

Краткое сообщение

УДК 582.276:504.5

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-214-222

EDN: POSBQZ



**ВЛИЯНИЕ ЦИНКА И ЖЕЛЕЗА НА ДИНАМИКУ ЧИСЛЕННОСТИ,
МОРФОЛОГИЮ И ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МИКРОВОДОРОСЛИ *PROROCENTRUM FORAMINOSUM* (ДИНОФИТА)**

Ж.В. Маркина¹, А.В. Огнистая^{1,2*}

¹ Национальный научный центр морской биологии
им. А.В. Жирмунского, ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17;
² Дальневосточный федеральный университет,
690922, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, 10

Аннотация. Дана оценка влияния тяжелых металлов цинка, железа в концентрациях 50 и 100 мкг/л на динамику численности, морфологию, флуоресценцию хлоропласта и зеленую автофлуоресценцию клеток (ЗАФ) микроводоросли *Prorocentrum foraminosum*. Оценка выполнена на третьи и седьмые сутки эксперимента. Оба элемента в концентрации, превышающей ПДК, снижают численность водоросли. Наибольшее влияние оказало железо. Однако изменения структур клеток при добавлении Fe³⁺ не наблюдалось. При добавлении Zn²⁺ выявлена деформация клеток и истечение клеточного содержимого *P. foraminosum*. Флуоресценция хлоропласта становилась менее интенсивной при воздействии Fe³⁺. ЗАФ при наличии в среде Zn²⁺ и Fe³⁺ увеличивалась.

Ключевые слова: *Prorocentrum foraminosum*, цинк, железо, численность клеток, флуоресценция хлоропласта, зеленая автофлуоресценция динофлагеллат

Для цитирования: Маркина Ж.В., Огнистая А.В. Влияние цинка и железа на динамику численности, морфологию и флуоресцентные характеристики микроводоросли *Prorocentrum foraminosum* (Dinophyta) // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 1. — С. 214–222. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-214-222. EDN: POSBQZ.

Short message

Influence of zinc and iron on population dynamics, morphology and fluorescent properties of microalgae *Prorocentrum foraminosum* (Dinophyta)

Zhanna V. Markina*, Albina V. Ognistaya**

* Institute of Marine Biology, National Scientific Centre of Marine Biology,
Far Eastern Branch. Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russia
** Far Eastern Federal University, Ajax Bay, 10, Vladivostok, 690922
* Ph.D., researcher, zhannav@mail.ru, ORCID 0000-0001-7135-1375
** graduate student, alya_lokshina@mail.ru, ORCID 0000-0002-9570-3192

* Маркина Жанна Владимировна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, zhannav@mail.ru, ORCID 0000-0001-7135-1375; Огнистая Альбина Васильевна, аспирант, alya_lokshina@mail.ru, ORCID 0000-0002-9570-3192.

© Маркина Ж.В., Огнистая А.В., 2023

Abstract. Influence of heavy metals as zinc and iron with concentrations of 50 and 100 mg/L on dynamics of the cells abundance, morphology, fluorescence of chlorophyll *a*, and green autofluorescence is examined for the microalgae *Prorocentrum foraminosum*. The impact was measured on the 3rd and 7th days of the experiment. Both elements in concentration above the maximum permissible levels reduce the cells number, with the higher impact for Fe³⁺. However, Fe³⁺ caused no changes in structure of cells. The impact of Zn²⁺ caused the cells deformation and excretion of the cellular content. The chloroplast fluorescence became less intensive under influence of Fe³⁺, but the green autofluorescence had increased under presence of Zn²⁺ and Fe³⁺ in the medium.

Keywords: *Prorocentrum foraminosum*, zinc, iron, cell number, chloroplast fluorescence, green autofluorescence of dinoflagellates

For citation: Markina Zh.V., Ognistaya A.V. Influence of zinc and iron on population dynamics, morphology and fluorescent properties of *Prorocentrum foraminosum* (Dinophyta), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 1, pp. 214–222. (In Russ.) DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-214-222. EDN: POCBQZ.

Введение

Загрязнение биосферы тяжелыми металлами представляет собой глобальную опасность. В морские воды тяжелые металлы попадают со сточными водами, что влияет на структуру естественных биологических сообществ. В результате сообщества фитопланктона могут резко меняться, приводя к изменению экосистем в целом [Masmoudi et al., 2013; Cheng et al., 2016]. Виды рода *Prorocentrum* регулярно регистрируются в разных районах Мирового океана как в тропических, так и в умеренных зонах [Faust, 1993; Taş, Okuş, 2011; Ясакова, 2013; Li et al., 2021]. Они являются важным компонентом пищевых цепей [Faust, 1993], однако пристальное внимание к видам данного рода связано с тем, что они вызывают «цветение» воды [Ясакова, 2013; Li et al., 2021]. *Prorocentrum foraminosum* встречается в зал. Петра Великого (Японского моря) с апреля по июнь и с сентября по октябрь на талломах макрофитов, при температурах 8–22 °С [Селина, 2017]. Данный вид способен продуцировать динофизистоксин-1, вызывающий диарею у теплокровных животных [Kameneva et al., 2015]. В связи с этим важно определить факторы, влияющие на массовое развитие данного вида.

