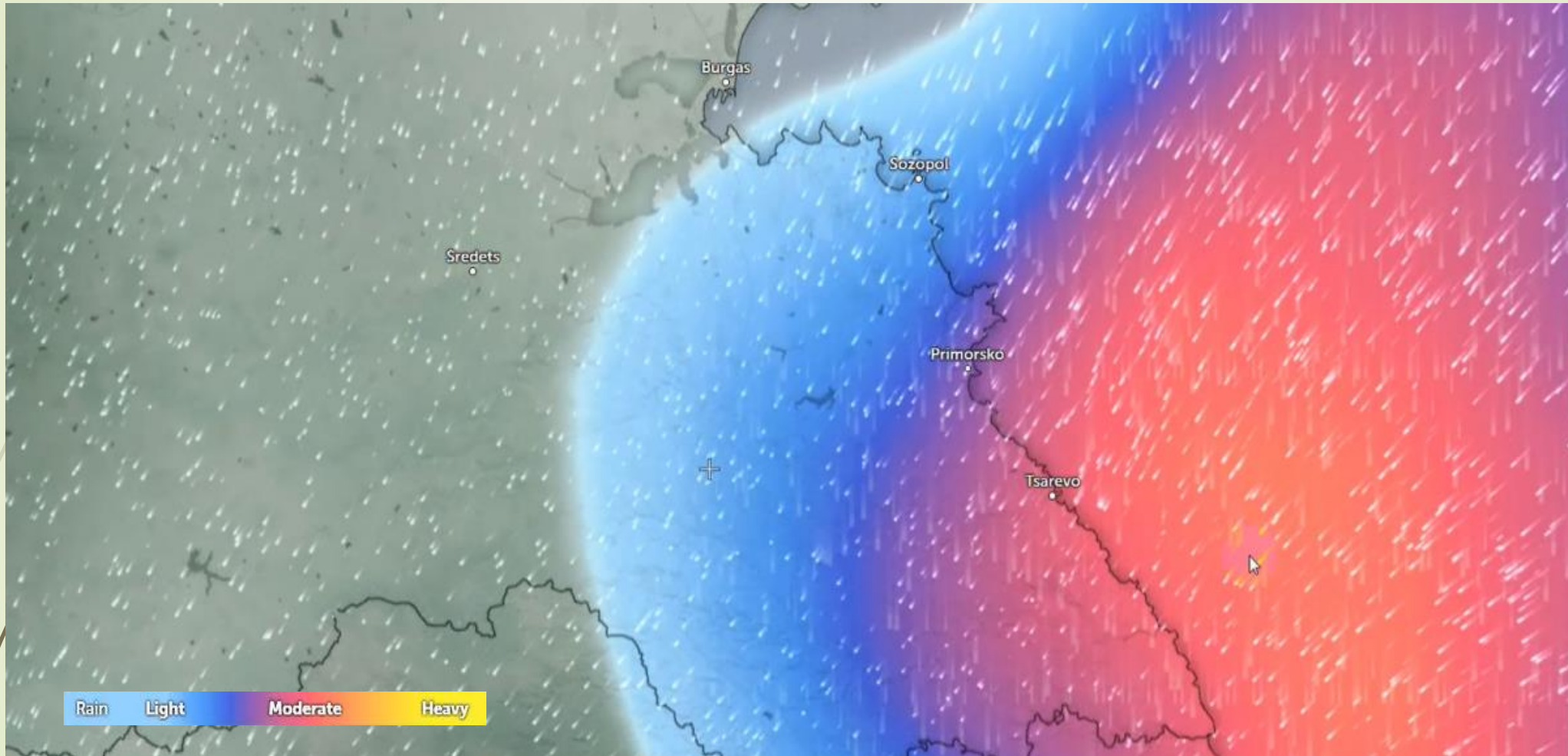


Рис. 11. Прогнозная интенсивность осадков по модели ICON [21] в 04:00 UTC, 05.09.2023. Интенсивность осадков в с. Царево по GFS достигает 5-6 mm/h, а в 07:00 UTC прогноз на 3-4 mm/h. Видна существенная разница между прогнозом и измеренными радарным методом интенсивностями осадков [7-13].

