

ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 579.68

ЭКОЛОГО-МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ОЗЕРА КОМСОМОЛЬСКОЕ В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗАЦИИ

О. В. Морозова, Р. П. Токинова, Д. В. Иванов

*Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан,
Казань, Россия*

На основе показателей бактериопланктона и бактериобентоса проведена оценка экологического состояния озера Комсомольское (г. Казань) в осенне-зимний период. Летом 2019 г. на водоеме осуществлялась расчистка дна озера от иловых отложений, в результате в подледный период 2020 г. наблюдалось значительное улучшение гидрохимических показателей воды по сравнению с таковыми предшествующего года. Качество воды по микробиологическим показателям соответствовало нормативам Росгидромета. В условиях высокой концентрации сульфатов в придонном слое и особенно в донных отложениях происходило активное развитие сульфатредукторов. В подледный период в поверхностном слое воды отмечено развитие пурпурных фототрофных и бесцветных хемолитотрофных сероокисляющих бактерий. При недостатке кислорода в озерной воде возможно развитие пурпурных серобактерий, а также изменение прозрачности и цветности верхнего слоя воды озера. Дополнительная аэрация гидроэкосистемы оз. Комсомольское достаточным количеством кислорода в зимний период способна улучшить гидрохимический состав и эколого-трофическую структуру микробиоценоза. Проведенные исследования являются частью системы наблюдений за водоемами городских территорий с целью разработки программы мер по поддержанию благополучного состояния их экосистем.

Ключевые слова: бактериопланктон; бактериобентос; сульфатредукторы; пурпурные серобактерии; бесцветные серобактерии; эколого-трофическая структура микробиоценоза.

O. V. Morozova, R. P. Tokinova, D. V. Ivanov. ECOLOGICAL AND MICROBIOLOGICAL ASSESMENT OF LAKE KOMSOMOLSKOYE WATER QUALITY UNDER URBANIZATION

The ecological state of Lake Komsomolskoye (Kazan) in the fall-winter season was evaluated using bacterioplankton and bacteriobenthos indicators. In the summer of 2019, comprehensive actions were taken to clear the lake bottom of silt deposits. As a result, a significant improvement in hydrochemical parameters of the water was observed during

the subglacial period of 2020 compared to the previous year. Indicators of microbial water quality conformed to Roshydromet regulatory requirements. Due to the high sulfate concentration in the bottom layer and especially in the benthos, mass development of sulfate-reducing bacteria took place. During the ice-covered period, purple phototrophic and colorless sulfur bacteria occurred in the surface water layer. Oxygen depletion in lake water can cause mass development of anaerobic purple bacteria, as well as a change in surface water transparency and color. Additional aeration of the Lake Komsomolskoye hydroecosystem with a sufficient amount of oxygen in winter can improve the hydrochemical composition and eco-trophic structure of the microbial community. These studies are part of the system of observations of urban water bodies designed to develop a program of actions for maintaining the ecological well-being of their ecosystems.

Key words: bacterioplankton; bacteriobenthos; sulfate-reducing bacteria; purple sulfur bacteria; colorless sulfur bacteria; eco-trophic structure of the microbial community.

Введение

Процесс естественной эвтрофикации пресноводных водоемов обычно является закономерной последовательностью старения озера, когда происходит повышение биологической продуктивности, обмеление озера и постепенное заболачивание. В природе этот процесс длится тысячи лет. Стоит отметить, что и в наши дни существуют озера, не подверженные антропогенному воздействию, которые за последние 10 тыс. лет стали даже менее продуктивными [Engstrom et al., 2000]. В условиях избыточной нагрузки биогенными элементами наблюдается резкое увеличение биологической продуктивности водных объектов, значительное снижение прозрачности, ухудшение качества воды, быстрое возрастание трофности, т. е. процесс антропогенной эвтрофикации. Антропогенное эвтрофирование происходит достаточно быстро, иногда в течение нескольких десятилетий. С развитием промышленности, ускорением процесса урбанизации, в условиях всевозрастающей нагрузки биогенными элементами отмечается стремительный рост числа эвтрофированных озер [Smith et al., 2006; Smith, Shindler, 2009; Ашихмина и др., 2014].

Озеро Комсомольское в черте г. Казани (микрорайон Дербышки) создано в 1959 году для целей рекреации населения и относится к группе озер антропогенного типа, в которую входят искусственные озера. Городской водоем испытывает постоянную серьезную антропогенную нагрузку, и по санитарно-гигиеническим показателям его вода периодически не удовлетворяет нормативам, что ведет к ограничению хозяйственно-питьевого и культурно-бытового использования водоема. Концентрации растворенных газов и окрашивание верхнего слоя воды в красный цвет в зимний период года входят в число наиболее неудовлетворительных показателей качества воды

в оз. Комсомольское [Иванов и др., 2019; Токинова, Сергеев, 2019].

