

Влияние тяжелых металлов на интенсивность биолюминесценции, формируемой в пелагиали северо-восточной части Черного моря

Е. Б. Мельникова¹✉, А. В. Мельников²

¹Институт природно-технических систем, Российская Федерация
(299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28)

²Севастопольский государственный университет, Российская Федерация
(299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33)

Аннотация. Цель исследования – оценка влияния загрязнений морской среды тяжелыми металлами на изменение интенсивности биолюминесценции как обитателей пелагиали в целом, так и массового представителя биолюминесцентных организмов в Черном море – *Noctiluca scintillans* (Macartney) Kofoid & Swezy, 1921.

Материалы и методы. Данные по интенсивности биолюминесцентного излучения были получены в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в 2010-2013 годах на станциях, расположенных в северо-восточной части Черного моря. Кроме этого, при расчете и анализе использовали литературные данные по амплитуде и длительности биолюминесцентной вспышки *N. scintillans*.

Результаты и обсуждение. Показано, что при воздействии CuSO_4 и HgCl_2 с концентрацией более 10 мкг/л через 7 суток биолюминесцентное излучение *N. scintillans* прекращается полностью, а при воздействии PbCl_2 и ZnCl_2 интенсивность биолюминесценции уменьшается до уровня 30 % от контрольной группы. Откликом обитателей пелагиали в Керченском предпроливном районе на загрязнение тяжелыми металлами является снижение интенсивности биолюминесценции в 1,37 раза при загрязнении одним из тяжелых металлов и в 3 раза при загрязнении тремя металлами.

Заключение. Проведена оценка снижения интенсивности биолюминесцентного излучения в пелагиали Керченского предпроливного района при загрязнении морской воды тяжелыми металлами.

Ключевые слова: Черное море, загрязнение, тяжелые металлы, биолюминесценция, *Noctiluca scintillans*.

Источник финансирования: Исследование выполнено в рамках госзадания: 124020100120-9.

Для цитирования: Мельникова Е. Б., Мельников А. В. Влияние тяжелых металлов на интенсивность биолюминесценции, формируемой в пелагиали северо-восточной части Черного моря // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2025, № 2, с. 156-161. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/156-161>

ВВЕДЕНИЕ

Негативные последствия антропогенной нагрузки в современных условиях оказывают значительное разрушающее воздействие на состояние окружающей среды, в том числе на водные ресурсы. При этом свойство обитателей пелагиали излучать в процессе своей жизнедеятельности световую энергию (явление биолюминесценции) может быть использовано для определения биологического состояния гидробионтов с учетом параметров среды обитания, включая влияние загрязнений морских акваторий промышленными, сельскохозяйственными, бытовыми отходами и другими веществами [4, 6, 7, 9].

Опасность загрязнения морской среды тяжелыми металлами заключается в том, что нарушается сбалансированность процессов новообразования и разрушения органического вещества и, вследствие этого, возникает реальный риск снижения устойчивости экосистемы до критического уровня, при котором даже небольшое дополнительное негативное воздействие

может привести к необратимой деградации рассматриваемых систем [1, 3, 5, 6].

Установлено, что даже эссенциальные металлы, такие как медь, цинк, железо при накоплении в водной среде нарушают функционирование пелагиали и являются потенциальной угрозой для живых организмов, а оценка их содержания в морской среде является актуальной и необходима для обеспечения устойчивой эксплуатации водных ресурсов [1, 3, 6].

Цель исследования – оценка влияния загрязнений морской среды тяжелыми металлами на изменение интенсивности свечения как обитателей пелагиали в целом, так и массового представителя биолюминесцентных организмов в Черном море – *Noctiluca scintillans* (Macartney) Kofoid & Swezy, 1921.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование интенсивности биолюминесцентного излучения проводили в 2010-2013 годах в 65-ом, 70-ом и в 72-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий». Данные были получены на станциях, расположенных

© Мельникова Е. Б., Мельников А. В., 2025

✉ Мельникова Елена Борисовна, e-mail: helena_melnikova@mail.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

в северо-восточной части Черного моря в Керченском предпроливном районе.

Вертикальное распределение интенсивности биолюминесцентного излучения исследовали методом многократного батифотометрического зондирования толщи воды с использованием гидробиофизического комплекса «Сальпа-М». С его помощью измеряли также температуру и соленость.

При обработке результатов для оценки особенностей функционирования экосистемы пелагиали, характеризующей интенсивностью биолюминесцентного излучения, использовали понятие интегральной интенсивности свечения гидробионтов (ИИСГ), методика которой подробно изложена в работе [8].

