

Оригинальная статья

УДК 556:579.26:627:8

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-214-228>

## ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАКТЕРИОБЕНТОСА В ВЕРХНЕМ БЬЕФЕ ЖИГУЛЕВСКОЙ ГЭС КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

А. В. Рахуба , Н. Г. Шерышева

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

Поступила в редакцию 22.06.2022 г., после доработки 14.01.2023 г., принята 27.02.2023 г., опубликована 21.06.2023 г.

**Аннотация.** Представлены результаты экспедиционных исследований бактериобентоса в акватории Куйбышевского водохранилища в осенний период 2020 г. и влияние на его пространственное распределение динамики течений. Актуальность исследования определяется необходимостью изучения вопроса о внутренней нагрузке (вторичном загрязнении) крупных водоемов из донных отложений. Куйбышевское водохранилище одно из крупнейших проточных водоемов в мире, где особенности береговой конфигурации, неоднородности ложа, неустановившийся гидродинамический режим, режим наносов и его состав определяют пространственное распределение донных отложений и бактериобентосного сообщества в них, которое является важным звеном в процессах круговорота органических и биогенных веществ в экосистеме водоема. Оценка режима течений и наносов проводилась путем расчетов на 2D математической модели Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища, реализованной в программном комплексе «ВОЛНА». Проведена верификация модели и серия численных расчетов скорости течений с учетом режима регулирования расходов воды на гидроузлах. Получена пространственная геометрия течений и динамика распределения расхода наносов. По данным экспедиционных исследований получена общая численность и биомасса бактерий, которые варьировали в пределах  $2.47 - 27.55 \times 10^9$  кл/мл и  $0.10 - 2.43$  мкг/г соответственно. В результате проведенных исследований были выявлены закономерности пространственного распространения бактериального сообщества в акватории Приплотинного плеса водохранилища и установлен характер связи общей численности бактерий с темпом осадконакопления, скоростью течения, содержанием в донных отложениях органического вещества. Показано влияние зон циркуляции течений в мелководных акваториях на характер распределения донных отложений и изменение количественных характеристик бактериобентоса.

**Ключевые слова:** бактериобентос, осадконакопление, скорость потока, органическое вещество, типы донных отложений

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках разделов государственного задания Института экологии Волжского бассейна РАН – филиала Самарского научного центра РАН (№ 1021060107212-5-1.6.20 и 1021060107175-5-1.6.19).

 Для корреспонденции. Лаборатория мониторинга водных объектов Института экологии Волжского бассейна РАН.

ORCID и e-mail адреса: Рахуба Александр Владимирович: <https://orcid.org/0000-0002-1770-3197>, rahavum@mail.ru; Шерышева Наталья Григорьевна: <https://orcid.org/0000-0002-4161-1938>, sapfir-sherry@yandex.ru.

## ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Для цитирования. Рахуба А. В., Шершьева Н. Г. Влияние гидродинамических условий на распределение бактериобентоса в верхнем бьефе Жигулевской ГЭС Куйбышевского водохранилища // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 214 – 228. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-214-228>

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение гидродинамического режима водных экосистем необходимо для правильного понимания закономерностей пространственной организации сообществ водных организмов. Проведен ряд исследований, доказывающих влияние гидродинамического режима на различные группы гидробионтов. Так, было показано, что одним из важнейших факторов, определяющих распределение рыб в Чебоксарском водохранилище, является гидродинамическая активность водных масс водохранилища (Герасимов и др., 2014). На примере Куйбышевского водохранилища установлено, что биомасса фитопланктона меняется по степенному закону с изменением средних скоростей течения (Рахуба, 2020). Распределение планктона и рыб в водохранилищах Волжского каскада (Иваньковского, Углицкого, Рыбинского, Горьковского, Куйбышевского и Волгоградского) определяется направленностью водного потока и характером циркуляции вод (Поддубный, 2000). В эстуарных акваториях Белого моря изучено количественное распределение зоопланктона в зависимости от приливно-отливных явлений и разнонаправленных течений и отмечается возможность выбора зоопланктонными организмами потоков и течений, обеспечивающих им выживание (Примаков, 2008). Скорость придонного потока является одним из основных факторов, определяющих количественные характеристики бентоса. Гидродинамические характеристики определяют изменения сообществ макрозообентоса (Лабай, 2007). Предполагается, что вертикальное распределение численности и биомассы инфузорий в Климовской узости Куйбышевского водохранилища обусловлено нестабильным характером гидрологического режима (Быкова, Андреева, 2021). Наглядно продемонстрирована роль гидродинамических процессов в происхождении и формировании грунтового комплекса в системе водохранилищ Волжско-Камского каскада (Законнов и др., 2018), являющихся экологической нишей для различных бентосных организмов.

Исследования влияния динамики вод на бактериальные популяции малочисленны и они касаются в основном бактериопланктона. Так, при микробиологическом исследовании северо-восточной части Тропической Атлантики (Гордиенко, Ерохин, 2018), было установлено, что сложная динамическая структура вод предопределяет не менее сложную структуру гидрофизических и гидрохимических полей, что, в свою очередь, обуславливает все особенности в распределении численности, биомассы и интенсивности размножения бактериопланктона. Авторами исследования гетеротрофного бактериопланктона в эстуарии Енисея (Мошарова и др., 2016) сделано предположение, что пространственное распределение бактерий в исследованной акватории определяется, в первую очередь, гидродинамическими процессами, а не содержанием в воде биогенных элементов. Исследователями Карского моря предлагается проследить влияние основных течений шельфа моря

на распределение обилия и видового состава гетеротрофных микроорганизмов (Романова, Сажин, 2018).