Железо и цинк — биологически важные микроэлементы, однако становятся токсикантами при повышенных концентрациях в среде и поэтому нормируются. В прибрежных водах России Zn²⁺, Fe³⁺ регулярно регистрируются в концентрации 50 и 100 мкг/л [Качество морских вод..., 2020], что соответствует 1-й и 2-й величине предельно допустимой концентрации (ПДК) этих элементов в рыбохозяйственных водоемах.

Численность клеток — показатель, традиционно используемый для оценки действия веществ на микроводоросли [Panneerselvam et al., 2018; Tato and Beiras, 2019]. Хлоропласты — основная мишень действия токсических веществ у водорослей и высших растений, данный показатель изменяется при воздействии избытка тяжелых металлов и применяется для оценки физиологических нарушений у микроводорослей [Carfagna et al., 2013]. Динофлагелляты обладают зеленой автофлуоресценцией (ЗАФ), которая вызывается молекулами, отличными от хлорофилла *a*, и которую предложено использовать для оценки жизнеспособности водорослей [Tang and Dobbs, 2007; Tang et al., 2022].

Цель работы заключалась в оценке действия цинка и железа в концентрациях 50 и 100 мкг/л на рост, морфологию, флуоресценцию хлоропласта и зеленую автофлуоресценцию микроводоросли *Prorocentrum foraminosum* Faust, 1993.

Материалы и методы

Культура *Prorocentrum foraminosum* MBRU_PrRUS_16 предоставлена ресурсным центром «Морской биобанк» Национального научного центра им. А.В. Жирмунского. Водоросль выращивали на среде *f* [Guillard, Ryther, 1962], приготовленной на основе

фильтрованной и стерилизованной морской воды из условно чистого района соленостью 32 ‰ в 24-луночных планшетах с объемом культуральной среды 10 мл, при температуре 18 °С, интенсивности освещения 70 мкмоль/м²/с в области видимого света и свето-темновым периодом 12 ч свет : 12 ч темнота. В качестве инокулята использовали культуры на экспоненциальной стадии роста.

Исследуемые концентрации Zn²⁺, Fe³⁺ — 50 и 100 мкг/л — были выбраны на основе содержания этих металлов в прибрежных водах России и их предельно допустимых концентраций, изученные концентрации соответствуют ПДК и 2ПДК [Качество морских вод..., 2020]. Ионы Zn²⁺ добавляли в виде соли — ZnSO₄ × 7H₂O, Fe³⁺ — в виде FeCl₃ × 6H₂O — с пересчетом на ионы металлов.

Подсчет численности клеток произведен до и после эксперимента с добавлением ионов Zn²⁺ и Fe³⁺ в счетной камере Седвика-Рафтера под микроскопом. Фотографии выполнены с помощью системы визуализации Evos-5000 (Thermo Fisher Scientific, США) в проходящем свете и возбуждении флуоресценции хлорофилла а. Для возбуждения флуоресценции хлорофилла а применяли светодиодный куб Су5, ЗАФ — светодиодный куб GFP.

Эксперименты проводили в трех повторностях. Статистическую обработку выполняли с помощью программы Excel. Достоверность различий между выборками оценивали по критерию Манна-Уитни при уровне значимости p < 0,05.

Результаты и их обсуждение

Численность клеток *P. foraminosum* при всех исследованных концентрациях металлов в воде была ниже, чем в контрольной пробе, как на третьи, так и на седьмые сутки эксперимента (рис. 1). Следует отметить, что рост водорослей не подавлялся полностью: число клеток к седьмым суткам возрастало во всех случаях опыта. Наибольшее влияние на численность водоросли оказало железо (рис. 1).

