

Оригинальная статья

УДК 574.5.579.68

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-3-323-330>

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ГЕТЕРОТРОФНОГО БАКТЕРИОПЛАНКТОНА В УСТЬЕВОЙ ЧАСТИ УСИНСКОГО ЗАЛИВА КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Е. С. Краснова ✉, М. В. Уманская

*Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна РАН
Россия, 445003, г. Тольятти, ул. Комзина, д. 10*

Поступила в редакцию 01.06.2023 г., после доработки 13.02.2024 г., принята 14.02.2024 г., опубликована 30.09.2024 г.

Аннотация. Представлены данные многолетних наблюдений за развитием бактериопланктона в устьевом участке Усинского залива Куйбышевского водохранилища в летне-осенний период. Общая численность гетеротрофного бактериопланктона изменялась в пределах $(1.61 - 7.44) \times 10^6$ кл./мл, биомасса – 39.01 – 249.53 мкгС/л, что соответствует III – V классам качества воды. В период с 2010 до 2017 гг. общая численность гетеротрофного бактериопланктона немонотонно снижалась, а начиная с 2021 г. зафиксировано ее существенное увеличение. В составе гетеротрофного бактериопланктона преобладали одиночные свободноплавающие клетки, преимущественно кокки и коккобациллы, однако во время цветения цианобактерий доля палочковидных клеток в численности закономерно увеличивалась. В летние месяцы в воде присутствовали пикоцианобактерии и частицы пикодетрита, однако их вклад в общий органический углерод пикосестона был незначителен.

Ключевые слова: гетеротрофные бактерии, автотрофный пикопланктон, пикодетрит, Усинский залив, Куйбышевское водохранилище

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института экологии Волжского бассейна РАН – филиала Самарского научного центра РАН (№ 122032500063-0).

Соблюдение этических норм. В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Краснова Е. С., Уманская М. В. Многолетняя динамика развития гетеротрофного бактериопланктона в устьевой части Усинского залива Куйбышевского водохранилища // Поволжский экологический журнал. 2024. № 3. С. 323 – 330. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-3-323-330>

✉ Для корреспонденции. Лаборатория биоразнообразия Института экологии Волжского бассейна РАН.

ORCID и e-mail адреса: Краснова Екатерина Сергеевна: <https://orcid.org/0000-0002-4062-9714>, Krasnova-eck@mail.ru;
Уманская Марина Викторовна: <https://orcid.org/0000-0003-2097-4913>, mvumansk67@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Река Уса относится к равнинным рекам, берущим начало на восточных склонах Приволжской возвышенности, впадает в Куйбышевское водохранилище, образуя Усинский залив. На правобережной стороне залива расположен НП «Самарская Лука», преимущественно зоны хозяйственного и рекреационного назначения, что и определяет особенности антропогенного воздействия на экосистему залива. Основными источниками антропогенного загрязнения являются сбросы коммунально-бытовых сточных вод сельских, городских поселений и различных лагерей отдыха и турбаз, не оборудованных системами канализации бытовых отходов, а также поверхностный сток с сельскохозяйственных угодий. Кроме того, Усинский залив подвержен сильному влиянию Жигулевской ГЭС и Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища. Таким образом, устьевой участок залива испытывает на себе влияние всей совокупности перечисленных факторов.

Микроорганизмы являются основными участниками процессов, происходящих в водоемах, таких как круговорот органического вещества и трансформация элементов (Drabkova, 1981; Romanenko, 1985; Romanenko, 2023). Большую часть планктонных бактерий составляют гетеротрофные бактерии, питающиеся готовыми органическими веществами. Им принадлежит главная роль в разложении (деструкции) органического вещества. Кроме того, гетеротрофные бактерии являются важным пищевым объектом в водоёмах для микрозоопланктона, включая простейших (Callieri et al., 2002; Kopylov, Kosolapov, 2008; Gilbert, 2022; Weisse et al., 2021). Наряду с ними в планктоне присутствуют автотрофные пикоцианобактерии, которые могут вносить существенный вклад в формирование биомассы и продукции фитопланктона. Благодаря своим небольшим размерам пикоцианобактерии имеют преимущества перед более крупным фитопланктоном в скорости поглощения биогенных элементов и солнечной энергии. Кроме того, они наряду с гетеротрофными бактериями входят в рацион организмов микрозоопланктона (Stockner, 1991; Callieri et al., 2002; Callieri, 2008; Somogyi et al., 2020).