Таким образом, показано влияние гидродинамических условий на различные группы обитателей водной среды, причем под гидродинамическими условиями выступали в основном общие характеристики течений без применения количественных гидродинамических показателей.

Относительно бактериобентоса, достаточно много работ посвящено исследованию различных экологических аспектов жизнедеятельности (структуры и функционирования) донных бактериальных сообществ, однако гидродинамика в качестве экологического фактора не рассматривалась. Бактериобентос является важным компонентом водной экосистемы, выполняющим основную деструкционную функцию. Установлено, что наиболее значимыми абиотическими факторами для жизнедеятельности бактериобентосных популяций являются качественный состав органического вещества, редокс-потенциал, активная реакция среды (рН), температура (Дзюбан, 2010), гранулометрический состав, типы донных отложений (Шерышева, 2021). Однако роль гидродинамических процессов в жизнедеятельности донных бактерий остается наименее изученной. Ранее отмечалось, что гидродинамическое воздействие на бентическое бактериальное сообщество представляется вероятным, но его еще предстоит доказать дальнейшими исследованиями (Rusch et al., 2003). На наш взгляд, представляется, что гидродинамический режим выступает одним из ведущих условий пространственной организации бактериобентосных сообществ не только локально, но и в широких региональных и географических масштабах. В связи с этим методологическим обоснованием наших исследований предложена концепция, что кроме отмеченных выше показателей основополагающим фактором для формирования структуры бактериобентоса являются гидродинамические условия среды обитания.

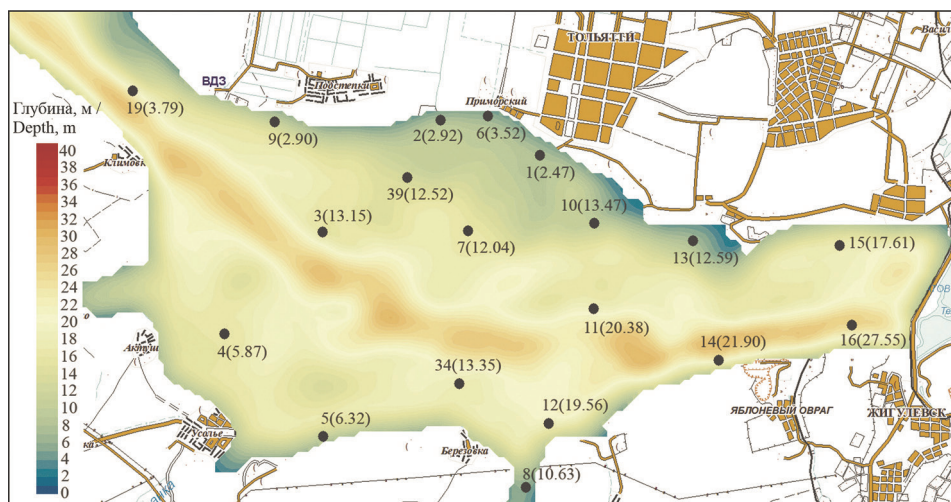
Цель данной работы – исследование влияния гидродинамического фактора на формирование пространственной структуры бактериобентоса в Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Гидрологические и микробиологические исследования Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища проводились с 14.09.20 по 03.10.20 г. Институтом экологии Волжского бассейна РАН. Пробы донных отложений отбирали с поверхностных горизонтов 0 – 5 см с помощью трубчатого микробентометра С-1. Всего исследовано 19 станций (рис. 1).

Гранулометрический анализ грунтов проводили комбинированным способом: влажным просеиванием через сита и методом осаждения (Буторин, 1975; Кузяхметов и др., 2004; Законнов и др., 2018). Выделяли следующие размерные фракции механического состава: крупного песка > 1 мм, среднего и мелкого песка 1.0 – 0.1 мм, алеврита 0.1 – 0.01 мм, пелита < 0.01 мм (Законнов и др., 2018). Типы грунтов идентифицировали по: (Законнов и др., 2018). Содержание органического вещества определяли по потерям при прокаливании (Аринушкина, 1970): пробы грунта прокаливали в муфельной печи при температуре 700°C в течение одного

часа после предварительного высушивания грунтов в сушильном шкафу при температуре 105°C в течение 10 часов.



**Рис. 1.** Карта глубин Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища и отмеченные на ней номера станций отбора проб донных отложений, в скобках показана численность бактериобентоса ( $\times 10^9$  кл/мл)

**Fig. 1.** Depth map of the Priplotinny Reach of the Kuibyshev reservoir and the numbers of stations for sampling bottom sediments marked thereon, the abundance of bacteriobenthos ( $\times 10^9$  cells mL<sup>-1</sup>) is shown in brackets

Для микробиологических исследований в момент отбора пробы грунта фиксировали 25%-ным раствором глутаральдегида до конечной концентрации 2.5%. Фиксированную и суспензированную пробу объемом 0.5 мл из разведения 1:1000 фильтровали через ядерные фильтры с диаметром пор 0.2 мкм (ОИЯИ РАН, г. Дубна, Россия), окрашенные суданом черным. Определение численности и биомассы бактерий проводили с использованием флуоресцентной микроскопии с помощью красителя флуоресцеинизотиационата (FITC) (Гальченко, 2001). Подсчет и измерение размеров бактериальных клеток проводили с помощью микроскопа Leica CTR 5500 (Leica Microsystems, Германия) при увеличении  $\times 1000$  в 20 полях зрения. Для определения биомассы бактерий измеряли линейные размеры 400 – 500 клеток в каждой пробе. Биомассу бактериальных клеток рассчитывали по формуле:

$$B = N \times V,$$

где  $B$  – биомасса, мкг/г;  $N$  – численность, млрд кл/мл;  $V$  – объем, мкм<sup>3</sup>. Удельный вес бактериальной клетки принимали равным 1. Объем клеток рассчитывали по формулам объема геометрических фигур (шара, эллипсоида и цилиндра).