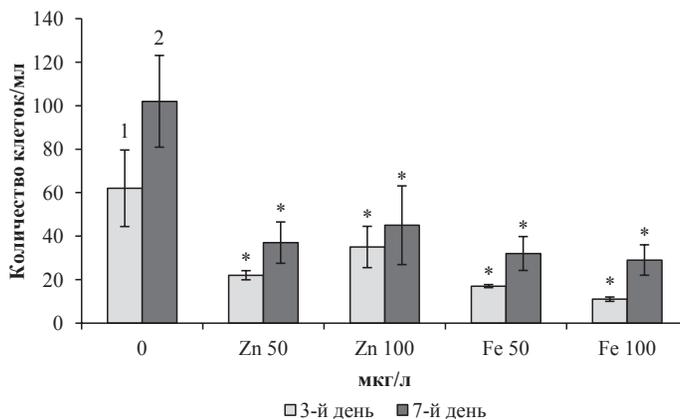


Рис. 1. Численность клеток *P. foraminosum* в контроле и при воздействии тяжелых металлов: столбики — среднее значение из 9 измерений трех повторностей опыта; отрезки — стандартное отклонение; звездочки — различия достоверны между опытом с металлами и контрольной пробой (0 — среда без добавления металла)

Fig. 1. Number of *Prorocentrum foraminosum* cells under influence of heavy metals and in the control samples: columns — average value of 9 measurements in 3 repetitions of the experiment; segments — standard deviation; asterisks — significant differences between the tested and control samples (0 — medium without addition of toxic metals)

В контроле на третьи сутки клетки вытянутой овоидной формы (рис. 2, а), флуоресценция хлорофилла а выраженная (рис. 2, б). ЗАФ менее яркая, чем флуоресценция хлорофилла а, отмечаемы более ярко флуоресцирующие компартменты (рис. 2, в). В контроле на третьи и седьмые сутки эксперимента форма клеток *P. foraminosum*, флуоресценция хлорофилла а и ЗАФ сохранялись неизменными (рис. 2).

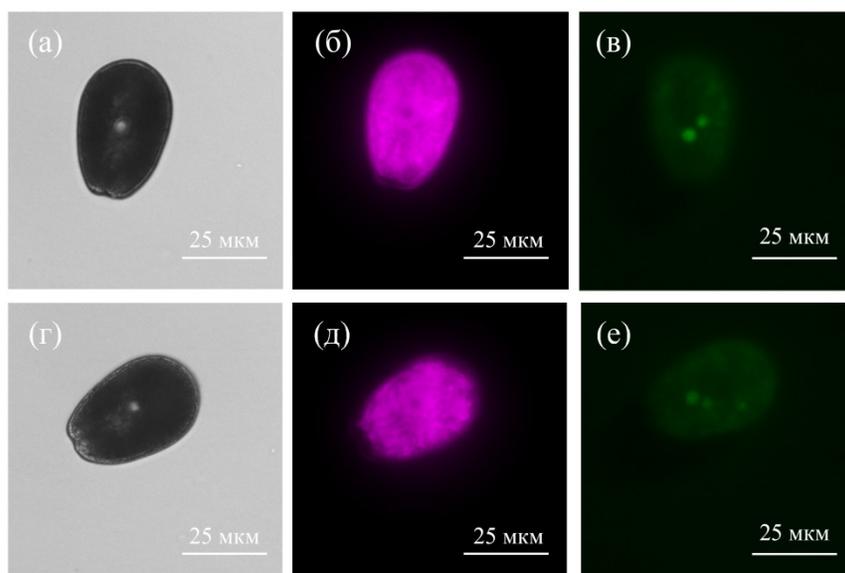


Рис. 2. Клетки *P. foraminosum* в контроле: а–в — третьи сутки, г–е — седьмые сутки эксперимента; а, г — световая микроскопия; б, д — флуоресценция хлоропласта; в, е — зеленая флуоресценция

Fig. 2. Cells of *P. foraminosum* in the control samples: а–в — 3rd day, г–е — 7th day of experiment; а, г — light microscopy; б, д — chloroplast fluorescence; в, е — green autofluorescence

Добавление Zn^{2+} в концентрациях 50 и 100 мкг/л приводило к морфологическим нарушениям, изменению флуоресценции хлоропласта и ЗАФ (рис. 3, а–е). Особенно выраженными были изменения на седьмые сутки опыта (рис. 3, ж–м).

Кроме замедления роста численности клеток (см. рис. 1), площадь вакуоли уменьшилась и отодвинулась от клеточной стенки (рис. 3, к), зеленая флуоресценция усилилась (рис. 3, и, м). Выявлена деформация клеток и истечение клеточного содержимого *P. foraminosum* на седьмые сутки эксперимента (рис. 3, ж, з). Ионы цинка необходимы для нормального функционирования растительного организма, однако в токсичных концентрациях данный металл замедляет процесс деления клеток, вызывает снижение содержания хлорофилла а [Baścik-Remisiewicz et al., 2009]. Данный элемент в повышенной концентрации влияет на электрон-транспортную цепь в хлоропластах в результате замены марганца на Zn^{2+} на участке разложения воды [Masmoudi et al., 2013].