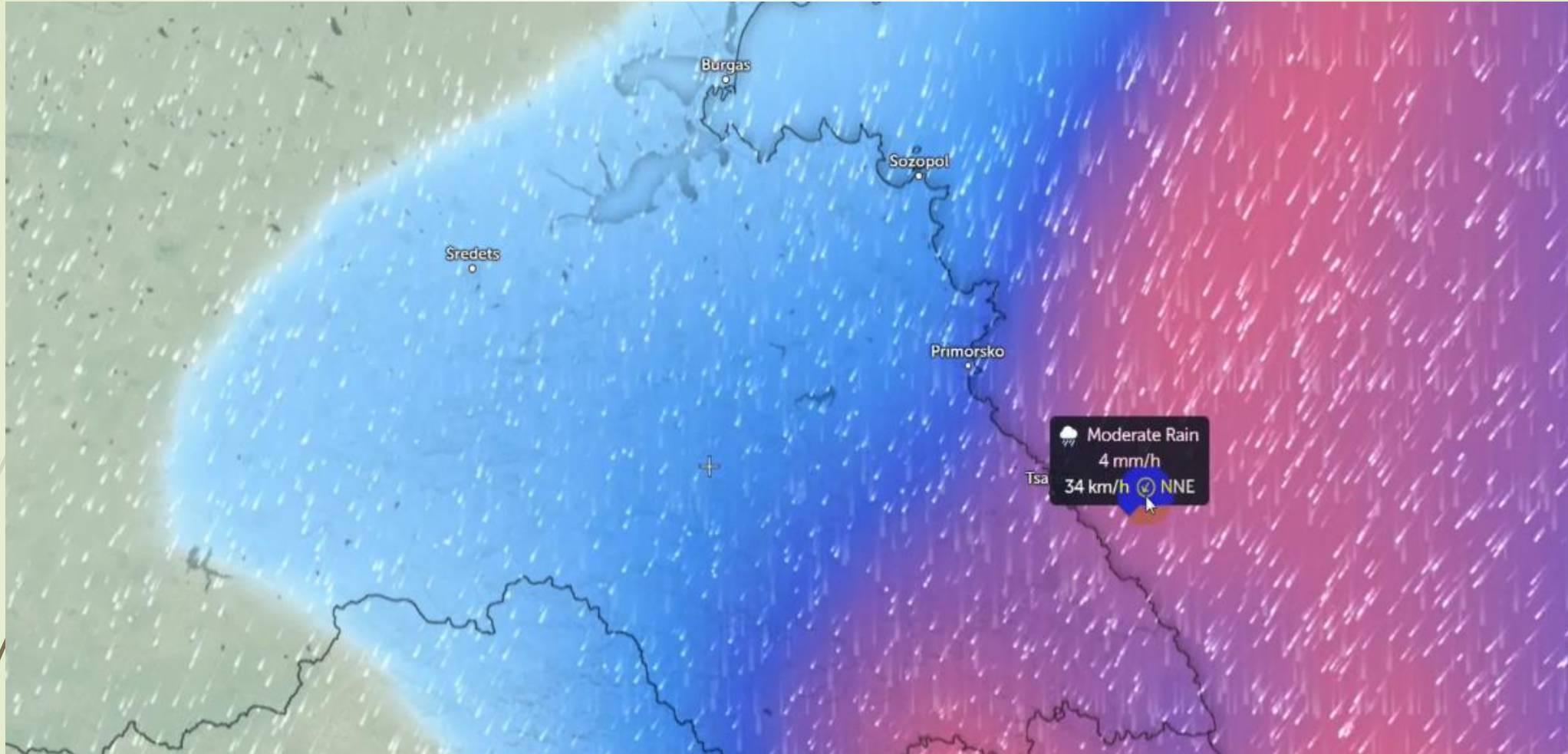


Рис. 12. Прогнозная интенсивность осадков по модели ICON [21] в 07:00 UTC, 05.09.2023. Интенсивность осадков в с. Царево по ICON 3-4 mm/h. Наблюдается полное несоответствие между прогнозом и результатами измерений радарным методом интенсивности осадков [7-13].

## Квазитропический шторм в юго-западных районах Черного моря



Разрушения южнее г. Бургаса в с. Царево, юго-западный район Черного моря. В тот же день севернее г. Варны (05.09.2023), возле с. Тюленово (в районе болгаро-румынской границы) зарегистрирован смерч.

## Заключение

- В результате глобального потепления, повышается температура поверхности как мирового океана, так и внутренних морей.
- Как следствие, все чаще наблюдаются нетипичные интенсивные атмосферные явления типа квази-тропических штормов, в частности в юго-западном регионе Черного моря.
- В настоящей работе на основе нелинейной малопараметрической модели тропического циклогенеза (МПМТЦ) проведены расчеты динамики развития квази-тропического шторма короткой длительности.
- Показано хорошее совпадение результатов расчетов на базе МПМТЦ с реальной динамикой квази-тропического шторма.
- По данным НИМХ в период квази-тропического шторма за 14 часов достигнуты пиковые значения выпавших осадков, близкие к максимально зарегистрированным (например, в с. Кости 329 л/ м<sup>2</sup>, 444% от месячной климатической нормы), что коррелирует с представленными в работе спутниковыми радарными изображениями интенсивности осадков [23, 24].
- Интенсивность наблюдаемых осадков квази-тропического шторма 05.09.2023г. в юго-западном регионе Черного моря полностью расходится с прогнозными результатами двух моделей [21, 22].
- Явления типа квази-тропического шторма в юго-западном регионе Черного моря пока не поддаются корректному прогнозированию.
- Мы считаем, что основная причина появления этих явлений в регионе Черного моря - это повышение температуры поверхности мирового океана и внутренних морей вследствие глобального потепления.

