

Научная статья

УДК 579.64

doi: 10.17223/19988591/69/15

Метаболическая активность гетеротрофных микробных сообществ пойменных озёр среднего течения реки Оби

Эллина Георгиевна Никиткина¹, Инна Владимировна Луцаева²,
Лариса Геннадьевна Колесниченко³

^{1, 2, 3} *Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия*

¹ <https://orcid.org/0009-0005-6618-4644>, madderroot@mail.ru

² <https://orcid.org/0000-0002-7874-4558>, luschaeva@mail.ru

³ <https://orcid.org/0000-0001-9797-8985>, klg7777@mail.ru

Аннотация. Оценка функционального разнообразия – актуальный в экологии микроорганизмов и достаточно чувствительный способ обнаружения биологически важных закономерностей в жизнедеятельности микробных сообществ. Изучение функционального разнообразия с помощью метода мультисубстратного тестирования и оценка его взаимосвязей с количественными микробиологическими характеристиками в контексте сезонных изменений были выполнены для гетеротрофных микробных сообществ поверхностного и придонного слоя водной толщи трёх озёр среднеобской поймы, а также воды потока самой реки Оби в период летней межени, зимней межени (ледостав) и весеннего половодья (паводок). Сезонные изменения функциональных и количественных микробиологических показателей в пойменных водоёмах характеризовали сезонную сукцессию микробного сообщества. Полученные результаты говорят о космополитичности и функциональной взаимозамещаемости представителей природных микробных сообществ. Данное исследование обеспечивает возможность количественно оценить биогенную составляющую баланса углерода, её динамику и взаимосвязь с экологическими факторами.

Ключевые слова: гетеротрофные микроорганизмы, функциональное разнообразие, мультисубстратное тестирование, пойменное озеро, пойма реки Оби, Западная Сибирь

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2023-0005 – полевые исследования, отбор проб, проект № FSWM-2020-0019 – лабораторные исследования, камеральная обработка материалов).

Благодарности: коллективу УНУ «Система экспериментальных баз, расположенных вдоль широтного градиента» за помощь в организации и проведении полевых работ.

Для цитирования: Никиткина Э.Г., Луцаева И.В., Колесниченко Л.Г. Метаболическая активность гетеротрофных микробных сообществ пойменных озёр среднего течения реки Оби // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 69. С. 130–138. doi: 10.17223/19988591/69/15

Metabolic activity of heterotrophic microbial communities of floodplain lakes in the middle reaches of the Ob River

Ellina G. Nikitkina¹, Inna V. Luschaeva², Larisa G. Kolesnichenko³

^{1, 2, 3} *Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ <https://orcid.org/0009-0005-6618-4644>, madderroot@mail.ru