Для расчета динамики течений ( $V$ ) и осадконакопления (ОН) в Приплотинном плесе использовалась 2D-модель Куйбышевского водохранилища, разработанная на основе программного комплекса «ВОЛНА» (Рахуба и др., 2018; Рахуба, 2020).

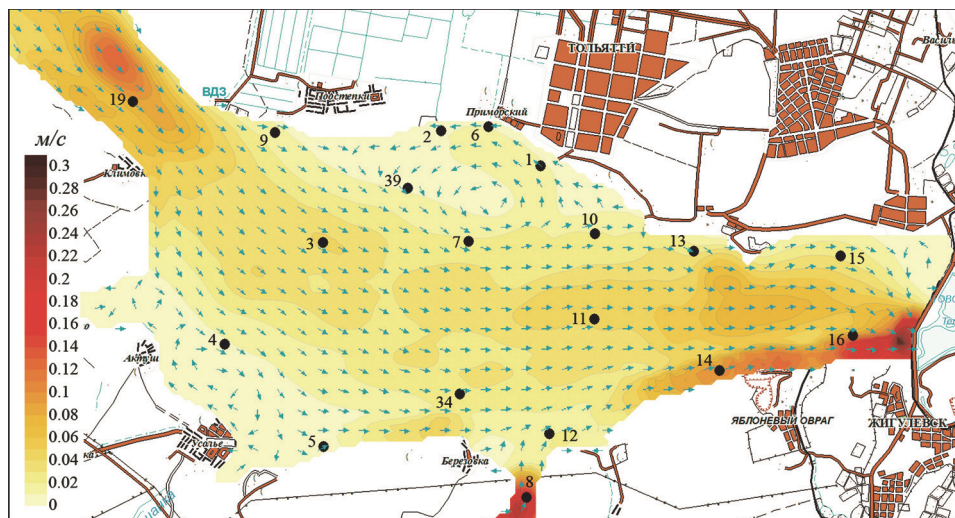
Расчеты выполнялись на период летне-осенней межени для среднего по водности года с заданием ветрового воздействия на акваторию водоема. Пространственный размер шага сетки модели составил 200 м с расчетным шагом по времени 5 с.

Для установления связей между параметрами применялся коэффициент корреляции Пирсона ( $r$ ) при уровне значимости  $p < 0.05$ . Все расчеты проводили с применением пакетов программ Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corp., USA) и Statistica 7 (StatSoft Inc., OK, USA).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Гидродинамика.** Сочетание стоковых и ветровых течений на мелководье и в глубоководных частях водохранилища приводит к неоднородному распределению в них донных отложений. Скорости течений выше средних формируют основной гранулометрический скелет, а меньше средних – насыщают его структуру тонкодисперсными частицами (Законнов и др., 2018).

Численные расчеты на математической модели показывают, что в Приплотинном плесе водохранилища циркуляции течений возникают при ветрах выше 10 м/с, в основном южного направления (рис. 2). Согласно подводному рельефу ложа плеса и структуре течений выделяется три основные гидродинамические зоны. Первые две – это зоны мелководий на левом и на правом берегу. Третья зона начинается с северо-западной части плеса (Климовское сужение акватории), далее проходит по центральной глубоководной части и заканчивается, примыкая к правому берегу и плотине Жигулевской ГЭС. На левобережном мелководье формиру-



**Рис. 2.** Расчетное поле скорости течения (м / с) в Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища

**Fig. 2.** Calculated field of flow velocities (m / s) in the Priplotinny Reach of the Kuibyshev reservoir

ется один большой вихрь течения циклональной направленности. В правобережной зоне мелководья течение разбивается на два вихря меньшей площади антициклональной направленности. Орбитальные скорости циркуляций течений здесь достигают 0.01 – 0.03 м/с. Наибольшие скорости течений представлены стоковыми течениями в верхнем створе сужения акватории плеса – 0.1 – 0.2 м/с и замыкающем створе перед плотиной – 0.3 м/с и выше. В центральной глубоководной части скорости стокового течения не превышают 0.03 – 0.05 м/с.

Согласно картине направления и распределения полей динамики стокового и ветровых течений в Приплотинном плесе осадконакопление концентрируется в глубоководной части плеса. Высокие скорости течения в Климовском сужении и в правобережном русле перед плотиной способствуют хорошей промываемости дна. Напротив, выраженные области циркуляций у левого и правого берега выносят взвешенные наносы в центральную часть плеса. У плотины ГЭС на участке верхнего бьефа с максимальными глубинами и максимальными скоростями течения формируется зона активного перемешивания водной массы.

**Донные отложения** Приплотинного плеса представлены песками, песчанистыми илами и илистыми отложениями. Установлено, что гидродинамические процессы и морфометрические особенности водоема определяют направленность путей формирования донных отложений (Законнов, 2016). В соответствии с этим в литоральной части левобережного мелководья (до 8-метровой изобаты) под воздействием стоковых, приливно-отливных и ветровых течений распространены среднезернистые и мелкозернистые пески, заиленные пески. В сублиторали до глубин 10 – 16 м под воздействием стоковых течений накапливаются песчанистые илы. В центральной глубоководной зоне, где однонаправленное течение, и вдоль правого берега плеса (до 20-метровой изобаты) залегают серые мелкоалевритовые и алевритовые илы. На правом берегу обнаружены локальные участки илов, включающие размытые породы доломита и мергеля, что придает илам белесый (меловой) оттенок. В прибрежных участках правобережья встречаются биотопы, на которых донные отложения плотно покрыты дрейссеной, или с синезелеными водорослями в наилках и на поверхности грунта. Механический состав донных отложений плеса характеризует тенденцию увеличения дисперсности частиц от прибрежной мелководной зоны к центральной глубоководной зоне. Так, содержание пелитовых частиц размером  $< 0.01$  мм увеличивается в поперечном направлении от берегов к центральной части водоема (таблица). Сумма тонкодисперсных (алевритовых и пелитовых) фракций в осадках на левом берегу в среднем составляет 19.9%, увеличивается на правом берегу до 49.5% и достигает максимальных значений в центральной глубоководной части – 52.2%. В результате в центральной зоне происходит процесс илонакопления, сопровождающийся обогащением профундальных илов органическим веществом, необходимым для жизнедеятельности бактериобентоса. Естественным процессом в трансформации взвешенных веществ из различных источников является их интегральное перемешивание и аккумуляция на дне водоема в виде донных осадков (Законнов, 2007, 2019).