В соответствии с выработанными в ходе комплексных исследований озера в начале 2019 г. (январь–февраль) рекомендациями по улучшению экологической ситуации и предотвращению ущерба водным биологическим ресурсам, летом того же года были проведены мероприятия по расчистке дна от донных отложений и благоустройству береговой зоны.

Известно, что бактериальные сообщества в водных экосистемах представлены огромным разнообразием функциональных групп, способных утилизировать широкий спектр различных соединений, в том числе антропогенного происхождения, и достаточно быстро реагируют на самые незначительные изменения условий окружающей среды. Структура бактериопланктона и бактериобентоса является важным показателем для оценки степени загрязненности любого водоема. Исследование отдельных диагностических групп микроорганизмов в составе бактериопланктона и бактериобентоса позволяет оценить состояние и прогнозировать развитие экосистемы озера [Дзюбан и др., 2005; РД 52.24.309-2016; Adamovich et al., 2019]. Среди многообразия микроорганизмов, осуществляющих процессы деструкции в воде и донных отложениях водных объектов, выделяют два основных показателя – это общее число бактерий и численность сапрофитных бактерий, а также их соотношение. Кроме того, для оценки уровня сероводородного загрязнения водных объектов определяют общую численность анаэробных сульфатредукторов в составе бактериобентоса [Дзюбан и др., 2005; РД 52.24.309-2016].

Данные об общей численности бактерий и сапрофитов в разнотипных водных объектах стали основой для различных классификаций экологического состояния воды по микробиологическим показателям. Микробиологи-

ческие критерии включены в классификацию загрязнения воды, предложенную в действующих рекомендациях Росгидромета. Эти рекомендации используются в системе государственного мониторинга водных объектов РФ [РД 52.24.309-2016].

Исследование структуры бактериопланктона и бактериобентоса – ведущих редуцирующих звеньев в гидросистемах – является важной задачей для выявления общих закономерностей функционирования водных экосистем, процессов их самоочищения, знание которых позволит прогнозировать дальнейшее их развитие, что особенно актуально для водных объектов урбанизированных территорий.

Целью данного исследования является оценка экологического состояния оз. Комсомольское в подледный период 2019–2020 гг. по микробиологическим показателям – общей численности бактерий, а также по основным эколого-трофическим группам микроорганизмов в составе бактериопланктона и бактериобентоса, в особенности тем, которые могут способствовать ухудшению качества воды и изменению ее цветности.

Данная цель предусматривает решение следующих основных задач:

1. Оценить качество воды и экологическое состояние водного объекта по бактериопланктону и бактериобентосу после проведенной комплексной санации.

2. В связи с повышенным содержанием сульфатов в водоеме изучить особенности развития отдельных диагностических групп микро-

организмов, участвующих в процессе самоочищения, а также в круговороте серы.

3. Определить группы микроорганизмов, которые могут способствовать изменению цвета поверхностного слоя воды озера в подледный период.

Полученные данные комплексных микробиологических исследований могут использоваться при экологическом мониторинге для оценки и прогноза состояния водных объектов в условиях городской среды, в частности, в условиях повышенного содержания сульфатов и сероводорода. А также могут найти применение при разработке экологических программ и природоохранных мероприятий.

Материалы и методы

Озеро Комсомольское (55°51'26.75" с. ш. 49°13'37.91" в. д.) имеет длину 320 м, ширину 50 м, площадь водного зеркала в период летней межени 17 294,5 м², объем 34 714,4 м³ (рис. 1). Это небольшой пруд-копань, имеющий почти прямоугольную форму со сглаженными углами. Уровень воды в озере поддерживается с помощью артезианской воды, насыщенной сульфатами, наполнение обычно происходит в начале лета; также питание происходит за счет атмосферных осадков [Иванов и др., 2019]. Площадь водосбора составляет 12,5 км², средняя глубина 2,5 м (максимальная – 4,7 м). По химическому составу вода относится к сульфатно-кальциевому классу, отличается повышенной минерализацией (0,88–0,95 г/дм³), очень высо-