² <https://orcid.org/0000-0002-7874-4558>, luschaeva@mail.ru

³ <https://orcid.org/0000-0001-9797-8985>, klg7777@mail.ru

Summary. This study provides an opportunity to quantify the biogenic component of the carbon balance, its dynamics and relationship with environmental factors. This study is the first to evaluate the functioning of microbial communities in floodplain lakes in the middle reaches of the Ob River from the perspective of studying their metabolic activity in the context of seasonal and spatial environmental changes. The purpose of this work was to assess seasonal changes in the metabolic spectra of bacterial communities in water bodies of the Middle Ob floodplain. During the summer low water period (September 2023), winter low water period (snow period, March 2024) and spring flood (May 2024), functional diversity and quantitative microbiological characteristics of heterotrophic microbial communities in the surface and bottom layers of the water column of three floodplain lakes located in the vicinity of the TSU research station “Kaibasovo” (N 57.24569342272839, E 84.18459154598635), as well as the water of the Ob River itself, were studied. Functional diversity was determined using the multisubstrate testing method on 96-well Biolog Ecoplate test systems (USA) with calculation of the AWCD (average well-covered development) index. The TMC (total microbial count), obtained by direct counting of bacterial cells in a fluorescent-stained sample, was used as a quantitative characteristic. According to the nonparametric analysis of variance (Kruskal-Wallis ANOVA test, Median test), AWCD and TMC did not differ between lakes ($p > 0.05$). Seasonal changes were revealed for AWCD and TMC (see Fig. 1). AWCD correlated (Spearman rank correlations were used, $p < 0.05$) with the consumption of amino acids (0.52), carbohydrates (0.54), amines (0.50) and oxycarboxylic acids (0.62), TMC correlated with the consumption of carbohydrates (0.45) and polymers (0.63). The dynamics of AWCD were similar for the surface layer of all lakes, and did not show obvious patterns in the bottom layer. Throughout the year, higher TMC values were observed in the bottom layer, although this pattern was not observed for AWCD (see Fig. 1). This is due to the effect of ultraviolet radiation from the sun and the influence of allochthonous microflora on the current AWCD values. TMC in floodplain lakes increased during winter low water and had minimum values during the flood period. During the winter low water period, the AWCD and the consumption of most substrate groups are higher in the bottom layer. Seasonal differences in consumption of carboxylic acid phosphates (Kruskal-Wallis test: $H(2, N = 18) = 10.36$; $p = 0.01$; Median test: Chi-Square = 12.00; $df = 2$; $p = 0.00$) and polymers (Kruskal-Wallis test: $H(2, N = 18) = 7.18$; $p = 0.03$; Median test: Chi-Square = 9.33; $df = 2$; $p = 0.01$) have been identified (see Fig. 2). A large number of correlations between the consumption of different groups of substrates, including within the surface and bottom layers, indicate the cosmopolitan nature and functional interchangeability of representatives of microbial communities. Moreover, during low water, when conditions are most favorable for the growth of microflora, the number of correlations was maximum (9 out of 15); during the freeze-up period it decreased significantly (4 out of 15), which may indicate a targeted growth of more specialized microflora. In May, the number of correlations

increased again (5 out of 15). Seasonal changes in the functional and quantitative characteristics of microbial communities did not correspond to each other - the increase in the number of microorganisms did not cause an increase in functional diversity. The microflora suppression during flooding characterizes the demi-seasonal succession of the microbial community. Based on the data obtained, one can judge the functional cosmopolitanism and functional interchangeability of representatives of microbial communities of floodplain water bodies.

The article contains 2 Figures, 12 References.

Keywords: heterotrophic microorganisms; functional diversity, multisubstrate test, fluvial lake, Ob river floodplain, West Siberia

Fundings: This work was performed within the framework of a state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWM-2023-0005 - field research, sampling, project No. FSWM-2020-0019 - laboratory research, office processing of materials).

Acknowledgments: To the team of the USI "System of Experimental Bases Located Along the Latitudinal Gradient" for assistance in organizing and conducting field work.

For citation: Nikitkina EG, Luschaeva IV, Kolesnichenko LG. Metabolic activity of heterotrophic microbial communities of floodplain lakes in the middle reaches of the Ob River. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;69:130-138. doi: 10.17223/19988591/69/15

Введение

Исследование микробиологической трансформации органического вещества в пойменных экосистемах Сибири имеет большое значение, так как дает возможность количественно оценить биогенную составляющую баланса углерода, её динамику и взаимосвязь с экологическими и антропогенными факторами. Оценка функционального разнообразия является достаточно чувствительным, а потому актуальным в экологии микроорганизмов альтернативным подходом в изучении биоразнообразия и обнаружении биологически важных закономерностей в жизнедеятельности микробных сообществ [1]. Одним из наиболее востребованных способов оценки функционального разнообразия считается метод мультисубстратного тестирования, основанный на спектрофотометрическом определении интенсивности потребления углеродсодержащих субстратов микробными сообществами [2, 3]. Мультисубстратное тестирование успешно применяется в интересах почвенной микробиологии, однако в последнее время растёт популярность этого метода в исследованиях водных микробоценозов [4–7]. В представленном исследовании впервые оценено функционирование микробных сообществ пойменных озёр среднего течения реки Оби с позиции изучения их метаболической активности в контексте сезонных и пространственных изменений окружающей среды. Цель настоящей работы – оценка сезонного изменения метаболических спектров бактериальных сообществ водоёмов среднеобской поймы. Изучение функционального разнообразия и количественных микробиологических характеристик было выполнено для гетеротрофных микробных сообществ поверхностного и придонного слоя водной

толщи трёх пойменных озёр, а также воды потока самой р. Оби в период летней межени, зимней межени (ледостав) и весеннего половодья (паводок).