В целом автотрофный и гетеротрофный бактериопланктон является постоянным компонентом водных экосистем, а его вклад в суммарную биомассу планктона и степень участия в планктонных пищевых сетях существенно зависят от условий среды и типа водного объекта (Raven, 1998; Krasnova, Umanskaya, 2021; Romanenko, 2023; Chkili et al., 2024). Количественные и функциональные показатели бактериопланктона объективно отражают трофический статус водоемов и позволяют оценить их экологическое состояние.

Цель работы – исследовать развитие гетеротрофного и автотрофного бактериопланктона в условиях сильной антропогенной нагрузки в сезонном и многолетнем аспектах на примере устьевого участка залива равнинного водохранилища.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Методы отбора и анализа проб. Исследования проводили в летне-осенние периоды с 2010 по 2022 г. в устьевом участке Усинского залива Куйбышевского водохранилища. На протяжении большей части исследованного периода отбирались интегральные пробы. Исключение составили июль 2011, август 2014 и сен-

тябрь 2015 гг., когда были отобраны пробы из поверхностного и придонного горизонтов. Одновременно с отбором проб на бактериопланктон измеряли температуру воды на всех горизонтах отбора проб. Отобранные пробы фиксировали стерильным раствором формалина до конечной концентрации 4%. Для учета бактериопланктона, автотрофного пикопланктона (АПП) и пикодетрита пробы воды концентрировали фильтрованием через мембранные нитроцеллюлозные фильтры с диаметром пор 0.2 мкм.

Общую численность бактериопланктона и количество пико- и нанодетритных частиц определяли методом эпифлуоресцентной микроскопии с использованием флуорохрома DAPI (Porter, Feig, 1980; Mostajir et al., 1995; Chateauvert et al., 2012). Численность АПП определяли методом эпифлуоресцентной микроскопии с использованием синего и зеленого фильтров возбуждения для обнаружения автофлуоресценции фотосинтетических пигментов. В составе АПП были учтены все клетки с размером менее 3 мкм. Размеры клеток бактерий, АПП и частиц детрита оценивали с помощью программы анализа изображений UTHSCSA Image Tools 3.00 (UTHSCSA, USA). Удельную массу клеток принимали равной единице, общую биомассу рассчитывали по (Kuznetsov, 1989). Биомассу выражали в единицах органического углерода и рассчитывали исходя из данных по содержанию углерода в клетках бактерий и частицах детрита (Mostajir et al., 1995; Kopylov, Kosolapov, 2008). Препараты просматривали при увеличении $\times 1000$ на микроскопе Leica DM 5500 B (Leica Microsystems, Germany). Класс качества воды по бактериологическим показателям оценивали в соответствии с классификацией (RD 52.24.309-92, 1992).

Зависимость микробиологических показателей от температуры воды определяли с помощью корреляционного анализа (коэффициент корреляции Пирсона r). Статистическая обработка и визуализация данных выполнены в пакетах программ Statistica 6.1 (StatSoft Inc., OK, USA) и Excel 12.0 (Microsoft Corp., USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гетеротрофный бактериопланктон. В период наблюдений в устьевой части Усинского залива общая численность гетеротрофного бактериопланктона (ОЧБ) и его биомасса варьировали в довольно широких пределах ($(1.61 - 7.44) \times 10^6$ кл./мл и 39.01 – 249.53 мкгС/л соответственно). В среднем ОЧБ была равна $4.22 \pm 2.03 \times 10^6$ кл./мл; а общая биомасса составляла 112.24 ± 71.55 мкгС/л. Коэффициент вариации составил 48.1% (численности) и 63.7% (биомассы), что свидетельствует об относительно небольшой вариабельности бактериопланктона. Как и следовало ожидать, ОЧБ достоверно коррелировала с температурой воды ($r = 0.92$, $p < 0.001$). При расчете коэффициента корреляции в случае интегральных проб использовали среднюю температуру для столба воды, в остальных случаях – температуру горизонта отбора пробы. В период с 2010 до 2017 г. общая численность гетеротрофного бактериопланктона немонотонно снижалась, а в 2021 – 2022 гг. зафиксировано ее существенное увеличение. Наибольшая ОЧБ за весь период наблюдений была зарегистрирована в августе 2022 г. (рис. 1). Средний объем бактериальных клеток Усинского залива составил 0.129 ± 0.06 мкм³.