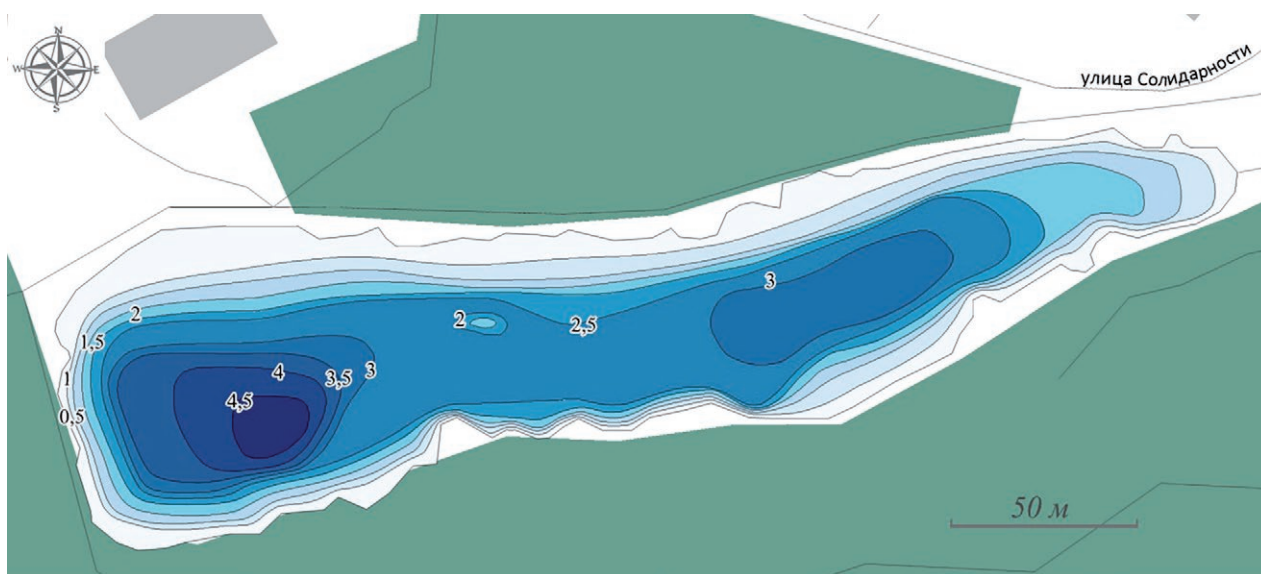


Рис. 1. Озеро Комсомольское, батиметрическая схема с указанными глубинами, м

Fig. 1. Lake Komsomolskoye, bathymetric scheme with indicated depths, m

кой жесткостью (до 15–20 °Ж), близкой к нейтральной реакцией среды [Иванов и др., 2019].

Сульфатный тип вод водозаборной скважины обуславливает накопление в донных отложениях минеральных соединений серы, что в условиях дефицита кислорода в зимний период, а в наиболее глубоких горизонтах в течение всего года, приводит к восстановлению сульфатов до сероводорода и сульфидов. Установлено, что донные отложения озера, представленные исключительно минеральными типами – песками, илистыми песками, песчаными и глинистыми илами, отличаются пластичной консистенцией, темной, местами даже черной окраской и характерным запахом сероводорода. Средняя плотность донных отложений озера составляет 1,48 г/см³ при диапазоне варибельности 1,11–2,20 г/см³. Реакция среды донных отложений варьировала от нейтральной до слабощелочной (в пределах 6,9–8,3) и в среднем составляла 7,6. Характерные для озера кислотно-щелочные условия отложений во многом обязаны хомогенному кальцию, который выпадает из насыщенных им озерных вод и осаждается на дне водоема. В донных отложениях озера установлено превышение фонового содержания свинца, меди, цинка и нефтепродуктов [Иванов и др., 2019].

Химико-аналитические исследования проводились в лаборатории эколого-аналитических измерений и мониторинга окружающей среды ИПЭН АН РТ (г. Казань).

Отбор проб выполнялся в октябре 2019 г. и в январе 2020 г. на глубоководном и мелководном участках озера. Точка 1 (т. 1) заложена в наиболее глубокой части озера (глубина 4,7 м); точка 2 (т. 2) – в мелководной части (глубина 2,5 м).

Пробы воды для микробиологического анализа отбирались в стерильные емкости из поверхностного слоя воды на глубине 10 см, согласно [ГОСТ 31942-2012]. Пробы из придонного слоя воды, в 0,5-метровом слое над дном, отбирались для определения особенностей вертикального распределения бактериопланктона. Повторность отбора проб 3-кратная. Пробы донных отложений отбирались в стерильные емкости, согласно [ГОСТ-17.5.01-80].

Для подсчета общего количества бактерий в воде и донных отложениях, когда не нужно было проводить микробиологический посев на питательные среды, в емкости с пробами вносили формалин [ГОСТ 31942-2012].

Одновременно на обоих участках отбирались пробы воды на гидрохимический анализ по показателям: рН, БПК₅, концентрация рас-

творенного кислорода, аммоний, железо, сульфаты, сероводород и сульфиды.

Оценку качества воды проводили путем сравнения фактически обнаруживаемых концентраций с предельно допустимыми для водоемов рыбохозяйственного назначения [Приказ..., 2016].