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использованы образцы воды трёх типичных озёр центральной поймы среднего течения реки Оби, расположенных в окрестностях исследовательской станции ТГУ «Кайбасово» [8], отобранные в сентябре 2023 (межень), марте 2024 (ледостав) и мае 2024 г. (паводок) с поверхностного и придонного слоя водной толщи. Подсчёт общего числа микроорганизмов (ОМЧ) осуществляли посредством окрашивания препаратов флуоресцентным двухкомпонентным красителем L7012 (LIVE/DEAD BacLight bacterial viability kit®) в соответствии с рекомендациями производителя с последующим подсчётом клеток согласно протоколу изготовителя с использованием люминесцентного микроскопа «Zeiss» Axio Imager Z2 (Германия). Оценку метаболической активности микроорганизмов осуществляли по методу мультисубстратного тестирования с помощью тест-системы «Biolog» Ecoplate (США). Планшеты инкубировали в термостате при 28°C 72 ч до проявления визуальной регистрируемой окраски ячеек. Изменение окраски в каждой лунке измеряли как показатель оптической плотности при 510 нм с использованием микропланшетного фотометра Multiscan FC («Thermo Scientific», China).

Для статистического анализа полученных данных использовались непараметрические методы. Для проверки распределений на нормальность применяли критерий Шапиро–Уилка для $p < 0,05$, для проверки соответствия выборок – критерий Kruskal–Wallis ANOVA для $p < 0,05$, значимые корреляции выявляли по критерию Спирмена при $p < 0,05$. В качестве качественного показателя функционального разнообразия микробоценоза применяли индекс AWCD (average well-covered development), который рассчитывали по изменению оптической плотности потребляемого субстрата в ячейках [3]. Статистические расчёты и графическую визуализацию осуществляли с использованием пакетов ПО Statistica 6.4 и MS Excel 2021.

Результаты исследования и обсуждение

Не выявлено статистически значимых отличий AWCD и ОМЧ для вод разных озёр ($p > 0,05$). Сезонные изменения для AWCD и ОМЧ представлены на рис. 1.

Индекс AWCD коррелировал по Спирмену с потреблением аминокислот (0,52; $p < 0,05$), углеводов (0,54; $p < 0,05$), аминов (0,50; $p < 0,05$) и оксикарбоновых кислот (0,62; $p < 0,05$), ОМЧ коррелировало с интенсивностью потребления углеводов (0,45; $p < 0,05$) и полимеров (0,63; $p < 0,05$).

Динамика значений показателя AWCD была сходна для поверхностного слоя всех озёр и не демонстрировала явных закономерностей в придонном. В течение всего года отмечались более высокие значения ОМЧ в придонном слое при том, что для AWCD эта закономерность не работала. Это связано с

тем, что воды придонного слоя более богаты питательными веществами, а размножение бактерий в поверхностных слоях подавляется солнечным ультрафиолетом.