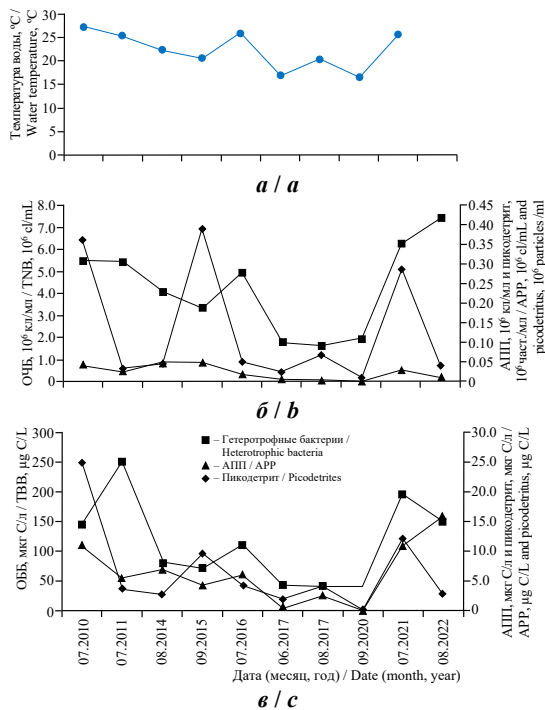


Рис. 1. Многолетняя динамика изменения температуры воды (а), численности (б) и биомассы (в) гетеротрофного бактериопланктона, АПП и пикодетритных частиц в устьевом участке Усинского залива. ОЧБ – общая численность гетеротрофных бактерий, ОББ – общая биомасса гетеротрофных бактерий. Для интегральных проб на графике дана средняя температура для столба воды. В июле 2011, августе 2014 и сентябре 2015 гг., когда были отобраны только поверхностные и придонные пробы, на графиках приведены средние значения для температуры, бактерий, АПП и детрита

Fig. 1. Long-term dynamics of changes in water temperature (a), the abundance (b) and biomass (c) of heterotrophic bacterioplankton, autotrophic picoplankton (APP) and picodetrital particles in the mouth area of the Usinsky Bay. TNB is the total numbers of heterotrophic bacteria, TBB is the total biomass of heterotrophic bacteria. The graph shows the average temperature of the water column for integral samples. In July 2011, August 2014 and September 2015, when only surface and bottom samples were taken, the graphs show the average values for temperature, bacteria, APP and detritus

В составе бактериопланктона Усинского залива в исследованный период преобладали одиночные свободноплавающие гетеротрофные бактерии. Вклад агрегированных и нитевидных бактерий был весьма низким за весь период наблюдений. Агрегированный бактериопланктон в основном был представлен клетками, ассоциированными с частицами детрита и, значительно реже, с клетками или колониями фитопланктона. Максимальная численность агрегированного бактериопланктона была зафиксирована в августе 2022 г. (13.2% от ОЧБ). В сентябре 2020 г. агрегированный бактериопланктон не был обнаружен ни в одной пробе. Многоклеточные нити были обнаружены только в пробах 2010, 2011, 2016 и в 2021 гг., причем их вклад в общую численность и биомассу был незначительным и не превышал 0.5%. Надо отметить, что именно в эти периоды в Усинском заливе наблюдалось цветение цианобактерий. Одноклеточные нити постоянно присутствовали в пробах в период наблюдений и являлись неотъемлемой составляющей гетеротрофного бактериопланктона, несмотря на их малую численность.

В среднем в течение всего периода наблюдений в составе бактериопланктона преобладали кокки и коккобациллы, но соотношение основных морфологических групп бактерий изменялось в зависимости от месяца отбора проб и уровня развития цианобактерий (рис. 2). Так, до нача-

ла массового развития цианобактерий (июнь), в его терминальной фазе и после завершения (август – сентябрь) около половины ОЧБ составляли кокки ($52 \pm 11\%$). Во время массового цветения (июль) существенно возрастал вклад палочковидных клеток (до 72% ОЧБ в отдельных пробах, составляя в среднем $41 \pm 26\%$). Доля коккобацилл была относительно стабильной и в среднем составляла $35 \pm 9\%$, в ее колебаниях не выявлено сезонных или межгодовых закономерностей.