Эколого-трофическую структуру и разнообразие биоты исследовали, используя показатели бактериопланктона и бактериобентоса: общую численность бактерий, соотношение общей численности бактерий к количеству сапрофитов, численность сапрофитов, олигокарбофилов, железо- и марганецоксилирующих бактерий. Для оценки загрязнения экосистемы сульфатами и сероводородом использовали такие показатели, как численность сульфатредукторов, пурпурных и бесцветных серобактерий.

Общее количество бактериопланктона и бактериобентоса определяли методом прямого счета на мембранных фильтрах «Владипор» (Россия) с размером пор 0,2 мкм, окрашенных толуидиновым синим [Кузнецов, Дубинина, 1989; Morozova et al., 2012]. Остальные группы микроорганизмов определяли путем посева на селективные питательные среды.

Для определения олигокарбофильных бактерий использовали среду Горбенко следующего состава (г/л): питательный агар 0,5; агар-агар 13,5 [Кузнецов, Дубинина, 1989], для учета сапрофитов – среду СПА [Кузнецов, Дубинина, 1989].

Учитывая особенности и химический состав воды озера, изучали также группы микроорганизмов, участвующие в круговороте серы в водоеме: сульфатредукторы и серобактерии.

Для выявления сульфатредукторов использовали модифицированную среду Баарса с ацетатом натрия и сульфатом железа (г/л): K₂HPO₄ – 0,5; NH₄Cl – 1; NaCl – 1; Na₂SO₃ – 3; CaSO₄ – 1; MgSO₄ · 7H₂O – 2; ацетат натрия – 3,5; дрожжевой экстракт – 1; FeSO₄ – 0,5; Na₂S – 0,05; NaHCO₃ – 1; раствор микроэлементов по Пфеннигу – 1 мл [Кузнецов, Дубинина, 1989; Звягинцев, 1991]. О росте сульфатредуцирующих бактерий судили по образованию черного осадка и почернению среды вдоль пробирки за счет образования сульфида железа.

Пурпурные серооксилирующие бактерии выращивали анаэробно при дневном освещении на среде следующего состава (г/л): NH₄Cl – 0,5; KH₂PO₄ – 0,5; MgCl₂ – 0,2; NaCl – 10; NaHCO₃ – 10; Na₂CO₃ – 5; дрожжевой экстракт – 0,1; ацетат натрия – 0,5; Na₂S – 0,5; цианокобаламин – 20 мкг; раствор микроэлементов по Пфеннигу – 1 мл [Брянцева и др., 2010]. Пур-

пурные серобактерии на питательной среде образовывали колонии розового и пурпурного цвета, по мере роста бактерий среда меняла цвет на розовый, а затем бордовый.

Бесцветные сероокисляющие бактерии выращивали аэробно с добавлением в среду тиосульфата натрия в концентрации 0,5 г/л [Брянцева и др., 2010]. За развитием сероокисляющих бактерий следили по накоплению биомассы, образованию характерной белой пленки на поверхности среды, помутнению среды за счет образования серы.

Раствор микроэлементов по Пфеннигу (мг/л): EDTA – 5000; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 2000; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 100; MnCl_2 – 30; H_3BO_3 – 300; $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 200; CuCl_2 – 10; NiCl_2 – 20; Na_3MoO_4 – 20 [Брянцева и др., 2010].

Для количественного определения сульфатредукторов и серобактерий в пробах воды и грунта использовали таблицу Мак-Креди [Колешко, 1981].

Выделение железоокисляющих и марганецокисляющих бактерий, способных придавать оттенок воде и донным отложениям за счет образования окислов металлов, проводили с помощью диагностических питательных сред. Учет железоокисляющих бактерий проводили на среде следующего состава (г/л): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0,5; NaNO_3 – 0,5; K_2HPO_4 – 0,5; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,5; сахароза – 2; пептон – 1; FeSO_4 – 5,9; агар-агар – 13,5; pH среды составлял 7 [Захарова, Парфенова, 2007]. Рост железоокисляющих бактерий сопровождался накоплением бурых окислов железа, питательная среда также меняла цвет, постепенно окисляясь до ржаво-красного.

Учет марганецокисляющих бактерий проводили на среде по: [Захарова, Парфенова, 2007], но вместо сульфата железа вносили MnSO_4 – 4,7 г/л. Рост марганецокисляющих бактерий сопровождался накоплением бежево-коричневых окислов марганца, питательная среда также постепенно приобретала бежевый цвет.

Для того чтобы определить отношение данных бактерий к кислороду, бактерии пересеивали методом укола в пробирки с агаризованной средой. Установлено, что у марганецокисляющих бактерий наблюдался поверхностный рост, т. е. они являлись аэробами. В верхнем слое агаризованной среды появлялись бежевые колонии, которые со временем темнели. Рост железоокисляющих бактерий отмечался в толще среды вдоль укола, что свидетельствует о микроаэрофильности данной группы бактерий. Рост сопровождался образованием бурых колоний и окрашиванием среды в красный цвет за счет накопления окислов железа.