Кроме этого, при анализе использовали литературные данные [2, 6] по лабораторным исследованиям воздействия различных концентраций тяжелых металлов на изменения амплитуды и длительности биолюминесцентной вспышки *N. scintillans*, которая является массовым организмом в Черном море и вносит доминирующий вклад в поле биолюминесценции пелагиали [5]. Затем эти параметры нами были пересчитаны в интенсивность излучения по формуле

$$E = \int_0^T w(t) dt, \quad (1)$$

где E – интенсивность излучения; $w(t)$ – зависимость от времени биолюминесцентной вспышки; T – длительность излученного биолюминесцентного импульса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты по гидрологическим параметрам морской среды и интенсивности свечения были усреднены по периодам исследования и приведены в таблице 1.

Видно (см. табл. 1), что в августе 2010 и 2011 годов в районе исследования гидрологические параметры слоя с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов были практически одинаковы. Толщина слоя с высоким уровнем интенсивности свечения составляла 6 м, отличия по температуре и солености не превышали 4 %. Однако отличия по интегральной интенсивности свечения гидробионтов были значительными и отличались в 1,37 раза. Отличия по гидрологическим параметрам в 2013 году по сравнению с 2010 и

2011 годами также были незначительными и не превышали 5,8 %, а отличия по ИИСГ были существенными и достигали 3,0 раза.

В работах П. В. Евстигнеева, Ю. Н. Токарева [2, 6] приведены результаты исследования реакции биолюминесцентной системы *N. scintillans* на воздействие различных доз тяжелых металлов. Были проанализированы такие параметры биолюминесцентной вспышки, как изменения амплитуды и общей продолжительности излученных сигналов. Отмечено, что *N. scintillans* широко распространена в Черном море, и в значительной степени определяет интенсивность биолюминесценции пелагиали.

Результаты по амплитуде и длительности биолюминесцентной вспышки *N. scintillans*, полученные в работах [2, 6], были пересчитаны в интенсивность излучения в соответствии с выражением (1). Полученные результаты по изменению интенсивности излучения от воздействия тяжелых металлов по сравнению с контрольной группой, изображены на рисунках 1 и 2. На рисунке 1 изображены изменения интенсивности излучения через 12 часов после начала воздействия поллютантов, а на рисунке 2 – через 7 суток (168 часов).

Из рисунка 1 видно, что через 12 часов после начала воздействия загрязнителей наиболее сильное угнетающее воздействие оказывают катионы ртути. Так при воздействии $HgCl_2$ с концентрацией 1 мкг/л интенсивность биолюминесцентного излучения уменьшается практически в 2 раза, а при концентрации 1 мг/л наблюдается полное прекращение излучения *N. scintillans*.

Растворы солей $CuSO_4$ и $ZnCl_2$ при концентрации 10 мг/л снижают интенсивность излучения *N. scintillans* до уровня 20-30 % от контрольной группы. Наличие соли $PbCl_2$ при малых концентрациях (до 10 мкг/л) увеличивает интенсивность излучения (см. рис. 1), затем при увеличении концентрации до 10 мг/л интенсивность излучения снижается до 60-70 % от уровня контрольной группы.

При длительном воздействии тяжелых металлов (7 суток) (см. рис. 2) наиболее пагубное влияние на *N. scintillans* оказывают катионы ртути и меди. При концентрации 1 мг/л и более биолюминесцентное излучение *N. scintillans* полностью прекращается. При воздействии

Таблица 1

Усредненные параметры морской среды и интегральная интенсивность свечения гидробионтов в Керченском предпроливном районе

[Table 1. Average parameters of the marine environment and integral intensity glow of hydrobionts in the Kerch pre-spill area]

Период / Period	Параметры слоя с высоким уровнем биолюминесценции / Layer parameters with high bioluminescence			
	Толщина / Thick, м	Температура / Temperature, °C	Соленость / Salinity, ‰	ИИСГ / IGH, пВт·см ⁻² ·л ⁻¹
2010 год, август	6	17,2	17,68	25444
2011 год, август	6	17,5	17,65	18592
2013 год, май	14	16,3	17,72	8632