Автотрофный пикопланктон (АПП) представлен в основном одиночными клетками пикоцианобактерий и практически постоянно регистрировался в планктоне устьевого участка Усинского залива, за исключением сентября 2020 г. (см. рис. 1). Средняя численность АПП составляла $0.023 \pm 0.018 \times 10^6$ кл./мл, изменяясь от 0 до 0.047×10^6 кл./мл, а средняя биомасса – 6.33 ± 5.02 мкгС/л ($0 - 15.82$ мкгС/л). Средний объем клеток АПП составил 1.57 ± 0.76 мкм³. Закономерных сезонных или межгодовых изменений численности или биомассы АПП не выявлено.

Пикодетритные частицы (ПД) в период наблюдений так же, как и АПП, постоянно присутствовали в пробах (см. рис. 1). Количество пикодетритных частиц существенно изменялось в разные годы ($KB = 117\%$), среднее их количество составляло $0.13 \pm 0.15 \times 10^6$ частиц/мл, а средняя масса – 6.6 ± 7.3 мкгС/л. Наибольшее количество пикодетритных частиц (0.389×10^6 част./мл) было зарегистрировано в сентябре 2015 г., одновременно с максимумом автотрофного пикопланктона. Однако подобные аномально высокие количества ПД в 2010 и 2021 гг. не сопровождалась повышенной численностью АПП (см. рис. 1).

Основу биомассы пикосистона в течение всего периода наблюдений составляли гетеротрофные бактерии. Наибольший суммарный вклад АПП и ПД в структуру пикосистона регистрировался во время цветения, а в конце сентября, после прекращения цветения оба компонента практически исчезали из пикосистона (рис. 3).

Как известно, бактериопланктон, пикофитопланктон (АПП) и пикодетрит используются в пищу одними и теми же потребителями (Fahnenstiel, 1991; Posch, 1995; Weisse et al., 2021), поэтому значительное присутствие в воде последнего компонента может снижать интенсивность потребления гетеротрофных бактерий и пикофитопланктона планктонными фильтраторами (Mostajir et al., 1995; Sadchikov, Ostroumov, 2017; Gilbert, 2022). Исходя из полученных нами результатов, можно предположить, что ни АПП, ни ПД не играли существенной роли в экосистеме устьевого участка Усинского залива в летне-осенние периоды 2010 – 2022 гг.

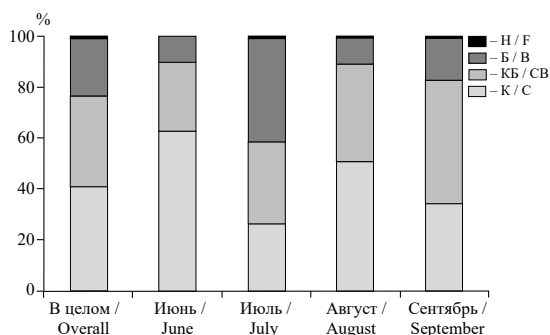


Рис. 2. Морфологическая структура гетеротрофного бактериопланктона: Н – нити, Б – бациллы, КБ – коккобациллы, К – кокки. По оси Y – вклад отдельных морфологических групп клеток в общую численность
Fig. 2. Morphological structure of heterotrophic bacterioplankton: F – filamentous, B – bacilli, CB – cocco-bacilli, C – cocci. The Y axis shows the share of individual morphological groups of cells in the total abundance

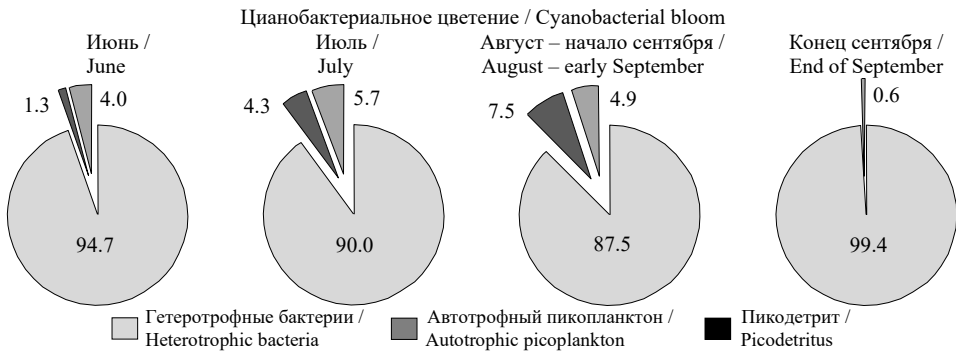


Рис. 3. Сезонные изменения структуры пикосистона устьевых участка Усинского залива (по вкладу в общую биомассу, %)