Экологическое состояние озера оценивалось по показателям бактериопланктона и бактериобентоса. Класс качества воды оценивался по трем показателям: общему количеству бактериопланктона, количеству сапрофитных бактерий, отношению общего количества бактериопланктона и численности сапрофитов согласно классификации качества воды Росгидромет [РД 52.24.309-2016]. Кроме того, экологическое состояние водоема оценивали по шкале экологических модификаций по показателям бактериобентоса: общему количеству бактерий бентоса, численности сапрофитов, соотношению сапрофитов к общему количеству бактерий, а также численности сульфатредукторов [Дзюбан и др., 2005].

Гидрохимические и микробиологические анализы проб делали в трех повторностях. Посев на питательные среды проводили из двух соседних разведений. Для статистической оценки всех полученных данных вычисляли такие показатели, как среднее значение, среднеквадратическое отклонение и доверительный интервал. Статистическую обработку данных проводили с использованием программного пакета Microsoft Excel для Windows 10.

Результаты

По результатам исследования гидрохимического состава в январе 2020 г. в оз. Комсомольское наблюдалось значительное улучшение качества воды по основным показателям по сравнению с аналогичным периодом 2019 г. Существенно увеличилась концентрация кислорода у поверхности и у дна. Если в 2019 г. этот показатель был очень низким, в придонном слое воды кислород практически отсутствовал, то в 2020 г. он находился в пределах ПДК_{рб} (предельно допустимые концентрации для водоемов рыбохозяйственного назначения). Значение БПК₅ снизилось в пробах воды с глубоководной станции, особенно в придонном слое воды (табл. 1).

Снизилась также концентрации аммония и железа до их значений в пределах ПДК_{рб}. В 2019 г. в водоеме наблюдались высокие концентрации сероводорода и сульфидов, многократно превышающие ПДК_{рб}, в 2020 г. сероводород и сульфиды в водоеме отсутствовали (табл. 1).

Численность бактериопланктона в озере была невысока и незначительно менялась с глубиной (табл. 2). В октябре состояние воды по общему количеству бактериопланктона оценивалось как «слабозагрязненная» (табл. 2), а в январе численность бактериопланктона

Таблица 1. Гидрохимические показатели воды в оз. Комсомольское в январе 2019 и 2020 гг.

Table 1. Hydrochemical indicators of Lake Komsomolskoye water in January 2019 and 2020

Показатель Indicator	Единицы измерения Units	ПДКрб TLVrb	Точка 1 пов. Point 1 surface		Точка 2 пов. Point 2 surface		Точка 1 придон. Point 1 bottom	
			2019	2020	2019	2020	2019	2020
рН	един. units	6,50–8,50	7,40	7,50	7,40	7,70	7,40	7,50
O ₂ раств. O ₂ soluble	мг/л mg/l	> 6	1,20	6,70	1,90	9,30	0	4,90
БПК ₅ BOD ₅	мгO ₂ /дм ³ mgO ₂ /dm ³	2	3,20	2,10	1,31	1,90	10	2,60
Аммоний Ammonium	мг/дм ³ mg/dm ³	0,50	1,31	0,40	1,40	0,30	7	0,42
Сульфат Sulfate	«	100	421	409	416	408	404	416
Железо общ. Iron	«	0,10	0,10	0,06	0,12	0,05	0,15	0,05
Сероводород и сульфиды Hydrogen sulfide and sulfides	«	0,005	0,82	<0,002	1,51	<0,002	9,21	<0,002

снижалась, состояние воды характеризовалось как «условно чистая», только в придонном слое мелководного участка (т. 2) – как «слабозагрязненная». По численности сапрофитов, которая оставалась низкой в течение всего периода наблюдений, и по соотношению общей численности бактериопланктона к числу сапрофитов, вода классифицировалась как «условно чистая».

Численность олигокарбофильных бактерий, предпочитающих низкие концентрации углеродных органических соединений, не отличалась значительно от численности сапрофитов в воде озера (табл. 2). Соотношение количества олигокарбофилов к числу сапрофитов в подледный период хотя и было выше единицы и свидетельствовало о способности водоема к самоочищению, но оставалось достаточно низким из-за большого содержания легкоразлагаемой органики в воде озера.

Бактериобентос в октябре находился на уровнях низких значений численности. В январе эти значения увеличивались примерно в 2 раза (табл. 3). По данным показателям экологическое состояние водоема находилось в пределах нормы.

Количество сапрофитов в донных отложениях наиболее глубоководного участка озера (т. 1) было на порядок больше, чем в донных отложениях мелководного участка (т. 2). По этому показателю состояние озера классифицировалось как «состояние риска». По соотношению общего количества сапрофитов к числу бактериобентоса состояние водоема оценивалось в пределах нормы (табл. 3).