При внесении Fe^{3+} в концентрации 50 мкг/л на третьи сутки изменения морфологии клеток не обнаружено (рис. 4, а), при этом отмечено нарушение структуры хлоропласта по его флуоресценции (рис. 4, б), ЗАФ была менее яркой, чем в контроле (рис. 4, в). Добавление 100 мкг/л токсиканта не вызывало нарушения морфологии (рис. 3, г) и структуры хлоропласта (рис. 4, д), ЗАФ была ярче, чем в контроле (рис. 4). На седьмые сутки наблюдаемые изменения сохранялись при обеих концентрациях металла (рис. 4, ж–м).

Как и другие тяжелые металлы, избыток Fe^{3+} стимулирует выработку активных форм кислорода, запускающих каскад повреждений биомолекул, однако механизм генерирования активных форм кислорода под воздействием Fe^{3+} изучен слабо. Предполагается, что оно происходит за счет реакции Фентона, реакций, подобных реакции Фентона и реакции Хабер-Вейсса [Rajabi Islami, Assareh, 2019; Rana, Prajapati, 2021]. При токсическом воздействии Fe^{3+} в первую очередь страдают хлоропласты и митохондрии [Rajabi Islami, Assareh, 2019], вероятно, в связи с этим мы наблюдали снижение флуоресценции хлоропласта у *P. foraminosum*.

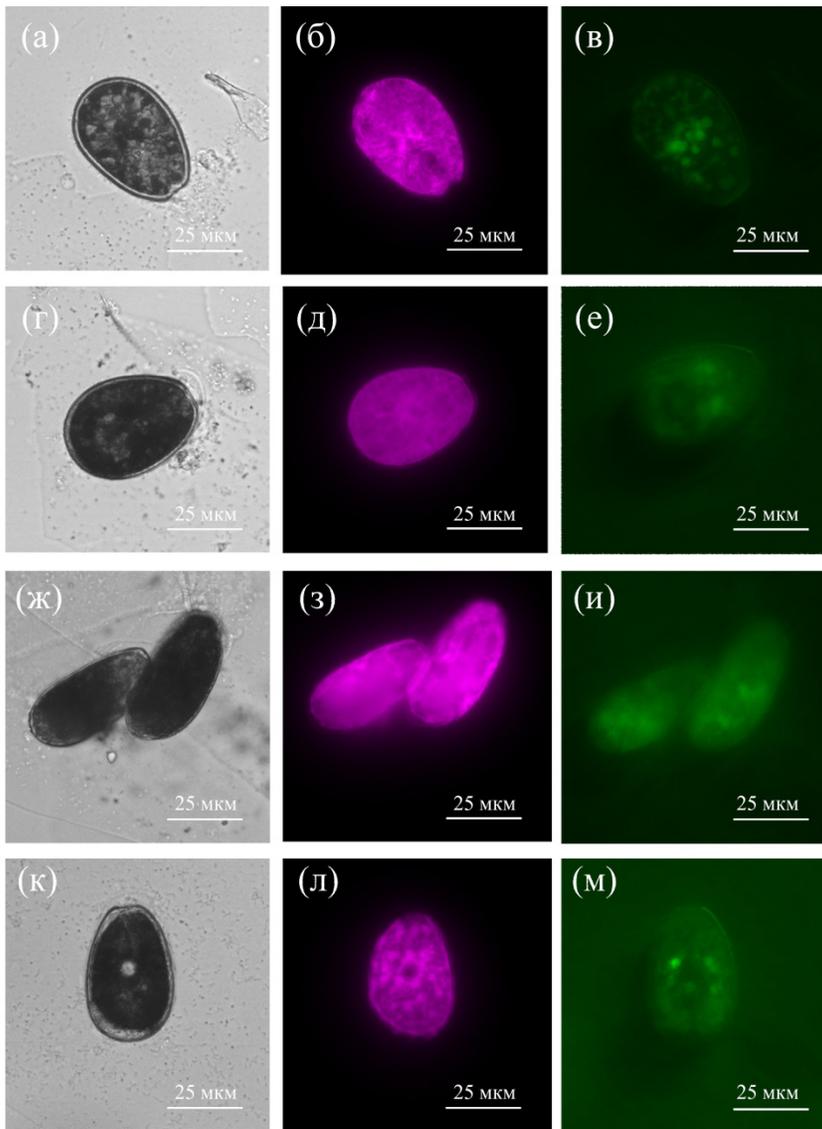


Рис. 3. Клетки *P. foraminosum* при воздействии Zn^{2+} : а, г, ж, к — световая микроскопия; б, д, з, л — флуоресценция хлоропласта; в, е, и, м — зеленая флуоресценция; а–в — третьи сутки эксперимента, 50 мкг/л Zn^{2+} ; г–е — третьи сутки эксперимента, 100 мкг/л Zn^{2+} ; ж–и — седьмые сутки эксперимента, 50 мкг/л Zn^{2+} ; к–м — седьмые сутки эксперимента, 100 мкг/л Zn^{2+}