Физико-химические показатели донных отложений, гидродинамические характеристики, численность и биомасса бактериобентоса в Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища осенью 2020 г.

**Table.** Physicochemical indicators of bottom sediments, hydrodynamic characteristics, numbers and biomass of bacteriobenthos in the Priplotinny Reach of the Kuibyshev reservoir in the autumn of 2020

| № станций /<br>Station no. | Пелит, % / Pelit, %<br>< 0.01 мм | ОВ, % /<br>ОМ, % | $N \times 10^9$ ,<br>кл/мл / cl/ml | $B$ ,<br>мкг/г / $\mu\text{g/g}$ | ОН, мм/год /<br>SA, mm/year | $V$ ,<br>м/с / m/s |
|----------------------------|----------------------------------|------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1                          | 0.07                             | 2.3              | 2.47                               | 0.10                             | 0.13                        | 0.016              |
| 2                          | 6.37                             | 2.1              | 2.92                               | 0.60                             | 0.11                        | 0.009              |
| 3                          | 14.04                            | 10.0             | 13.15                              | 1.37                             | 0.62                        | 0.048              |
| 4                          | 14.49                            | 10.4             | 5.87                               | 0.66                             | 0.34                        | 0.024              |
| 5                          | 13.87                            | 7.7              | 6.32                               | 0.67                             | 0.12                        | 0.018              |
| 6                          | 1.9                              | 0.7              | 3.52                               | 0.85                             | 0.08                        | 0.008              |
| 7                          | 11.9                             | 10.1             | 12.04                              | 1.63                             | 0.51                        | 0.041              |
| 8                          | 18.42                            | 8.8              | 10.63                              | 1.22                             | 0.24                        | 0.026              |
| 9                          | 13.54                            | 6.5              | 2.90                               | 0.22                             | 0.33                        | 0.028              |
| 10                         | 5.75                             | 3.0              | 13.74                              | 1.93                             | 0.63                        | 0.047              |
| 11                         | 13.49                            | 11.0             | 20.38                              | 2.58                             | 0.86                        | 0.064              |
| 12                         | 13.06                            | 10.4             | 19.56                              | 1.72                             | 0.14                        | 0.021              |
| 13                         | 2.44                             | 2.4              | 12.59                              | 1.26                             | 0.67                        | 0.051              |
| 14                         | 15.50                            | 9.7              | 21.90                              | 2.06                             | 0.49                        | 0.118              |
| 15                         | 7.05                             | 7.2              | 17.61                              | 1.80                             | 0.50                        | 0.032              |
| 16                         | 13.67                            | 12.7             | 27.55                              | 2.23                             | 1.86                        | 0.239              |
| 19                         | 6.17                             | 5.8              | 3.79                               | 1.09                             | 0.50                        | 0.061              |
| 34                         | 10.34                            | 10.9             | 13.35                              | 1.68                             | 0.43                        | 0.034              |
| 39                         | 20.92                            | 13.3             | 12.52                              | 1.32                             | 0.41                        | 0.032              |

*Примечание.* ОВ – содержание органического вещества,  $N$  – общая численность бактерий,  $B$  – биомасса бактерий, ОН – осадконакопление,  $V$  – скорость течения.

*Note.* OM is the content of organic matter,  $N$  the total abundance of bacteria,  $B$  the biomass of bacteria, SA the sediment accumulation,  $V$  is flow velocity.

**Органическое вещество (ОВ)** служит основным пищевым субстратом для массовых групп бактериобентоса. В донных отложениях Приплотинного плеса наименьшие значения ОВ регистрировались в песках и илистых песках левого побережья –  $3.75 \pm 0.83\%$ , причем минимальные –  $1.70 \pm 0.49\%$  в зоне левобережной циркуляции на участке обратного вдольберегового течения (ст. 2, 6, 1). На русловых станциях правого берега содержание органического вещества составило  $10.18 \pm 0.78\%$ , при этом наименьшее среднее значение  $9.05\%$  обнаружено также в зоне правобережных циркуляций течений (ст. 4 и 5). Серые илы в средней глубоководной зоне наиболее обогащены органическим веществом –  $11.06 \pm 0.58\%$ . Из полученных данных следует, что органическое вещество оседает в основном в центральной глубоководной зоне, формируя зону илонакопления или зону аккумуляции.