В донных отложениях соотношение численности олигокарбофилов и сапрофитов также было низким (табл. 3). В подледный период для глубоководного участка (т. 1) это значение было даже ниже единицы, что указывало на слабые процессы минерализации органики в глубоководной зоне озера из-за низкой обеспеченности кислородом и, соответственно, накопления в донных отложениях легкоминерализуемого органического вещества.

Установлено, что в гидроэкосистеме озера вследствие повышенной концентрации сульфатов развивались сульфатредуцирующие бактерии, особенно в донных отложениях. Пробы донных отложений имели характерные признаки деятельности сульфатредукторов – запах сероводорода и почернение из-за присутствия высоких концентраций осадочного железа. Так, численность сульфатредукторов в донных отложениях была высокой как осенью, так и в подледный период (табл. 3). Экологическое состояние озера согласно шкале экологических модификаций соответствовало уровню «предкризисное состояние». Сульфатредукторы в октябре обнаруживались в поверхностных пробах воды в незначительных количествах, с глубиной их численность возрастала на три порядка. В подледный период численность сульфатредукторов в поверхностных водах озера увеличивалась (табл. 2).

Путем посева на диагностическую питательную среду из грунта удалось выделить сульфатредуцирующие подвижные вибрионы, из водной среды – сульфатредуцирующие па-

Таблица 2. Оценка качества воды оз. Комсомольское по показателям бактериопланктона согласно РД 52.24.309-2016

Table 2. Assessment of Lake Komsomolskoye water quality by bacterioplankton indicators according to RD 52.24.309-2016

Сезон Season	Точка 1, пов. Point 1 surface	Точка 2, пов. Point 2 surface	Точка 1, придон. (4,5–5 м) Point 1 bottom (4.5–5 m)	Точка 2, придон. (2–2,5 м) Point 2 bottom (2–2.5 m)	Степень загрязненности воды (класс качества) Degree of water quality (quality class)
Общее количество бактериопланктона, 10 ⁶ кл/мл Total number of bacterioplankton, 10 ⁶ cell/ml					
Октябрь October	1,70 ± 0,06	1,34 ± 0,02	2,31 ± 0,05		Слабозагрязн. (II) 1,0–3,0 · 10 ⁶ кл/мл Slightly polluted (II) 1.0–3.0 · 10 ⁶ cell/ml
Январь January	0,96 ± 0,04	0,96 ± 0,07	0,98 ± 0,02	1,17 ± 0,07	Условно чистая (I) <1,0 · 10 ⁶ кл/мл – слабозагрязн. (II) 1,0–3,0 · 10 ⁶ кл/мл Conditionally clean (I) <1.0 · 10 ⁶ cell/ml – Slightly polluted (II) 1.0–3.0 · 10 ⁶ cell/ml
Общее количество сапрофитов, кл/мл Number of saprophytes, cell/ml					
Октябрь October	680 ± 24	120 ± 7	230 ± 19		Условно чистая (I) <5,0 · 10 ³ кл/мл Conditionally clean (I) <5.0 · 10 ³ cell/ml
Январь January	720 ± 13	150 ± 10	840 ± 25	220 ± 8	Условно чистая (I) Conditionally clean (I)
Общее количество олигокарбофилов, кл/мл Number of oligocarbophiles, cell/ml					
Октябрь October	250 ± 11	900 ± 46	200 ± 14		
Январь January	1070 ± 37	470 ± 13	1410 ± 54	750 ± 28	
Соотношение общего количества бактериопланктона к числу сапрофитов, 10 ⁴ Ratio of the number of bacterioplankton to saprophytes, 10 ⁴					
Октябрь October	2,50	1,11	10,00		Условно чистая (I) >10 ³ Conditionally clean (I) >10 ³
Январь January	1,33	6,40	1,16	5,31	Условно чистая (I) Conditionally clean (I)
Сульфатредукторы*, кл/мл Sulfate-reducing bacteria*, cell/ml					
Октябрь October	2,5	6	2500		
Январь January	250	25	6000	2500	

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4: * – наиболее вероятное число микроорганизмов.

Note. Here and in tabl. 3, 4: * – the most likely number of microorganisms

лочки и кокки. Рост сульфатредукторов отмечался не только в виде черного осадка на дне, но и по всей высоте пробирки, что свидетельствует о слабой чувствительности к кислороду данной группы бактерий.

Осенью в оз. Комсомольское бесцветные серобактерии, способные расти в аэробных условиях, отмечены в незначительных количе-

ствах в поверхностных пробах воды, тогда как с глубиной их численность возрастала примерно на 1–2 порядка (табл. 4). В подледный период их количество в поверхностных пробах, напротив, примерно на 1–2 порядка увеличивалось. В донных отложениях численность данной группы серобактерий не менялась в зависимости от сезона (табл. 4).