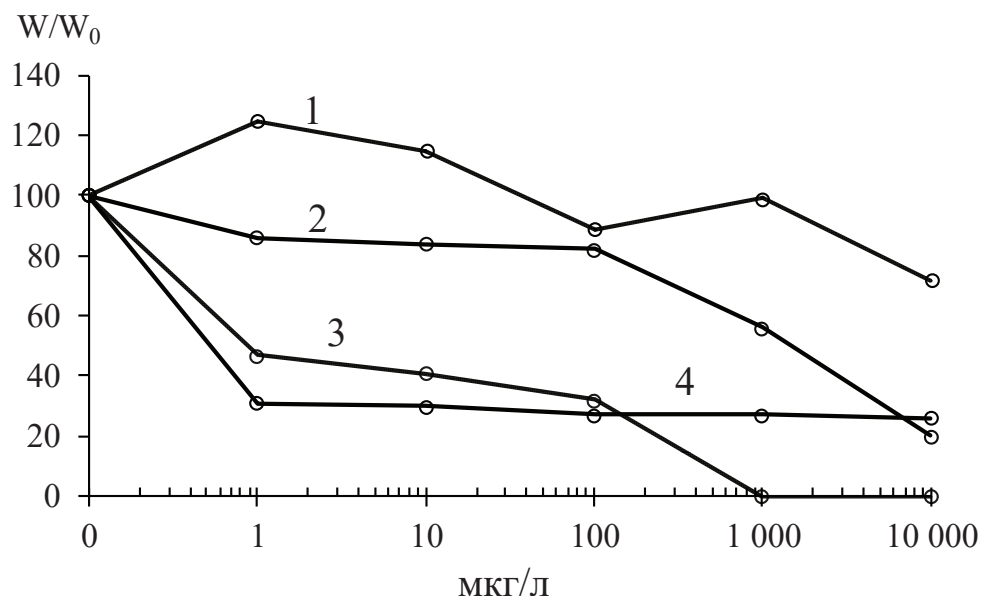


Рис. 1. Изменение относительной (% от контроля) интенсивности биолуминесцентного излучения *N. scintillans* через 12 часов после воздействия солей металлов: 1 – PbCl₂, 2 – CuSO₄, 3 – HgCl₂, 4 – ZnCl₂

[Fig. 1. Change in the relative (% of control) intensity of *N. scintillans* bioluminescent glow 12 hours after exposure to metal salts: 1 – PbCl₂, 2 – CuSO₄, 3 – HgCl₂, 4 – ZnCl₂]

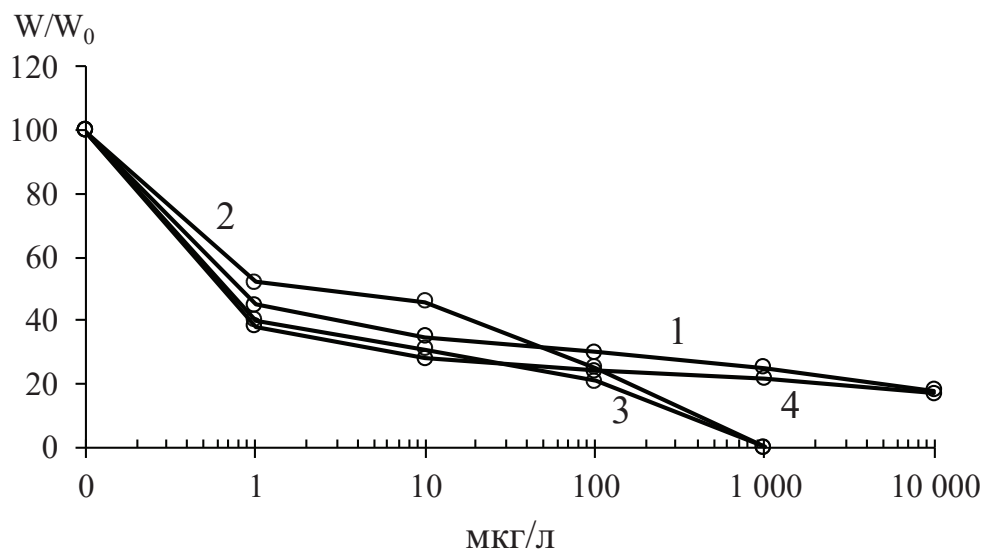


Рис. 2. Изменение относительной (% от контроля) интенсивности биолуминесцентного излучения *N. scintillans* через 7 суток (168 часов) после воздействия солей металлов: 1 – PbCl₂, 2 – CuSO₄, 3 – HgCl₂, 4 – ZnCl₂

[Fig. 2. Change in the relative (% of control) intensity of *N. scintillans* bioluminescent glow 7 days (168 hours) after exposure to metal salts: 1 – PbCl₂, 2 – CuSO₄, 3 – HgCl₂, 4 – ZnCl₂]

катионов цинка и свинца с концентрацией 10 мкг/л интенсивность излучения значительно снижается (почти в 5 раз), но не прекращается полностью.