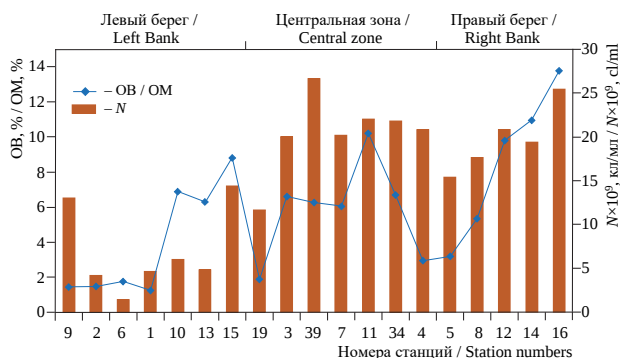
Наличие зон аккумуляции биогенных элементов обусловлено особенностью гидродинамической активности водных масс, соотношением и направлением течений различной природы (Герасимов, 2014). В Приплотинном плесе на участках вихревых образований течений на левом и правом берегу происходит смыв с по-

верхности грунта наилка, детрита, тонкодисперсной взвеси, алевритовых и пелитовых частиц, которые вовлекаются в более мощный центральный водный поток. Далее в процессе седиментации смытый «питательный» материал оседает на дно благодаря снижению скорости течения в придонных слоях, где аккумулируются илы, обогащенные питательным материалом. Обнаружено, что органическое вещество положительно коррелирует с глубиной водоема ( $r = 0.72$ ,  $p = 0.0005$ ) и с тонкодисперсными фракциями механического состава осадков – алевритовой ( $r = 0.71$ ,  $p = 0.0007$ ) и пелитовой ( $r = 0.85$ ,  $p = 0.0001$ ). Из гидродинамических характеристик выявлены положительные корреляции осадконакопления со скоростью течения ( $r = 0.91$ ,  $p = 0.0001$ ) и с глубиной водоема ( $r = 0.54$ ,  $p = 0.017$ ).

**Пространственное распределение бактериобентоса.** Общая численность бактерий ( $N$ ) в донных отложениях по направлению от Климовской узости до плотины увеличивалась от  $2.47$  до  $27.55 \times 10^9$  кл/мл, биомассы ( $B$ ) – от  $0.10$  до  $2.23$  мкг/г. Рис. 3 демонстрирует изменение общей численности бактериобентоса и содержания органического вещества в поверхностных донных слоях на акватории Приплотинного плеса. Корреляционный анализ массива данных выявил достоверные положительные корреляции содержания органического вещества в грунтах с общей численностью ( $r = 0.60$ ,  $p = 0.007$ ) и биомассой ( $r = 0.51$ ,  $p = 0.026$ ) бактерий.

В пространственном распределении бактериобентоса целесообразно выделить два направления: поперечный профиль на участке максимального расширения озеровидной части плеса и продольные профили вдоль стокового течения от Климовской узости к плотине, включая левый берег и вектор от Усинского залива до плотины по правому берегу (см. рис. 2).

Вдоль поперечного профиля происходит увеличение количественных показателей бактерий от берегов к центральной зоне илонакопления. Так, песчанистые грунты на мелководье левого побережья на участке обратного течения характеризуются минимальной численностью ( $2.95 \pm 0.21 \times 10^9$  кл/мл) и биомассой ( $0.44 \pm 0.17$  мкг/г) бактерий. Важным фактором, влияющим на численность бактериобентоса, является стабильность донных отложений. Снижение численности бактерий на песках и заиленных песках объясняется повышенной подвижностью грунтов. Дно мелководья на этом участке подвергается наибольшему воздействию динамических факторов, угнетающих развитие бактерио-



**Рис. 3.** Общая численность ( $N$ ) бактерий и содержание органического вещества (ОВ) в донных отложениях Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища осенью 2020 г.

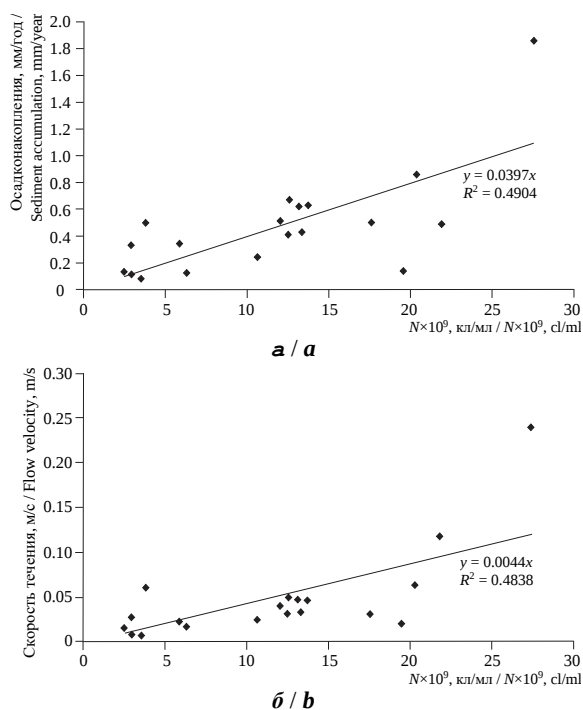
**Fig. 3.** Total numbers ( $N$ ) of bacteria and the content of organic matter (OM) in the bottom sediments of the Priplotinny Reach of the Kuibyshev reservoir in the autumn of 2020

бентоса: обратное течение, внешнее воздействие ветрового волнения и суточного колебания уровня воды в плесе. В серых мелкоалевритовых илах в центральной зоне илонакопления численность бактерий увеличивается до  $14.29 \pm 1.51 \times 10^9$  кл/мл, а биомассы – до  $1.72 \pm 0.22$  мкг/г. Стоковое течение здесь отличается однонаправленностью по глубине с постепенным уменьшением скорости по вертикали от поверхности ко дну (Поддубный, 2000), что способствует накоплению пищевого субстрата в илах и, как следствие, развитию бактериобентоса. На правом берегу в серых алевритовых илах, в зоне вихревых течений (ст. 4, 5), численность и биомасса бактерий вновь снижается до  $6.10 \pm 0.22 \times 10^9$  кл/мл и  $0.67 \pm 0.01$  мкг/г.