## Список литературы

1. What is Climate Change?, <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/overview>, (дата обращения: 11.10.2023)
2. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is the United Nations body for assessing the science related to climate change - <https://www.ipcc.ch/>, (дата обращения: 11.10.2023)
3. Clark, P., Shakun, J., Marcott, S. et al., 2016: Consequences of twenty-first-century policy for multi-millennial climate and sea-level change. *Nature Clim Change* 6, 360–369. DOI:
4. Saffir, H. S. Hurricane wind and storm surge. // *The Military Engineer*, – 1973. – V.65(423), – P. 4-5.
5. Simpson, R. H. and Saffir, H. The hurricane disaster potential scale. // *Weatherwise*. – 1974. – 27(8), – P.169–186.
6. Storm Daniel, [https://en.wikipedia.org/wiki/Storm\\_Daniel](https://en.wikipedia.org/wiki/Storm_Daniel), (дата обращения: 11.10.2023)
7. GOES East Full Disk Imagery, [https://psl.noaa.gov/psd2/coastal/satres/data/html/goeseast\\_full.html](https://psl.noaa.gov/psd2/coastal/satres/data/html/goeseast_full.html), (дата обращения: 11.10.2023)
8. VIIRS/JPSS1 Imagery Resolution 6 Min L1B Swath 375m NRT, <https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C2208779826-LANCEMODIS>, (дата обращения: 11.10.2023)
9. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center URL: <https://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php> (дата обращения: 11.10.2023)
10. Joint Typhoon Warning Center - JTWC. URL: <https://www.metoc.navy.mil/jtwc/jtwc.html?tropical> (дата обращения: 11.10.2023)
11. Zoom Earth. URL: <https://zoom.earth/storms/emnati-2022/#layers=daily> (дата обращения: 07.09.2023)
12. Live Weather Radar Map, <https://www.rainviewer.com/weather-radar-map-live.html>, (дата обращения: 11.10.2023)
13. READY (Real-time Environmental Applications and Display sYstem), NOAA Air Resources Laboratory's (ARL), <https://www.ready.noaa.gov/index.php>, (дата обращения: 11.10.2023)
14. Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. // Тропический циклон как элемент системы океан- атмосфера. ДАН, – 2004. – Т.399. № 3. – С.397-400.
15. 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.
16. 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.
17. Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А. Химическая физика тропического циклогенеза. // *Химическая физика*, – 2011, – Т.30, № 5, – С. 80-83.
18. 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
19. 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*
20. Зольникова Н.Н., Шкевов Р., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А. Малопараметрическая нелинейная модель как платформа для численного моделирования влияния глобального потепления на морские перевозки. Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы» (26 мая 2022 г.) — [Электронный ресурс] / ISBN 978-5-00204-191-6 — Москва: РУТ (МИИТ), 2022. — М. Издательство Перо, 2022. С. 167-178. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48449569&pff=1>  
eLIBRARY ID: 48449569 : <https://elibrary.ru/item.asp?id=48449569>
21. The Deutscher Wetterdienst, ICON (Icosahedral Nonhydrostatic) Model, (дата обращения: 11.10.2023)
22. GFS Model, <https://www.pivotalweather.com/model.php>, (дата обращения: 11.10.2023)
23. Национален институт по метеорология и хидрология, София, България, <https://meteo.bg>, (дата обращения: 11.10.2023)
24. Годишни и месечни бюлетини на НИМХ, Онлайн издание: ISSN 2815-2743, <https://bulletins.cfd.meteo.bg>, (дата обращения: 11.10.2023)
24. 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.
25. Vousdoukas, M.I., Voukouvalas, E., Annunziato, A., Giardino, A., Feyen, L. Projections of extreme storm surge levels along Europe. // *Climate Dynamics*. 2016.,47, 317110.1007/s00382-016-3019-5

**Двадцать первая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН, 13 – 17 ноября 2023г., Москва**

**Спасибо за внимание !**

**Влияние глобального потепления на изменение климата в юго-западной зоне Черного моря**

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

*<sup>1</sup>Институт космических исследований и технологий, Болгарской академии наук, София, Болгария*

*<sup>2</sup>Институт космических исследований, Российской академии наук, Москва, Россия*

*e-mail: [shkevov@space.bas.bg](mailto:shkevov@space.bas.bg), [nzolnik@iki.rssi.ru](mailto:nzolnik@iki.rssi.ru)*