Fig. 3. Cells of *P. foraminosum* exposed to Zn^{2+} : а, г, ж, к — light microscopy; б, д, з, л — chloroplast fluorescence; в, е, и, м — green fluorescence; а–в — 3rd day of exposition to 50 mg/L Zn^{2+} ; г–е — 3rd day of exposition to 100 mg/L Zn^{2+} ; ж–и — 7th day of exposition to 50 mg/L Zn^{2+} ; к–м — 7th day of exposition to 100 mg/L Zn^{2+}

Заклучение

Показано, что наибольшее влияние на численность водоросли оказал избыток Fe^{3+} . Однако изменения внешних структур клеток при добавлении Fe^{3+} не наблюдалось. Изученные металлы влияют на хлоропласт, что выражается в изменении его флуоресценции, и изменяют метаболизм микроводоросли, что выражается в изменении ЗАФ. Таким образом, Zn^{2+} и Fe^{3+} в концентрациях 50 и 100 мкг/л не являются фактором, вызывающим цветение *P. foraminosum*.

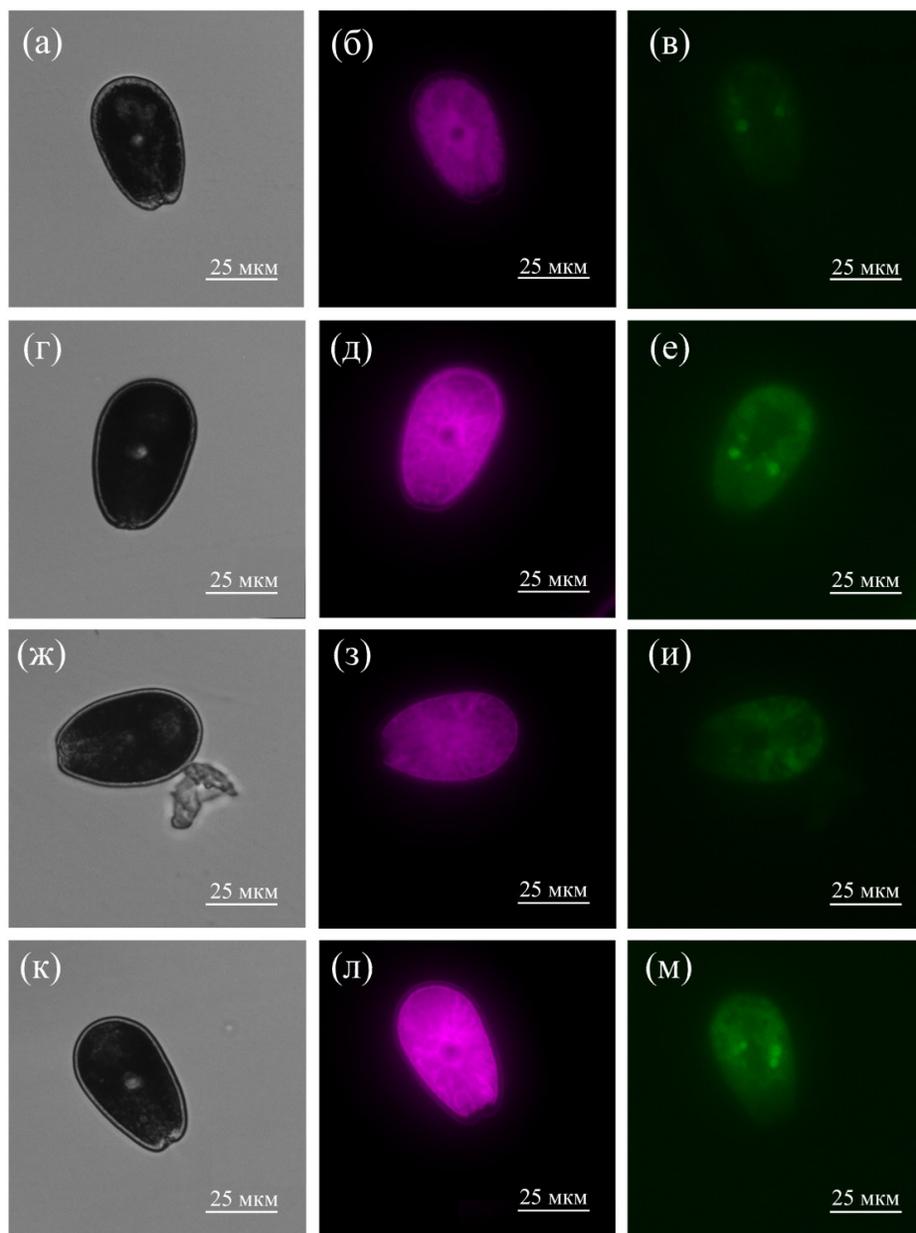


Рис. 4. Клетки *P. foraminosum* при воздействии Fe^{3+} : а, г, ж, к — световая микроскопия; б, д, з, л — флуоресценция хлоропласта; в, е, и, м — зеленая флуоресценция; а–в — третьи сутки эксперимента, 50 мкг/л Fe^{3+} ; г–е — третьи сутки эксперимента, 100 мкг/л Fe^{3+} ; ж–и — седьмые сутки эксперимента, 50 мкг/л Fe^{3+} ; к–м — седьмые сутки эксперимента, 100 мкг/л Fe^{3+}

Fig. 4. Cells of *P. foraminosum* exposed to Fe^{3+} : а, г, ж, к — light microscopy; б, д, з, л — chloroplast fluorescence; в, е, и, м — green fluorescence; а–в — 3rd day of exposition to 50 mg/L Fe^{3+} ; г–е — 3rd day of exposition to 100 mg/L Fe^{3+} ; ж–и — 7th day of exposition to 50 mg/L Fe^{3+} ; к–м — 7th day of exposition to 100 mg/L Fe^{3+}

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы благодарят ресурсный центр «Морской биобанк» Национального научного центра им. А.В. Жирмунского за предоставление культуры *Prorocentrum foraminosum* MBRU_PrRUS_16.

The authors are grateful to the Marine Biobank Resource Center of the A.V. Zhirmunsky National Scientific Center for providing a culture of *Prorocentrum foraminosum* MBRU_PrRUS_16.

Финансирование работы (FUNDING)

Результаты настоящего исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России «Динамика морских экосистем, адаптации морских организмов и сообществ к изменениям среды обитания», номер гос. регистрации ЕГИСУ 121082600038-3.

The results of this study were obtained within a framework of the state task from the Ministry of Education and Science of Russia «Dynamics of marine ecosystems, adaptation of marine organisms and communities to changes in the habitat», state registration number EGISU 121082600038-3.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с животными в качестве объектов.