Вдоль продольного профиля развивается тенденция увеличения количественных показателей бактериобентоса вниз по течению к зоне подпора. В переходной зоне от литоральных илов к профундальным вдоль левого берега под воздействием стокового течения и ветрового волнения формируются заиленные пески и песчанистые илы. Численность и биомасса бактерий на этом участке составляет  $13.17 \pm 0.46 \times 10^9$  кл/мл и  $1.60 \pm 0.27$  мкг/г соответственно. В серых алевритовых илах правобережья от впадения р. Уса по направлению к плотине (ст. 12, 14) численность и

биомасса бактерий увеличивается до  $15.10 \pm 4.38 \times 10^9$  кл/мл и  $1.47 \pm 0.24$  мкг/г соответственно, по сравнению с аналогичными показателями в зоне вихревых течений (ст. 4, 5). Донные отложения здесь обогащаются за счет внесения питательных веществ с притоком р. Уса. В зоне подпора около плотины с максимальными скоростями течения и максимальными глубинами в условиях перемешивания водных масс регистрировались максимальные значения численности ( $22.7 \pm 0.78 \times 10^9$  кл/мл) и биомассы ( $2.15 \pm 0.08$  мкг/г) бактерий.

При исследовании активности и распределения бактериальных популяций в песчанистых отложениях шельфа Среднеатлантического залива (Rusch et al., 2003) авторы обращают внимание на возможную адаптацию популяции донных бактерий к гидродинамическим условиям. Наблю-



**Рис. 4.** Зависимость величин осадконакопления (а) и скорости течения (б) от общей численности (N) бактерий  
**Fig. 4.** Dependence of sedimentation values (a) and flow velocity (b) on the total numbers (N) of bacteria

## ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

дения на приливно-отливной песчаной отмели показали, что максимальное количество бактерий скапливается в глубинных отложениях, менее подверженных воздействию волн и донных течений по сравнению с мелководьями, подверженными гидродинамическому стрессу, но это не нашло прямой поддержки ввиду ограниченного набора гидродинамических данных. Данное предположение подтверждается нашими исследованиями. Так, установлена связь гидродинамических характеристик (осадконакопления и скорости течения) с численностью бактериобентоса (рис. 4).

Нами выявлены корреляции, подтверждающие влияние гидродинамического режима плеса на пространственную организацию бактериобентосного сообщества. Так, общая численность и биомасса бактерий положительно коррелирует с осадконакоплением ( $r = 0.70$ ,  $p = 0.0008$  и  $r = 0.63$ ,  $p = 0.004$ ) скоростью потока ( $r = 0.70$ ,  $p = 0.0008$  и  $r = 0.56$ ,  $p = 0.013$ ). Из полученных результатов следует, что под влиянием гидродинамических условий организуется две закономерные траектории с градиентом увеличения численности и биомассы бактерий в пространственном распределении бактериобентоса по донному ложу плеса: вдоль поперечного профиля – от противоположных побережий к центральной оси и вдоль продольного профиля – от Климовской узости к плотине ГЭС.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Под воздействием гидродинамических условий формируется два направления закономерных изменений численности и биомассы бактерий – вдоль поперечного и продольного профилей плеса. С учетом влияния гидродинамических характеристик, типа донных отложений и количественных показателей бактериобентоса целесообразно выделить зоны интегрального районирования пространственной организации бактериобентоса:

- 1) зоны вихревых циркуляций течений с минимальным развитием бактериобентоса, обусловленные гидродинамической активностью водных масс и подвижность грунта;
- 2) переходную зону от литорали к профундали с увеличением численности и биомассы бактерий;
- 3) центральную зону илонакопления с высокими количественными показателями бактериального сообщества;
- 4) зону активного перемешивания у плотины ГЭС с максимальными глубинами, скоростями течения и максимальными численностями бактериобентоса.

Таким образом, гидродинамические условия являются важным фактором наряду с другими (типом донных отложений, качественным составом органического вещества, температурой, редокс-потенциалом, pH среды), организующим векторы распространения бактериобентоса, вдоль которых формируются специфические устойчивые закономерности изменения количественных показателей бактериобентосных сообществ.

На основании полученных результатов целесообразно предположить общэкологическую закономерность – пространственное распределение бактериобентоса можно рассматривать как интегральную функцию от комплекса факторов:

переменных динамического потока (скорости течения и осадконакопления), типа донных отложений, глубины и содержания органического вещества в грунтах, ветровых волнений и других абиотических факторов. Данная концепция требует дополнительных исследований и подтверждения на других плесах Куйбышевского водохранилища и водных объектах водохранилищного типа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Аринушкина Е. В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Московского университета, 1970. 487 с.

*Буторин Н. В., Зиминова Н. А., Курдин В. П.* Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1975. 159 с.

*Быкова С. В., Андреева В. А.* Пространственно-временное распределение инфузорий планктона Куйбышевского водохранилища в районе Климовской узкости // Поволжский экологический журнал. 2021. № 2. С. 146 – 162. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-2-146-162>

*Гальченко В. Ф.* Метанотрофные бактерии. М.: ГЕОС, 2001. 500 с.

*Герасимов Ю. В., Поддубный С. А., Малин М. И., Цветков А. И.* Влияние гидродинамических условий на распределение рыб в Чебоксарском водохранилище // Вопросы рыболовства. 2014. Т. 15, № 3. С. 295 – 305.

*Гордиенко А. П., Ерохин В. Е.* Эколого-физиологические характеристики бактериопланктона в связи с особенностями динамики вод // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Вятский государственный университет, 2018. Кн. 1. С. 246 – 250.

*Дзюбан А. Н.* Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус, 2010. 192 с.

*Законнов В. В.* Осадконакопление в водохранилищах Волжского каскада: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2007. 39 с.