Fig. 3. Seasonal changes in the structure of picosystem in the mouth area of the Usinsky Bay (according to the share in the total biomass, %)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общая численность гетеротрофного бактериопланктона и его биомасса в Усинском заливе Куйбышевского водохранилища варьировали в довольно широких пределах ($(1.61 - 7.44) \times 10^6$ кл./мл и $39.01 - 249.53$ мкгС/л соответственно). В среднем общая численность гетеротрофных бактерий была равна $4.22 \pm 2.03 \times 10^6$ кл./мл; а общая биомасса составляла 112.24 ± 71.55 мкгС/л, что соответствует IV классу качества воды (загрязненные). Надо отметить, что по величине ОЧБ в июле и августе 2017 г. и в сентябре 2020 г. вода относилась к III классу качества, а в июле 2010 г., июле 2011 г., июне 2021 г. и августе 2022 г. – к V классу. В период с 2010 до 2017 г. общая численность бактерий немонотонно снижалась, а начиная с 2021 г. было зафиксировано ее существенное увеличение.

В составе бактериопланктона в исследованный период преобладали одиночные свободноплавающие гетеротрофные бактерии, причем во время цветения цианобактерий заметно возрастало количество палочковидных клеток. Вклад агрегированных и нитевидных бактерий был низким в течение всего периода наблюдений. Несмотря на то что автотрофный пикопланктон и пикодетрит постоянно присутствовали в пикосистоне в летние месяцы, их средний вклад в общий органический углерод составил 10%, причем вклады обоих компонентов были близкими (5.1% автотрофный пикопланктон и 5.3% пикодетрит). Изменения структуры гетеротрофного бактериопланктона и пикосистона в целом носили сезонный характер и были связаны в большей степени с уровнем развития и составом цианобактерий, а не с годом отбора проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Callieri C. Picophytoplankton in freshwater ecosystems: The importance of small-sized phototrophs. *Journal of Freshwater Reviews*, 2008, vol. 1, iss. 1, pp. 1–28. <https://doi.org/10.1608/FRJ-1.1.1>
- Callieri C., Karjalainen S. M., Passoni S. Grazing by ciliates and heterotrophic nanoflagellates on picocyanobacteria in Lago Maggiore, Italy. *Journal of Plankton Research*, 2002, vol. 24, iss. 8, pp. 785–796. <https://doi.org/10.1093/plankt/24.8.785>

Chateauvert C. A., Lesack L. F. W., Bothwell M. L. Abundance and patterns of transparent exopolymer particles (TEP) in Arctic floodplain lakes of the Mackenzie River Delta. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, vol. 117, iss. 4, article no. G04013. <https://doi.org/10.1029/2012JG002132>

Chkili O., Saint B  t B., Kousri K. M., Meddeb M., Gauvin P., David V., Safi G., Hlaili A. S., Niquil N. Typology of planktonic food webs and associated emerging properties as indicators of the ecological status of a permanently disturbed Gulf of Gab  s. *Journal of Marine Systems*, 2024, vol. 242, article no. 103948. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2023.103948>

Drabkova V. G. *Zonal Change in the Intensity of Microbiological Processes in Lakes*. Leningrad, Nauka, 1981. 212 p. (in Russian).

Fahnenstiel G. L., Carrick H. J., Iturriaga R. Physiological characteristics and foodweb dynamics of *Synechococcus* in lakes Huron and Michigan. *Journal of Limnology and Oceanography*, 1991, vol. 36, iss. 2, pp. 219–234.

Gilbert J. J. Food niches of planktonic rotifers: Diversification and implications. *Journal of Limnology and Oceanography*, 2022, vol. 67, iss. 10, pp. 2218–2251. <https://doi.org/10.1002/lno.12199>

Kopylov A. I., Kosolapov D. B. *Bacterioplankton of the Upper and Middle Volga Reservoirs*. Moscow, Modern Humanitarian University Publ., 2008. 377 p. (in Russian).

Krasnova E. S., Umanskaya M. V. Spatial distribution of picoseston in the Saratov reservoir in summer. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2021, no. 2, pp. 176–190 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-2-176-190>

Kuznetsov S. I., Dubinina G. A. *Methods of Studying Aquatic Microorganisms*. Moscow, Nauka, 1989. 288 p. (in Russian).

Mostajir B., Dolan J. R., Rassoulzadegan F. A simple method for the quantification of a class of labile marine pico- and nano-sized detritus: DAPI Yellow Particles (DYP). *Journal of Aquatic Microbial Ecology*, 1995, vol. 9, pp. 259–266.