The article does not concern to animal studies.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Ж.В. Маркина — разработка концепции исследования, постановка и проведение экспериментов, получение фотографического материала, написание текста статьи, работа с текстом статьи после рецензирования.

А.В. Огнистая — постановка и проведение экспериментов, подсчет численности клеток микроводорослей, статистическая обработка данных, работа с иллюстративным материалом, работа с текстом статьи после рецензирования.

Zh.V. Markina — the research concept, experiments, photography, writing and editing the text.

A.V. Ognistaya — experiments, counting the cells of microalgae, statistical data processing, illustrations, the text editing after reviews.

Список литературы

Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2019 / под ред. А.Н. Коршенко. — М. : Наука, 2020. — 230 с.

Селина М.С. Морфология и сезонная динамика потенциально токсичной микроводоросли *Prorocentrum foraminosum* Faust 1993 (Dinophyta) в заливе Петра Великого Японского моря // Биол. моря. — 2017. — Т. 43, № 3. — С. 169–174.

Ясакова О.Н. Сезонная динамика потенциально токсичных и вредоносных видов планктонных водорослей в Новороссийской бухте (Черное море) // Биол. моря. — 2013. — Т. 39, № 2. — С. 98–105.

Báscik-Remisiewicz A., Tomaszewska E., Labuda K., Tukaj Z. The effect of Zn and Mn on the toxicity of Cd to the green microalga *Desmodesmus armatus* cultured at ambient and elevated (2 %) CO₂ concentrations // Pol. J. Environ. Stud. — 2009. — Vol. 18, № 5. — P. 775–780.

Carfagna S., Lanza N., Salbitani G. et al. Physiological and morphological responses of Lead or Cadmium exposed *Chlorella sorokiniana* 211-8K (Chlorophyceae) // SpringerPlus. — 2013. — Vol. 2, № 147. — P. 1–7. DOI: 10.1186/2193-1801-2-147.

Cheng J., Qiu H., Chang Z. et al. The effect of cadmium on the growth and antioxidant response for freshwater algae *Chlorella vulgaris* // SpringerPlus. — 2016. — Vol. 5. — P. 1290–1297. DOI: 10.1186/s40064-016-2963-1.

Faust M.A. Three new benthic species of *Prorocentrum* (Dinophyceae) from Twin Cays, Belize: *P. maculosum* sp. nov., *P. foraminosum* sp. nov. and *P. formosum* sp. nov. // Phycologia. — 1993. — Vol. 32, Iss. 6. — P. 410–418. DOI: 10.2216/i0031-8884-32-6-410.1.