В целом при невысокой концентрации солей тяжелых металлов (не превышающей нескольких единиц микрограмм на литр) наблюдается снижение интенсивности биолуминесцентного излучения *N. scintillans* в 2-3 раза.

С учетом того, что среднегодовые значения концентрации тяжелых металлов в Черном море лежат в

пределах от десятых-сотых долей до единиц микрограмм на литр, то в соответствии с проведенными расчетами следует ожидать (см. рис. 2), что длительное воздействие отдельными тяжелыми металлами в районах загрязнения приведет к снижению интенсивности биолуминесцентного излучения обитателей пелагиали на 30-60 %.

В работе И.В. Кораблиной [1] приведены результаты 20-летних наблюдений за содержанием тяжелых металлов в морской среде северо-восточной части Чер-

Таблица 2

Интегральная интенсивность свечения гидробионтов и превышение ПДК металлов
в Керченском предпроливном районе
[Table 2. Integral intensity of hydrobionts glow and excess of MPC of metals in the Kerch pre-spill area]

Период / Period	ИИСГ / IIGH, пВт·см ⁻² ·л ⁻¹	Превышение ПДК, металлы* / Exceeding MPC, metals*	Диапазон изменения концентраций* / Range of concentration change*, мкг/л
2010 год, август	25444	Не наблюдалось	–
2011 год, август	18592	Медь	1,0–90
2013 год, май	8632	Цинк,	2,0–303
		Медь,	1,0–50
		Ртуть	0,01–0,16

Примечание: * – Данные взяты из работы [1].

[Note: * – The data is taken from [1]].

ного моря. Сопоставим эти исследования с нашими измерениями по интегральной интенсивности свечения гидробионтов в этом районе.

В исследованиях [1] отмечено, что в период август-сентябрь 2010 года в Керченском предпроливном районе не было зафиксировано превышения ПДК тяжелых металлов (см. табл. 2). Сравнение с нашими результатами по интегральной интенсивности свечения гидробионтов (см. табл. 1) показывает, что в этот период в Керченском предпроливном районе наблюдалось наибольшее значение ИИСГ (25444 пВт·см⁻²·л⁻¹).

В августе-сентябре 2011 года в Керченском предпроливном районе наблюдалось превышение ПДК меди [1], при этом содержание меди в толще воды составляло 1,0-90 мкг/л. По нашим исследованиям в этот период среднее значение ИИСГ составляло 18592 пВт·см⁻²·л⁻¹, что было в 1,37 раза меньше, чем в этом районе в 2010 года при практически таких же гидрологических параметрах и отсутствии превышения ПДК загрязняющими веществами.

В мае-июне 2013 года в Керченском предпроливном районе наблюдалось превышение ПДК по трем металлам: цинк, медь и ртуть [1]. При этом концентрация цинка находилась в пределах 8,0-303 мкг/л, меди – 1,0-5,0 мкг/л, ртути – 0,01-0,16 мкг/л. Как видно из таблицы 2, ИИСГ в этот период составляла 8632 пВт см⁻²·л⁻¹, что было практически в 3 раза меньше, чем в 2010 году при отсутствии превышения ПДК загрязняющих веществ в этом районе.

Таким образом, сопоставление полученных результатов по ИИСГ в Керченском предпроливном районе с результатами измерения уровня загрязнения морской среды в данном районе показывает, что в периоды загрязнения морской среды с превышением уровня ПДК одним или несколькими тяжелыми металлами, происходит снижение интенсивности биолюминесцентного излучения обитателей пелагиали в 1,3-3 раза в зависимости от количества загрязняющих веществ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных об амплитуде и длительности биолюминесцентной вспышки *N. scintillans* проведен расчет интенсивности излучения при различных кон-

центрациях загрязнения морской воды солями PbCl₂, CuSO₄, HgCl₂, ZnCl₂. Показано, что при малых концентрациях загрязнения (не более 0,1 мкг/л) через 7 суток интенсивность излучения снижается на 30-60%. При воздействии CuSO₄ и HgCl₂ с концентрацией более 10 мкг/л через 7 суток биолюминесцентное излучение прекращается полностью, а при воздействии PbCl₂ и ZnCl₂ интенсивность излучения уменьшается до уровня 30 % от контрольной группы.