Porter K. G., Feig Y. S. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Journal of Limnology and Oceanography*, 1980, vol. 25, iss. 5, pp. 943–948.

Posch T. Fine particulate detritus as a potential food source for bacterivorous ciliates. *European Journal of Protistology*, 1995, vol. 31, iss. 4, pp. 455.

Raven J. A. The twelfth tansley lecture. Small is beautiful: The picophytoplankton. *Journal of Functional Ecology*, 1998, vol. 12, iss. 4, pp. 503–513.

RD 52.24.309-92. Methodical instructions. *Organization and conduct of routine observations of land surface water pollution on the Roskomhydromet network. Protection of Nature. Hydrosphere*. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1992. 67 p. (in Russian).

Romanenko A. V. Seasonal dynamics of the structural and functional organization of heterotrophic bacterioplankton in the mouth area of the Small Il'd River. *Inland Water Biology*, 2023, vol. 16, suppl. 1, pp. 67–74. <https://doi.org/10.1134/S199508292307012X>

Romanenko V. I. *Microbial Processes of Production and Destruction of Organic Matter in Inland Aquatic Environments*. Leningrad, Nauka, 1985. 295 p. (in Russian).

Sadchikov A. P., Ostroumov S. A. Ecological and trophic role of detritus in water bodies. *Rybnoe hozyajstvo*, 2017, no. 2, pp. 65–69 (in Russian).

Somogyi B., Felf  ldi T., T  th L. G., Bernat G., V  r  s L. Photoautotrophic picoplankton – a review on their occurrence, role and diversity in Lake Balaton. *Biologia Futura*, 2020, vol. 71, iss. 4, pp. 371–382. <https://doi.org/10.1007/s42977-020-00030-8>

Stockner J. G. Autotrophic picoplankton in freshwater ecosystem: The review from the summit. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 1991, vol. 76, iss. 4, pp. 483–492. <https://doi.org/10.1002/iroh.19910760402>

Weisse T., Jezberova J., Moser M. Picoplankton feeding by the ciliate *Vorticella similis* in comparison to other peritrichs emphasizes their significance in the water purification process. *Ecological Indicators*, 2021, vol. 121, article no. 106992. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106992>

Long-term dynamics of the heterotrophic bacterioplankton development in the mouth of the Usinsky bay of the Kuibyshev reservoir

Е. С. Краснова , М. В. Уманская

*Samara Federal Research Center of RAS,
Institute of Ecology of the Volga River Basin of Russian Academy of Sciences
10 Komzina St., Togliatti 445003, Russia*

Received: June 1, 2023 / revised: February 13, 2024 / accepted: February 14, 2024 / published: September 30, 2024

Abstract. Data of our long-term observations of the bacterioplankton development in the mouth section of the Usinsky bay (the Kuibyshev reservoir) during the summer–autumn periods are presented. The total abundance of heterotrophic bacterioplankton varied within $(1.61–7.44) \times 10^6$ cells/mL, the biomass was 39.01–249.53 $\mu\text{gC/L}$, which corresponds to III–V water quality classes. Between 2010 and 2017 the total abundance of heterotrophic bacterioplankton was nonmonotonically decreasing, and since 2021 its significant increase is recorded. Among heterotrophic bacteria, single free-floating cells predominated, mainly cocci and coccobacilli, and the proportion of rod-shaped cells increased during cyanobacterial bloom. Picocyanobacteria and picodetritus particles were almost always present in plankton, but their average contribution to the total organic carbon of picoseston was insignificant.

Keywords: heterotrophic bacteria, autotrophic picoplankton, picodetritus, Usinsky bay, Kuibyshev reservoir

Funding. The work was performed within the framework of the state assignment of the Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences, a branch of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (No. 122032500063-0).

Ethics approval and consent to participate: This work does not contain any studies involving human and animal subjects.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

For citation: Krasnova E. S., Umanская M. V. Long-term dynamics of the heterotrophic bacterioplankton development in the mouth of the Usinsky bay of the Kuibyshev reservoir. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2024, no. 3, pp. 323–330 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-3-323-330>

 *Corresponding author.* Laboratory Biodiversity of Institute of Ecology of the Volga River Basin of Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Ekaterina S. Krasnova: <https://orcid.org/0000-0002-4062-9714>, Krasnova-eck@mail.ru; Marina V. Umanская: <https://orcid.org/0000-0003-2097-4913>, mvumansk67@gmail.com.