Таблица 3. Оценка экологического состояния оз. Комсомольское по показателям бактериобентоса в соответствии со шкалой экологических модификаций [Дзюбан и др., 2005]

Table 3. Assessment of the Lake Komsomolskoye ecological state by bacteriobenthos indicators according to the scale of environment modifications [Dzyuban et al., 2005]

Сезон Season	Точка 1 Point 1	Точка 2 Point 2	Экологическое состояние озера Ecological state of the lake
	Общее количество бактериобентоса, 10 ⁸ кл/г донных отложений Total number of bacteriobenthos, 10 ⁸ cell/g sediments		
Октябрь October	5,55 ± 0,08	3,81 ± 0,14	Норма 10 ⁷ –10 ⁹ кл/мл Norm 10 ⁷ –10 ⁹ cell/ml
Январь January	11,20 ± 0,55	5,89 ± 0,04	Норма Norm
	Общее количество сапрофитных бактерий, тыс. кл/г донных отложений Number of saprophytes, thousands of cell/g sediments		
Октябрь October	230 ± 18,20	45 ± 1,10	Состояние риска 10 ⁴ –10 ⁵ кл/мл Risk status 10 ⁴ –10 ⁵ cell/ml
Январь January	180 ± 14,50	21 ± 1,70	Состояние риска Risk status
	Общее количество олигокарбофилов, тыс. кл/г донных отложений Number of oligocarbophiles, thousands of cell/g sediments		
Октябрь October	425 ± 17,31	70 ± 2,10	–
Январь January	137 ± 13,40	128 ± 15,12	–
	Соотношение общего количества сапрофитов к числу бактериобентоса Ratio of the number of saprophytes to the number of bacteriobenthos		
Октябрь October	4×10 ⁻⁴	12×10 ⁻⁴	Норма <0,01 Norm <0.01
Январь January	16×10 ⁻⁴	35×10 ⁻⁵	Норма Norm
	Сульфатредукторы*, тыс. кл/г донных отложений Sulfate-reducing bacteria*, thousands of cell/g sediments		
Октябрь October	250	60	Предкризисное состояние 10 ³ –10 ⁵ кл/мл Pre-crisis state 10 ³ –10 ⁵ cell/ml
Январь January	900	300	Предкризисное состояние Pre-crisis state

На диагностической среде при развитии бесцветных серобактерий происходило помутнение среды за счет выделения серы бактериями и образование белой, состоящей из серы, пленки на поверхности среды. Были выделены бесцветные нитчатые серобактерии, морфологически похожие на р. *Thiothrix* и р. *Beggiatoa*.

Фототрофные пурпурные серобактерии в значительных количествах диагностировались в пробах воды и донных отложений

из озера. При этом в подледный период происходили существенные изменения в вертикальном распределении пурпурных серобактерий. Если в октябре пурпурные сероокисляющие бактерии населяли только придонный слой и донные отложения водоема, то зимой они перемещались в поверхностный слой воды, а в донных отложениях и в придонном слое воды их численность снижалась на несколько порядков (табл. 4). Таким образом, пурпур-

Таблица 4. Численность различных диагностических групп микроорганизмов в составе бактериопланктона и бактериобентоса оз. Комсомольское

Table 4. The number of different microorganisms diagnostic groups in bacterioplankton and bacteriobenthos of Lake Komsomolskoye

Сезон Season	Бактериопланктон Bacterioplankton				Бактериобентос Bacteriobenthos	
	Точка 1, пов. Point 1 surface	Точка 2, пов. Point 2 surface	Точка 1, придон. Point 1 bottom	Точка 2, придон. Point 2 bottom	Точка 1 Point 1	Точка 2 Point 2
	Пурпурные серобактерии*, кл/мл Purple sulfur-oxidizing bacteria*, cell/ml				тыс. кл/г донных отложений thousands of cell/g sediments	
Октябрь October	0	0	250		70	0,60
Январь January	12×10 ³	30×10 ³	5	6	0,002	0,06
	Бесцветные серобактерии*, кл/мл Colorless sulfur-oxidizing bacteria*, cell/ml				тыс. кл/г донных отложений thousands of cell/g sediments	
Октябрь October	7	13	500		0,10	0,21
Январь January	250	6000	60	13	0,52	0,30
	Железоокисляющие / марганцеокисляющие бактерии, кл/мл Iron-oxidizing bacteria / manganese-oxidizing bacteria, cell/ml				тыс. кл/г донных отложений thousands of cell/g sediments	
Октябрь October	0/0	0/0	0/0		0/0,04	2,76/0,23
Январь January	0/0	0/0	0/0		0/0,18	5,18/0,19

ные серобактерии в подледный период активно развивались в водной толще озера, где они осуществляли фотосинтез, продуцировали органическое вещество и окисляли сероводород до серы и сульфатов. Увеличение их численности в поверхностном слое подо льдом обусловлено потребностью в дневном свете для осуществления фотосинтеза [Нетрусов, Котова, 2006].