Откликом обитателей пелагиали на загрязнение тяжелыми металлами является снижение интенсивности биолюминесцентного излучения, которое зависит от количества и концентрации загрязняющих веществ. Так, интегральная интенсивность свечения гидробионтов в Керченском предпроливном районе при отсутствии превышения ПДК тяжелых металлов в период исследования составляла 25444 пВт·см⁻²·л⁻¹. При превышении ПДК одним из металлов (меди) ИИСГ в этом районе снизился в 1,37 раза, при одновременном превышении ПДК тремя металлами (цинк, медь и ртуть) ИИСГ снизился в 3 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Динамика распределения тяжелых металлов в водной толще северо-восточной части Черного моря после 2000 г. / И. В. Кораблина, Т. О. Барабашин, Ж. В. Геворкян, А. И. Евсеева // *Труды ВНИРО*, 2021, т. 183, с. 96-112.
2. Евстигнеев П. В. Влияние ряда токсических соединений на биолюминесценцию морских копепод // *Экспериментальная водная токсикология*, 1990, № 4, с. 105-119.
3. Капков В. И., Беленикина О. А., Федоров В. Д. Влияние тяжелых металлов на морской фитопланктон // *Вестник ВМУ. Серия Биология*, 2011, № 1, с. 41-45.
4. Мельникова Е. Б. Особенности межгодовой и сезонной изменчивости интенсивности свечения гидробионтов в относительно глубоководной и мелководной акваториях прибрежных вод Севастополя (Черное море) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация*, 2017, № 1, с. 80-86.
5. Татарников В. О., Даирова Д. С., Очеретный М. А. Концептуальная модель баланса загрязнения российского сектора Каспийского моря на примере свинца // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2022, № 2, с. 111-117.
6. Токарев Ю. Н., Евстигнеев П. В., Машукова О. В. *Планктонные биолюминесцентные мирового океана: видовое*

разнообразие, характеристики светового излучения в норме и при антропогенном воздействии. Симферополь: Нижняя Ореанда, 2016. 340 с.

7. Bioluminescent Dinoflagellates as a Bioassay for Toxicity Assessment / L. S. Perin, G. V. Moraes, G. A. Galeazzo, A. G. Oliveira // *Int J Mol Sci.*, 2022, vol. 23, pp. 13012.

8. Mel'nikova Ye. B., Serebrennikov A. N., Melnikov A. V. Regional variability of integral intensity of bioluminescence of hydrobionts in the waters of the Black Sea in summer period // *Luminescence*, 2021, vol. 36, no. 2, pp. 506-514.

9. Tokarev Yu. N., Melnikova E. B. On the issue of Effect of Hydrophysical Parameters on Intensity of Bioluminescence Field in the Black Sea // *Hydrobiol. J.*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 93-99.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 20.03.2024

Принята к публикации: 02.06.2025

UDC 546.4:591.148:593.8

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/156-161>

Influence of Heavy Metals on the Intensity of Bioluminescence Formed in the Pelagial of the North-Eastern Black Sea

E. B. Melnikova¹✉, A. V. Melnikov²

¹*Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation
(299011, Sevastopol, Lenin Str., 28)*

²*Sevastopol State University, Russian Federation
(33, Sevastopol, Universitetskaya Str., 299053)*

Abstract. The purpose is to assess the influence of the marine environment pollution by heavy metals on the change in the intensity of bioluminescence of both pelagial inhabitants in general and the numerous representative of bioluminescent organisms in the Black Sea – *Noctiluca scintillans* (Macartney) Kofoed & Swezy, 1921. **Materials and methods.** Data on the intensity of bioluminescent glow were obtained on the voyages of the vessel "Professor Vodiansky" in 2010-2013 at stations located in the North-Eastern part of the Black Sea. In addition, literature data on the amplitude and duration of the *N. scintillans* bioluminescent flash were used in the calculation and analysis. **Results and discussion.** It was shown that when exposed to CuSO₄ and HgCl₂ with a concentration of more than 10 µg/l after 7 days, bioluminescent glow of *N. scintillans* stops completely, and when exposed to PCl₃ and ZnCl₂, the intensity of bioluminescence decreases to the level of 30 % of the control group. The response of pelagial inhabitants in the Kerch pre-spill region to heavy metal pollution is to reduce the intensity of bioluminescence by 1.37 times when contaminated with one of the heavy metals and 3 times when contaminated with three metals. **Conclusion.** An assessment was made of a decrease in the intensity of bioluminescent glow in the pelagial of the Kerch pre-spill region during pollution of seawater with heavy metals.