Guillard R.R.L., Ryther J.H. Studies of marine planktonic diatoms. 1. *Cyclotella nana* Hustedt, and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran. // *Can. J. Microbiol.* — 1962. — Vol. 8, № 2. — P. 229–239. DOI: 10.1139/m62-029.

Kameneva P.A., Efimova K.V., Rybin V.G., Orlova T.Y. Detection of dinophysistoxin-1 in clonal culture of marine dinoflagellate *Prorocentrum foraminosum* (Faust MA, 1993) from the Sea of Japan // *Toxins.* — 2015. — Vol. 7, № 10. — P. 3947–3959. DOI: 10.3390/toxins7103947.

Li M., Zhang F., Glibert P.M. Seasonal life strategy of *Prorocentrum minimum* in Chesapeake Bay, USA: Validation of the role of physical transport using a coupled physical–biogeochemical–harmful algal bloom model // *Limnol. Oceanogr.* — 2021. — Vol. 66, Iss. 11. — P. 3873–3886. DOI: 10.1002/lno.11925.

Masmoudi S., Nguyen-Deroche N., Caruso A. Cadmium, copper, sodium and zinc effects on diatoms: from heaven to hell — a review // *Cryptogamie, Algologie.* — 2013. — Vol. 34, № 2. — P. 185–225. DOI: 10.7872/crya.v34.iss2.2013.185.

Panneerselvam K., Marigoudar S.R., Dhandapani M. Toxicity of nickel on the selected species of marine diatoms and copepods // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* — 2018. — Vol. 100. — P. 331–337. DOI: 10.1007/s00128-018-2279-7.

Rajabi Islami H., Assareh R. Effect of different iron concentrations on growth, lipid accumulation, and fatty acid profile for biodiesel production from *Tetrademus obliquus* // *J. Appl. Phycol.* — 2019. — Vol. 31, № 6. — P. 3421–3432. DOI: 10.1007/s10811-019-01843-4.

Rana M.S., Prajapati S.K. Resolving the dilemma of iron bioavailability to microalgae for commercial sustenance // *Algal Research.* — 2021. — Vol. 59. 102458. DOI: 10.1016/j.algal.2021.102458.

Tang Y.Z. and Dobbs F.C. Green autofluorescence in dinoflagellates, diatoms, and other microalgae and its implications for vital staining and morphological studies // *Appl. Environ. Microbiol.* — 2007. — Vol. 73, № 7. — P. 2306–2313. DOI: 10.1128/AEM.01741-06.

Tang Y.Z., Shang L., Dobbs F.C. Measuring viability of dinoflagellate cysts and diatoms with stains to test the efficiency of facsimile treatments possibly applicable to ships' ballast water and sediment // *Harmful Algae.* — 2022. — Vol. 114. 102220. DOI: 10.1016/j.hal.2022.102220.

Taş S., Okuş E. A review on the bloom dynamics of a harmful dinoflagellate *Prorocentrum minimum* in the Golden Horn Estuary // *Turk. J. Fish. Aquat. Sci.* — 2011. — Vol. 11, № 4. — P. 673–681. DOI: 10.4194/1303-2712-v11_4_03.

Tato T. and Beiras R. The use of the marine microalga *Tisochrysis lutea* (*T-iso*) in standard toxicity tests; comparative sensitivity with other test species // *Front. Mar. Sci.* — 2019. — Vol. 6. — Article 488. DOI: 10.3389/fmars.2019.00488.

References

Kachestvo morskikh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam. Ezhegodnik 2016 (Marine Water Quality Based on Hydrochemical Parameters. Yearbook 2019), Korshenko, A.N., ed., Moscow: Nauka, 2020.

Selina, M.S., The morphology and seasonal dynamics of the potentially toxic microalga *Prorocentrum foraminosum* Faust 1993 (Dinophyta) in Peter the Great Bay, the Sea of Japan, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2017, vol. 43, no. 3, pp. 196–201. doi 10.1134/S1063074017030099

Yasakova, O.N., The seasonal dynamics of potentially toxic and harmful phytoplankton species in Novorossiysk Bay (Black Sea), *Russ. J. Mar. Biol.*, 2013, vol. 39, no. 2, pp. 107–115. doi 10.1134/S1063074013020090

Báscik-Remisiewicz, A., Tomaszewska, E., Labuda, K., and Tukaj, Z., The effect of Zn and Mn on the toxicity of Cd to the green microalga *Desmodesmus armatus* cultured at ambient and elevated (2 %) CO₂ concentrations, *Pol. J. Environ. Stud.*, 2009, vol. 18, no. 5, pp. 775–780.