*Законнов В. В.* Илонакопление в системе водохранилищ Волжского каскада // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2016. Вып. 75 (78). С. 30 – 40.

*Законнов В. В., Законнова А. В., Цветков А. И., Шерышева Н. Г.* Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 35 – 46.

*Законнов В. В., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р., Законнова А. В., Маланин В. В., Марасов А. А.* Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 6. Донные отложения Куйбышевского водохранилища и их картирование с использованием геоинформационных технологий // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 2. С. 72 – 89.

*Кузяхметов Г. Г., Мифтахова А. М., Киреева Н. А., Новоселова Е. И.* Практикум по почвоведению: учеб. пособие. Уфа: Башкирский государственный университет, 2004. 120 с.

*Лабай В. С.* Распределение бентоса в нижней ритрале р. Поронай под воздействием некоторых абиотических факторов среды // Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях: Труды СахНИРО. 2007. Т. 9. С. 184 – 206.

*Мошарова И. В., Ильинский В. В., Мошаров С. А.* Состояние гетеротрофного бактериопланктона эстуария реки Енисей и зоны Обь-Енисейского речного выноса в осенний период в связи с факторами окружающей среды // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 2. С. 202 – 215.

## ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

*Поддубный С. А.* Гидрологические условия формирования и повышения биологической продуктивности экосистем Волжских водохранилищ: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2000. 42 с.

*Примаков И. М.* Распространение планктонных организмов приливных губ Белого моря под влиянием гидродинамических условий // Труды Зоологического института РАН. 2008. Т. 312, № 1/2. С. 135 – 144.

*Рахуба А. В.* Оценка влияния гидродинамического режима на развитие фитопланктона и качество воды Куйбышевского водохранилища // Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки. 2020. Т. 162, кн. 3. С. 430 – 444. <https://doi.org/10.26907/2542-064x.2020.3.430-444>

*Рахуба А. В., Шмакова М. В.* Численное моделирование заиления Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища речными наносами // Метеорология и гидрология. 2018. № 1. С. 35 – 48.

*Романова Н. Д., Сажин А. Ф.* Гетеротрофный микропланктон южной оконечности жемчужины Святой Анны в осенний период (Карское море) // Океанологические исследования. 2018. Т. 46, № 3. С. 116 – 129. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46\(3\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(3).8)

*Шерышева Н. Г.* Пространственное распределение бактериобентоса в Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища в осенний период // Известия Самарского научного центра РАН. 2021. Т. 23, № 5. С. 152 – 159.

*Rusch A., Huettel M., Reimers C. E., Taghon G. L., Fuller C. M.* Activity and distribution of bacterial populations in Middle Atlantic Bight shelf sands // FEMS Microbiology Ecology. 2003. Vol. 44, iss. 1. P. 89 – 100. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2003.tb01093.x>

## Influence of hydrodynamic conditions on the bacteriobenthos distribution in the upper reaches of the Zhiguli hydroelectric power station of the Kuibyshev reservoir

A. V. Rakhuba , N. G. Sherysheva

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

Received: 22 June 2022 / revised: 14 January 2023 / accepted: 27 February 2023 / published: 21 June 2023

**Abstract.** The paper presents the results of our expedition studies of bacteriobenthos in the water area of the Kuibyshev reservoir in the autumn period of 2020 and the influence of the dynamics of currents on its spatial distribution. The relevance of the study is determined by the need to study the internal load (secondary pollution) of large reservoirs from bottom sediments. The Kuibyshev reservoir is one of the largest flowing reservoirs in the world, where features of the coastal configuration, the heterogeneity of the bed, the unsteady hydrodynamic regime, the sediment regime and its composition determine the spatial distribution of bottom sediments and the bacteriobenthos community therein, which is an important link in the circulation processes of organic and biogenic substances in the ecosystem of the reservoir. An assessment of the regime of currents and sediments was carried out by calculation on a 2D mathematical model of the Priplotinny Reach of the Kuibyshev reservoir, implemented in the software package “VOLNA”. The model was verified, and a series of numerical calculations of the flow velocity was carried out taking into account the regime of water flow control at hydraulic units. The spatial geometry of the currents and the sediment flow distribution dynamics were obtained. According to the data of our expedition studies, the total numbers and biomass of bacteria were estimated, which varied in the range of  $(2.47\text{--}27.55) \times 10^9$  cells  $\text{mL}^{-1}$  and  $0.10\text{--}2.43$   $\mu\text{g mL}^{-1}$ , respectively. As a result of the conducted studies, patterns of the spatial distribution of the bacterial community in the water area of the Priplotinny Reach of the reservoir were revealed, and the nature of the relationship between the total numbers of bacteria and the sedimentation rate, the flow velocity, and the content of organic matter in bottom sediments was established. The influence of the circulation zones of currents in shallow waters on the nature of the distribution of bottom sediments and changes in the quantitative characteristics of bacteriobenthos is shown.

**Keywords:** bacteriobenthos, sedimentation, flow rate, organic matter, types of bottom sediments

**Funding.** The work was carried out within the framework of the sections of the state task Institute of Ecology of the Volga River Basin – the Branch of the Samara Scientific Center of Russian Academy of Science (no. 1021060107212-5-1.6.20 and 1021060107175-5-1.6.19).

**For citation:** Rakhuba A. V., Sherysheva N. G. Influence of hydrodynamic conditions on the bacteriobenthos distribution in the upper reaches of the Zhiguli hydroelectric power station of the Kuibyshev reservoir. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 2, pp. 214–228 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-214-228>

---

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

*ORCID and e-mail addresses:* Aleksandr V. Rakhuba: <https://orcid.org/0000-0002-1770-3197>, rahavum@mail.ru; Natalia G. Sherysheva: <https://orcid.org/0000-0002-4161-1938>, sapfir-sherry@yandex.ru.