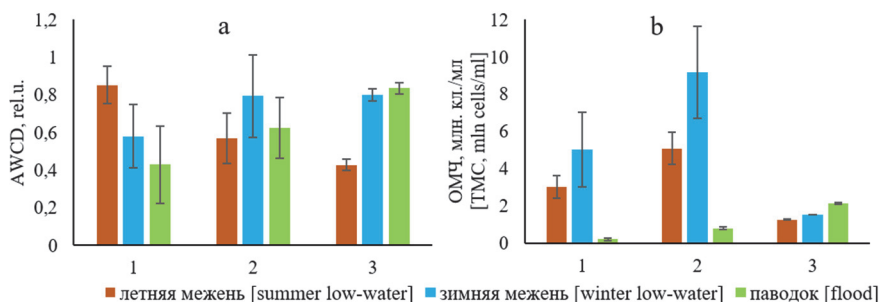


Рис. 1. Функциональное разнообразие и общая бактериальная обсеменённость водоёмов поймы Средней Оби: *a* – значения индекса функционального разнообразия AWCD (average well-covered development), *b* – показатель ОМЧ (общее микробное S-число), выраженное в млн клеток в 1 мл воды (1 – поверхностный слой озёр, 2 – придонный слой озёр, 3 – река Обь)

[Fig. 1. Functional diversity and total bacterial count in water reservoirs of middle Ob floodplain: *a* - values of the AWCD (average well-covered development) functional diversity index, *b* - TBC (total bacterial count) index, expressed in million cells in 1 ml of water (1 - surface layer of lakes, 2 - bottom layer of lakes, 3 - Ob River)]

ОМЧ в пойменных озёрах увеличивалось в зимнюю межень и имело минимальные значения в период паводка. Сравнивая полученные результаты со значениями индекса разнообразия AWCD, можно предполагать, что стабилизация условий зимой обеспечивает экспансию и интенсивный рост функционально компетентных микроорганизмов из придонных слоёв, так как именно в этом слое в зимнюю межень выше индекс AWCD и интенсивность употребления большинства групп субстратов.

В паводковый период ОМЧ было низким как в верхних, так и в нижних слоях (хотя в нижних достоверно выше, так как процессы паводкового перемешивания меньше влияют на состояние придонных слоёв). Снижение функционального разнообразия при паводке проявляется только в виде тенденции – вероятно, из-за привнесения аллохтонной микрофлоры, которая влияет на показатель функционального разнообразия, но не способна интенсивно размножаться и оказывать влияние на текущие количественные показатели. По всей видимости, в это время происходит сезонная сукцессия микробного сообщества.

В Оби показатели ОМЧ стабильно невысокие и обладают низкой сезонной изменчивостью (Kruskal–Wallis test: $H(2, N=3) = 2,00, p = 0,37$; Median test: Chi-Square = 3,00, $df = 2, p = 0,22$), что свойственно для текущих водоёмов. Индекс AWCD вырос в зимнюю межень, но в отличие от озёр продемонстрировал значительный скачок в период паводка, что можно связать с привнесением в поверхностные слои потока аллохтонной микрофлоры береговых смылов.

Для удобства оценки функциональной активности микробных сообществ органические субстраты были объединены в функциональные группы, в пределах которых оценивалась реакция сообществ [2, 7, 9].

По критерию Краскела–Уоллиса в разных озёрах сходно потребление всех субстратов, кроме оксикарбоновых кислот (Kruskal–Wallis test: $H(2, N = 18) = 6,17, p = 0,05$; Median test: Chi-Square = 4,00 $df = 2, p = 0,14$). Значимого влияния фактора глубины пробоотбора на потребление групп субстратов также выявлено не было. По этому же критерию выявлены сезонные отличия в потреблении фосфатов карбоновых кислот (Kruskal–Wallis test: $H(2, N = 18) = 10,36, p = 0,01$; Median test: Chi-Square = 12,00, $df = 2, p < 0,01$) и полимеров (Kruskal–Wallis test: $H(2, N = 18) = 7,18, p = 0,03$; Median test: Chi-Square = 9,33, $df = 2, p = 0,01$).

Сезонная динамика потребления функциональных групп субстратов представлена на рис. 2.