Key words: Black Sea, pollution, heavy metals, bioluminescence, *Noctiluca scintillans*.

Funding: The study was carried out within the framework of state assignment: 124020100120-9.

For citation: Melnikova E. B., Melnikov A. V. Influence of Heavy Metals on the Intensity of Bioluminescence Formed in the Pelagial of the North-Eastern Black Sea. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografia. Geoekologia*, 2025, no. 2, pp. 156-161 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/156-161>

REFERENCES

1. Dinamika raspredeleniya tyazhelykh metallov v vodnoi tolshche severo-vostochnoi chasti Chernogo morya posle 2000 g [Dynamics of distribution of heavy metals in the water column of the northeastern part of the Black Sea after 2000] / I. V. Korablina, T. O. Barabashin, Zh. V. Gevorkyan, A. I. Evseeva. *Trudy VNIRO*, 2021, vol. 183, pp. 96-112. (In Russ.)
2. Evstigneev P. V. Vliyanie ryada toksicheskikh soedinenii na bioluminesentsiyu morskikh kopepod [The influence of a number of toxic compounds on the bioluminescence of marine copepods]. *Jeksperimental'naja vodnaya toksikologiya*, 1990, no. 4, pp. 105-119. (In Russ.)
3. Kapkov V. I., Belenikina O. A., Fedorov V. D. Vliyanie tyazhelykh metallov na morskoi fitoplankton [Effect of heavy

metals on marine phytoplankton]. *Vestnik VMU. Seriya Biologiya*, 2011, no. 1, pp. 41-45. (In Russ.)

4. Melnikova E. B. Osobennosti mezhgodovoy i sezonnoy izmenchivosti intensivnosti sveceniya gidrobiontov v otnositelno glubokovodnoj i melkovodnoj akvatoriyax pribrezhnykh vod Sevastopolya (Chernoe more) [Features of interannual and seasonal variability of the luminescence intensity of aquatic organisms in relatively deep and shallow waters of the coastal waters of Sevastopol (Black Sea)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Himiya. Biologiya. Farmacija*, 2017, no. 1, pp. 80-86. (In Russ.)

5. Tatarnikov V. O., Dairova D. S., Ocheretnyj M. A. Konceptual'naya model' balansa zagryazneniya rossijskogo sektora Kaspijskogo morya na primere svinca [Conceptual model of the pollution



balance of the Russian sector of the Caspian Sea using lead as an example]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2022, no 2, pp. 111-117. (In Russ.)

6. Tokarev Ju. N., Evstigneev P. V., Mashukova O. V. *Planktonnye bioluminescenty mirovogo okeana: vidovoe raznoobrazie, harakteristiki svetoizlucheniya v norme i pri antropogennom vozdeystvii* [Planktonic bioluminescents of the world ocean: species diversity, light emission characteristics under normal conditions and under anthropogenic impact]. Simferopol': Nizhnjaja Oreanda, 2016. 340 p. (In Russ.)

7. Bioluminescent Dinoflagellates as a Bioassay for Toxicity Assessment / L. S. Perin, G. V. Moraes, G. A. Galeazzo, A. G. Oliveira. *Int J Mol Sci.*, 2022, vol. 23, pp. 13012.

8. Mel'nikova Ye. B., Serebrennikov A. N., Melnikov A. V. Regional variability of integral intensity of bioluminescence of hydrobionts in the waters of the Black Sea in summer period. *Luminescence*, 2021, vol. 36, no. 2, pp. 506-514.

9. Tokarev Yu. N., Melnikova E. B. On the issue of Effect of Hydrophysical Parameters on Intensity of Bioluminescence Field in the Black Sea. *Hydrobiol. J.*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 93-99.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 20.03.2024

Accepted: 02.06.2025

Мельникова Елена Борисовна

Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории морских климатических исследований Института природно-технических систем, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-7988-2541, e-mail: helena_melnikova@mail.ru

Мельников Анатолий Викторович

Кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникации Севастопольского государственного университета, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-3732-0791, e-mail: mel.anat@mail.ru

Elena B. Mel'nikova

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher at the Laboratory of Marine Climate Research, Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-7988-2541, e-mail: helena_melnikova@mail.ru

Anatoly V. Mel'nikov

Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. at the Department of Radio-electronic and Telecommunication, Sevastopol State University, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-3732-0791, e-mail: mel.anat@mail.ru