Carfagna, S., Lanza, N., Salbitani, G., Basile, A., Sorbo, S., and Vona, V., Physiological and morphological responses of Lead or Cadmium exposed *Chlorella sorokiniana* 211-8K (Chlorophyceae), *SpringerPlus*, 2013, vol. 2, no. 147, pp. 1–7. doi 10.1186/2193-1801-2-147

Cheng, J., Qiu, H., Chang, Z., Jiang, Z., and Yin, W., The effect of cadmium on the growth and antioxidant response for freshwater algae *Chlorella vulgaris*, *SpringerPlus*, 2016, vol. 5, pp. 1290–1297. doi 10.1186/s40064-016-2963-1

Faust, M.A., Three new benthic species of *Prorocentrum* (Dinophyceae) from Twin Cays, Belize: *P. maculosum* sp. nov., *P. foraminosum* sp. nov. and *P. formosum* sp. nov., *Phycologia*, 1993, vol. 32, no. 6, pp. 410–418. doi 10.2216/i0031-8884-32-6-410.1

Guillard, R.R.L. and Ryther, J.H., Studies of marine planktonic diatoms. 1. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran., *Can. J. Microbiol.*, 1962, vol. 8, no. 2, pp. 229–239. doi 10.1139/m62-029

Kameneva, P.A., Efimova, K.V., Rybin, V.G., and Orlova, T.Y., Detection of dinophysistoxin-1 in clonal culture of marine dinoflagellate *Prorocentrum foraminosum* (Faust MA, 1993) from the Sea of Japan, *Toxins*, 2015, vol. 7, no. 10, pp. 3947–3959. doi 10.3390/toxins7103947

Li, M., Zhang, F., and Glibert, P.M., Seasonal life strategy of *Prorocentrum minimum* in Chesapeake Bay, USA: Validation of the role of physical transport using a coupled physical–biogeochemical–harmful algal bloom model, *Limnol. Oceanogr.*, 2021, vol. 66, no. 11, pp. 3873–3886. doi 10.1002/lno.11925

Masmoudi, S., Nguyen-Deroche, N., and Caruso, A., Cadmium, copper, sodium and zinc effects on diatoms: from heaven to hell — a review, *Cryptogamie, Algologie*, 2013, vol. 34, no. 2, pp. 185–225. doi 10.7872/crya.v34.iss2.2013.185

Panneerselvam, K., Marigoudar, S.R., and Dhandapani M., Toxicity of nickel on the selected species of marine diatoms and copepods, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2018, vol. 100, pp. 331–337. doi 10.1007/s00128-018-2279-7

Rajabi Islami, H. and Assareh, R., Effect of different iron concentrations on growth, lipid accumulation, and fatty acid profile for biodiesel production from *Tetrademus obliquus*, *J. Appl. Phycol.*, 2019, vol. 31, no. 6, pp. 3421–3432. doi 10.1007/s10811-019-01843-4

Rana, M.S. and Prajapati, S.K., Resolving the dilemma of iron bioavailability to microalgae for commercial sustenance, *Algal Research*, 2021, vol. 59, no. 102458. doi 10.1016/j.algal.2021.102458

Tang, Y.Z. and Dobbs, F.C., Green autofluorescence in dinoflagellates, diatoms, and other microalgae and its implications for vital staining and morphological studies, *Appl. Environ. Microbiol.*, 2007, vol. 73, no. 7, pp. 2306–2313. doi 10.1128/AEM.01741-06

Tang, Y.Z., Shang L., and Dobbs, F.C., Measuring viability of dinoflagellate cysts and diatoms with stains to test the efficiency of facsimile treatments possibly applicable to ships' ballast water and sediment, *Harmful Algae*, 2022, vol. 114, art. ID 102220. doi 10.1016/j.hal.2022.102220

Taş, S. and Okuş, E., A review on the bloom dynamics of a harmful dinoflagellate *Prorocentrum minimum* in the Golden Horn Estuary, *Turk. J. Fish. Aquat. Sci.*, 2011, vol. 11, no. 4, pp. 673–681. doi 10.4194/1303-2712-v11_4_03

Tato, T. and Beiras, R., The use of the marine microalga *Tisochrysis lutea* (*T-iso*) in standard toxicity tests; comparative sensitivity with other test species, *Front. Mar. Sci.*, 2019, vol. 6, art. ID 488. doi 10.3389/fmars.2019.00488

Поступила в редакцию 22.11.22 г.

После доработки 20.01.2023 г.

Принята к публикации 3.03.2023 г.

The article was submitted 22.11.2022; approved after reviewing 20.01.2023;
accepted for publication 3.03.2023