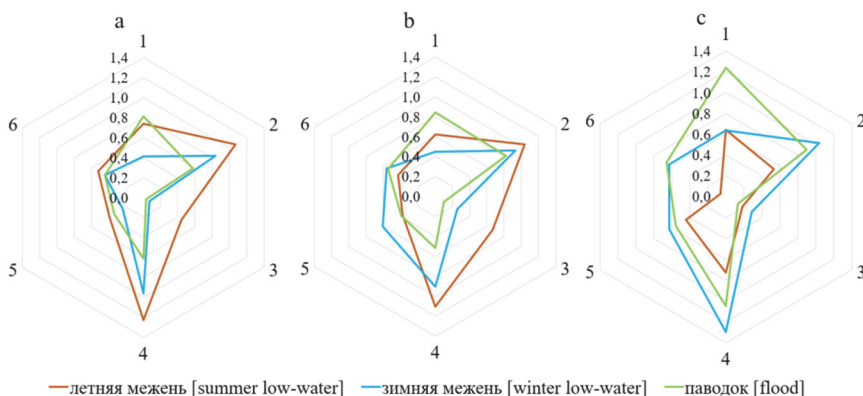


Рис. 2. Интенсивность употребления (по индексу развития цвета в ячейке AWCD) групп субстратов микробным сообществом пойменных водоёмов: *a* – поверхностный слой озёр, *b* – придонный слой озёр, *c* – река Обь (1 – аминокислоты, 2 – углеводы, 3 – фосфаты карбоновых кислот, 4 – полимеры, 5 – амины, 6 – оксикарбоновые кислоты)

[Fig. 2. Consumption (according to the AWCD index - average well-covered development) of substrate groups by the microbial community of floodplain water bodies: *a* - surface layer of lakes, *b* - bottom layer of lakes, *c* - Ob River (1 - amino acids, 2 - carbohydrates, 3 - phosphates of carboxylic acids, 4 - polymers, 5 - amines, 6 - oxycarboxylic acids)]

Наблюдаемая динамика может быть связана с газовым режимом водоёма: истощение запаса растворённого кислорода в снеговой период способствует использованию углеводов, а не аминокислот [7]. По всей видимости, в зимнюю межень начинают использоваться именно запасы фиксированного в углеводах углерода [7, 9, 10], а запасы аминокислот истощаются с отмиранием водорослей [11, 12], что способствует большей выживаемости компетентных микроорганизмов либо смене ферментативной стратегии бактерий-космополитов. В период снеготаяния и паводка снова начинают активно употребляться аминокислоты, а потребление углеводов и полимеров снижается, вероятно, из-за истощения субстрата и разбавления талыми водами [7].

Динамика потребления фосфатов карбоновых кислот указывает на экспансию микробиоты нижних слоёв вверх из-за обмеления водоёма в летнюю межень.

В воде р. Оби динамика употребления функциональных групп субстратов была совершенно иной.

Наблюдалась мультиколлинеарность показателей интенсивности потребления различных групп субстратов, в том числе и в пределах поверхностного и придонного слоёв, что говорит о космополитичности и функциональной взаимозамещаемости представителей природных микробных сообществ. При этом в межень, когда условия наиболее благоприятны для роста микрофлоры, мультиколлинеарность была максимальной (наблюдались корреляции для 9 пар субстратов из 15 возможных), а в период ледостава она значительно снизилась (4 из 15), что может свидетельствовать о точечном росте более специализированной микрофлоры. В мае число корреляций снова возрастало (5 из 15).

Заключение

Исследованные озёра поймы р. Оби не отличались друг от друга по численности микроорганизмов и функциональному разнообразию. Определено сезонное влияние пойменного режима на функциональные характеристики микроорганизмов пойменных водоёмов. Сезонные изменения функциональных и количественных характеристик микробоценозов друг другу не соответствовали – рост числа микроорганизмов не обуславливал увеличение функционального разнообразия. Динамика функциональных и количественных характеристик микробных сообществ в р. Оби отличалась от таковой в озёрах поймы. При этом динамика показателя функционального разнообразия и общего числа микроорганизмов для Оби имели сходный друг с другом характер. В летнюю межень функциональное разнообразие в поверхностных слоях выше, чем в придонных, а численность микроорганизмов, напротив, ниже. В период зимней межени, когда микробные сообщества функционируют в стабильных, но необычных подлёдных условиях, более активно развивается узкоспециализированная микробиота придонных слоёв. В период паводка деятельность микробных сообществ в озёрах сильно угнетена: разбавление тальмими водами, изменение газовых условий, истощение органического субстрата приводят к сильному снижению общего числа микроорганизмов. Угнетение микрофлоры при паводке характеризует демисезонную сукцессию микробного сообщества. Мультиколлинеарность показателей интенсивности потребления групп субстратов между собой указывает на функциональную универсальность представителей пойменных микробных сообществ.