## REFERENCES

- Arinushkina E. V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* [Manual on Chemical Analysis of Soils]. Moscow, Moscow University Press, 1970. 487 p. (in Russian).
- Butorin N. V., Semenova N. A., Kurdin V. P. *Donnye otlozheniya verkhnevolzhskikh vodokhranilishch* [Bottom Sediments of the Upper Volga Reservoirs]. Leningrad, Nauka Publ., 1975. 159 p. (in Russian).
- Bykova S. V., Andreeva V. A. Spatiotemporal distribution of planktonic ciliates in the Kuybyshev water reservoir in the area of Klimovskaya narrowing. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2021, no. 2, pp. 146–162 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-2-146-162>
- Galchenko V. F. *Methanotrophic Bacteria*. Moscow, GEOS Publ., 2001. 500 p. (in Russian).
- Gerasimov Yu. V., Poddubny S. A., Malin M. I., Tsvetkov A. I. The influence of hydrodynamic conditions on fish distribution in Cheboksary reservoir. *Problems of Fisheries*, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 295–305 (in Russian).
- Gordienko A. P., Erokhin V. E. Ecological and physiological characteristics of bacterioplankton in connection with the peculiarities of water dynamics. In: *Biodiagnostika sostoianiya prirodnikh i prirodno-tekhnogennykh sistem: materialy XVI Vserossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Biodiagnostics of the State of Natural and Natural-Technogenic Systems: Materials of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation]. Kirov, Vyatka State University Publ., 2018, book 1, pp. 246–250 (in Russian).
- Dzyuban A. N. *Destruktsiya organicheskogo veshchestva i tsikl metana v donnykh otlozheniyakh vnutrennikh vodoemov* [Destruction of Organic Matter and Methane Cycle in Bottom Sediments of Inland Reservoirs]. Yaroslavl, Printhouse Publ., 2010. 192 p. (in Russian).
- Zakonnov V. V. *Sedimentation in Reservoirs of the Volga Cascade*: Thesis Diss. Dr. Sci. (Geogr.). Moscow, 2007. 39 p. (in Russian).
- Zakonnov V. V. Silt accumulation in the reservoir system of the Volga cascade. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences*, 2016, iss. 75 (78), pp. 30–40 (in Russian).
- Zakonnov V. V., Zakonnova A. V., Tsvetkov A. I., Sherysheva N. G. Hydrodynamic processes and their role in formation of bottom sediments in reservoirs of the Volga–Kama cascade. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences*, 2018, iss. 81 (84), pp. 35–46 (in Russian).
- Zakonnov V. V., Ivanov D. V., Khasanov R. R., Zakonnova A. V., Malanin V. V., Marasov A. A. Spatial-temporal transformation of the Volga Reservoirs' soil complex. Communication 6. The Kuybyshev Reservoir bottom sediments and their mapping with the use of geo/information techniques. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2019, no. 2, pp. 72–89 (in Russian).
- Kuzyakhmetov G. G., Miftakhova A. M., Kireeva N. A., Novoselova E. I. *Praktikum po pochvovedeniiu: uchebnoe posobie* [Practical Training in Soil Science: Textbook]. Ufa, Bashkir State University Publ., 2004. 120 p. (in Russian).
- Labay V. S. Benthos distribution in the lower rithral of the Poronai River under the impact of some abiotic environmental factors. *Water life Biology, Resources Status and Condition of Inhabitation in Sakhalin-Kuril Region and Adjoining Water Areas: Transactions of the "SakhNIRO"*, 2007, vol. 9, pp. 184–206 (in Russian).
- Mosharova I. V., Ilyinsky V. V., Mosharov S. A. State of heterotrophic bacterioplankton of Yenisei estuary and the zone of Ob–Yenisei discharge in autumn in relation with environmental factors. *Water Resources*, 2016, vol. 43, no. 2, pp. 341–352.
- Poddubny S. A. *Hydrological Conditions for the Formation and Increase of the Biological Productivity of the Ecosystems of the Volga Reservoir*: Thesis Diss. Dr. Sci. (Geogr.). Moscow, 2000. 42 p. (in Russian).

Primakov I. M. Distribution of planktonic organisms of the tidal lips of the White Sea under the influence of hydrodynamic conditions. *Proceedings of the Zoological Institute of the RAS*, 2008, vol. 312, no.1/2, pp. 135–144 (in Russian).

Rakhuba A. V. Assessment of the influence exercised by the hydrodynamic regime on the phytoplankton development and the water quality of the Kuibyshev Reservoir. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2020, vol. 162, no. 3, pp. 430–444 (in Russian). <https://doi.org/10.26907/2542-064x.2020.3.430-444>

Rakhuba A. V., Shmakova M. V. Numerical modeling of siltation of the dambed of the Kuibyshev reservoir by river sediments. *Meteorology and Hydrology*, 2018, no. 1, pp. 35 – 48 (in Russian).

Romanova N. D., Sazhin A. F. Heterotrophic microplankton of the southern tip of the St. Anna trench in the autumn period (Kara Sea). *Journal of Oceanological Research*, 2018, vol. 46, no. 3, pp. 116–129 (in Russian). [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46\(3\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(3).8)

Sherysheva N. G. Spatial distribution of bacteriobenthos in the Priplotinny reach of the Kuibyshev reservoir in autumn. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2021, vol. 234, no. 5, pp. 152–159 (in Russian).

Rusch A., Huettel M., Reimers C. E., Taghon G. L., Fuller C. M. Activity and distribution of bacterial populations in Middle Atlantic Bight shelf sands. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, vol. 44, iss. 1, pp. 89–100. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2003.tb01093.x>