Список источников

1. Baldrian P. The known and the unknown in soil microbial ecology // *FEMS Microbiology Ecology*. 2019. Vol. 95, № 2. PP. 1–9. doi: 10.1093/femsec/fiz005
2. Zak J.C., Willig M.R., Moorhead D.L., Wildman H.G. Functional diversity of microbial communities: a quantitative approach // *Soil Biology and Biochemistry*. 1994. Vol. 26, № 9. PP. 1101–1108. doi: 10.1016/0038-0717(94)90131-7
3. Garland J., Mills A. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization // *Applied and environmental microbiology*. 1991. Vol. 57, № 8. PP. 1–9. doi: 10.1128/aem.57.8.2351-2359.1991

4. Wang M., Fan Z., Wang R., Liu Z., Gao F., Zhang Z., Yi M., Lu M. Nitrogen removal performance, and microbial community structure of water and its association with nitrogen metabolism of an ecological engineering pond aquaculture system // *Aquaculture Reports*. 2022. Vol. 25. PP. 1–9. doi: 10.1016/j.aqrep.2022.101258
5. Miao L., Wang C., Adyel T.M., Wu J., Liu Z., You G., Meng M., Qu H., Huang L., Yu Y., Hou J. Microbial carbon metabolic functions of biofilms on plastic debris influenced by the substrate types and environmental factors // *Environment International*. 2020. Vol. 143. PP. 1–11. doi: 10.1016/j.envint.2020.106007.
6. Беленева И.А., Харченко У.В. Применение метода мультисубстратного тестирования состояния морских поверхностных вод // *Биология моря*. 2018. Т. 44, № 3. С. 172–178.
7. Tiquia S.M. Metabolic diversity of the heterotrophic microorganisms and potential link to pollution of the Rouge River // *Environmental Pollution*. 2010. Vol. 158, № 5. PP. 1435–1443. doi: 10.1016/j.envpol.2009.12.035
8. Kolesnichenko L.G., Lyutova E.S., Vorobiov S.N., Prokushkin A.S., Raudina T.V., Kolesnichenko Y.Y., Rozhkova-Timina I.O., Yasnova A.S., Pokrovsky O.S. Organic matter of floodplain lakes in the middle courses of the Ob River during the winter low-water season and the spring flood // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 400. PP. 1–9. doi: 10.1088/1755-1315/400/1/012007
9. Biddanda B., Benner R. Carbon, nitrogen, and carbohydrate fluxes during the production of particulate and dissolved organic matter by marine phytoplankton // *Limnology and Oceanography*. 1997. Vol. 42, № 3. PP. 506–518.
10. Grover J.P., Chrzanowski T.H. Seasonal patterns of substrate utilization by bacterioplankton: case studies in four temperate lakes of different latitudes // *Aquatic Microbial Ecology*. 2000. Vol. 23, № 1. PP. 41–54. doi: 10.3354/ame023041
11. Madigan M.T., Martinko K., Parker J. *Brock Biology of Microorganisms*, 8th ed. New Jersey: Prentice Hall International Inc., 1997. 1040 p.
12. Hellebust J.A. Excretion of some organic compounds by marine phytoplankton // *Limnology and Oceanography*. 1965. Vol. 10, № 2. PP. 192–206. doi: 10.4319/lo.1965.10.2.0192

References

1. Baldrian P. The known and the unknown in soil microbial ecology. *FEMS Microbiology Ecology*. 2019;95(2):1-9. doi: 10.1093/femsec/fiz005
2. Zak JC, Willig MR, Moorhead DL, Wildman HG. Functional diversity of microbial communities: a quantitative approach. *Soil Biology and Biochemistry*. 1994;26(9):1101-1108. doi: 10.1016/0038-0717(94)90131-7
3. Garland J, Mills A. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization. *Applied and environmental microbiology*. 1991;57(8):1-9. doi: 10.1128/aem.57.8.2351-2359.1991
4. Wang M, Fan Z, Wang R, Liu Z, Gao F, Zhang Z, Yi M, Lu M. Nitrogen removal performance, and microbial community structure of water and its association with nitrogen metabolism of an ecological engineering pond aquaculture system. *Aquaculture Reports*. 2022;25:1-9. doi: 10.1016/j.aqrep.2022.101258
5. Miao L, Wang C, Adyel TM, Wu J, Liu Z, You G, Meng M, Qu H, Huang L, Yu Y, Hou J. Microbial carbon metabolic functions of biofilms on plastic debris influenced by the substrate types and environmental factors. *Environment International*. 2020;143:1-11. doi: 10.1016/j.envint.2020.106007.
6. Beleneva IA, Charchenko UV. Primeneniye metoda multisubstratnogo testirovaniya sostoyaniya morskikh poverhnostnykh vod [Application of the multi-substrate testing method for the state of marine surface waters]. *Biologiya morya*. 2018;44(3):172-178. In Russian
7. Tiquia SM. Metabolic diversity of the heterotrophic microorganisms and potential link to pollution of the Rouge River. *Environmental Pollution*. 2010;158(5):1435-1443. doi: 10.1016/j.envpol.2009.12.035

8. Kolesnichenko LG, Lyutova ES, Vorobiov SN, Prokushkin AS, Raudina TV, Kolesnichenko YY, Rozhkova-Timina IO, Yasnova AS, Pokrovsky OS. Organic matter of floodplain lakes in the middle courses of the Ob River during the winter low-water season and the spring flood. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;400:1-9. doi: 10.1088/1755-1315/400/1/012007
9. Biddanda B, Benner R. Carbon, nitrogen, and carbohydrate fluxes during the production of particulate and dissolved organic matter by marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography*. 1997;42(3):506-518.
10. Grover JP, Chrzanowski TH. Seasonal patterns of substrate utilization by bacterioplankton: case studies in four temperate lakes of different latitudes. *Aquatic Microbial Ecology*. 2000;23(1):41-54. doi: 10.3354/ame023041
11. Madigan MT, Martinko K, Parker J. Brock Biology of Microorganisms, 8th ed. New Jersey: Prentice Hall International Inc.; 1997. 1040 p.
12. Hellebust JA. Excretion of some organic compounds by marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography*. 1965;10(2):192-206. doi: 10.4319/lo.1965.10.2.0192

Информация об авторах:

Никиткина Эллина Георгиевна, м.н.с. лаборатории биоразнообразия и экологии Томского государственного университета (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6618-4644>

E-mail: madderroot@mail.ru

Лушаева Инна Владимировна, доцент, канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории биоразнообразия и экологии Томского государственного университета (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7874-4558>

E-mail: luschaeva@mail.ru

Колесниченко Лариса Геннадьевна, доцент, канд. биол. наук, лаборатория биоразнообразия и экологии Томского государственного университета (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9797-8985>

E-mail: klg7777@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Ellina G. Nikitkina, Junior researcher of the Laboratory of biodiversity and ecology, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6618-4644>

E-mail: madderroot@mail.ru

Inna V. Luschaeva, Cand.Sci. (Biol.), Senior researcher of the Laboratory of biodiversity and ecology, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7874-4558>

E-mail: luschaeva@mail.ru

Larisa G. Kolesnichenko, Cand.Sci. (Biol.), Senior researcher of the Laboratory of biodiversity and ecology, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9797-8985>

E-mail: klg7777@mail.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 24.08.2024;
одобрена после рецензирования 24.11.2024; принята к публикации 03.03.2025.*

*The article was submitted 24.08.2024;
approved after reviewing 24.11.2024; accepted for publication 03.03.2025.*