На диагностической питательной среде пурпурные фототрофные серобактерии образовывали колонии розового, бордового, коричневого цветов, при этом происходило окрашивание питательной среды сначала в светло-розовый, затем в бордовый цвет.

В воде озера не удалось обнаружить железоокисляющие и марганцеокисляющие бактерии. В подледный период они обнаружены в небольших количествах лишь в донных отложениях (табл. 4), где развивались в микроаэрофильных условиях и численность их не была высокой.

Обсуждение

Физико-химические факторы, такие как рН, температура, освещенность, содержание сероводорода, сульфатов и др., опреде-

ляют разнообразие микробных сообществ гидрозкосистемы.

Химико-аналитические исследования, проведенные в январе и феврале 2019 г., показали, что содержание растворенного в воде кислорода существенно ниже нормативных значений. Вместе с тем в воде в высоких концентрациях, как у дна, так и в поверхностном слое, были отмечены сульфиды и сероводород. Многократное превышение ПДК по этому показателю, по-видимому, послужило одним из основных факторов массовой гибели ихтиофауны в водоеме [Токинова, Сергеев, 2019]. В 2020 году после проведения комплексных мероприятий по расчистке дна и благоустройству береговой зоны мы наблюдали значительные улучшения гидрохимических показателей воды озера (табл. 1).

Несмотря на то что в подледный период содержание кислорода в воде уже соответствовало норме, а сульфиды и сероводород отсутствовали, сульфатредукторы и пурпурные фототрофные серобактерии были обнаружены как в донных отложениях, так и в водной толще. Массовое развитие сульфатредукторов указывало на неблагоприятное экологическое состояние водоема и загрязненность гидрозкосистемы сульфатами. Согласно шкале экологи-

ческих модификаций, где представлена оценка экологического состояния водных объектов по показателям бактериобентоса, состояние изучаемого водоема характеризовалось как «предкризисное». Качество воды по микробиологическим показателям соответствовало нормативам Росгидромета, но из-за высокой численности сульфатредукторов в донных отложениях экологическое состояние озера Комсомольское оставалось неблагоприятным.

Считается, что сульфатредукторы относятся к строгим анаэробам, рост которых ингибируется в присутствии кислорода. Однако не все представители данной группы быстро погибают в окислительных условиях, многие из них обладают азотолерантностью [Grein et al., 2013; Брюханов и др., 2016]. Существуют различные способы защиты от окислительных стрессов. Например, сульфатредуцирующие бактерии часто формируют консорциумы и колонии вместе с фототрофными серобактериями, которые уменьшают доступ к ним кислорода, а сульфатредукторы, в свою очередь, поставляют сероводород, являющийся субстратом для роста сероокисляющих бактерий [Dolla et al., 2006]. Поэтому в водных горизонтах, населенных пурпурными серобактериями, часто можно наблюдать высокую численность жизнеспособных клеток сульфатредукторов [Саввичев и др., 2014].

Фотоавтотрофные пурпурные сероокисляющие бактерии осуществляют фотосинтез в бескислородных условиях. Клетки этих серобактерий содержат бактериохлорофилл и каротиноиды, которые придают им соответствующую окраску [Лунина и др., 2014]. Они способны окислять не только сероводород, но и восстановленные органические вещества, используя в качестве доноров электронов не воду, как при аэробном фотосинтезе, а восстановленные соединения серы и железа, а также водород [Нетрусов, Котова, 2006]. Некоторые представители могут окислять тиосульфат и сульфид, накапливая в своих клетках элементарную серу, в условиях как аэробнобиоза, так и анаэробнобиоза [Гриднева и др., 2009]. При массовом развитии пурпурные сероокисляющие бактерии образуют скопления, способные окрашивать определенные слои водоемов в разные оттенки пурпурного цвета, особенно в мелководных прудах [Горбунов, Уманская, 2014].

При культивировании на селективных питательных средах было установлено, что пурпурные серобактерии обладали устойчивостью к кислороду, поскольку их рост отмечен не только на дне, но и вдоль всей пробирки. Известно, что многие серобактерии способны

расти в микроаэрофильных условиях и толерантны к высоким концентрациям кислорода [Madigan, Jung, 2009]. Дыхание и фотосинтез у бактерий – два конкурирующих процесса, и при возможности выбора клетки предпочитают энергию света. При микроскопировании с фазовым контрастом наблюдались овальные почкующиеся отдельные клетки и микроколонии пурпурных серобактерий, окрашенных, за счет наличия в них фотосинтетических пигментов, в различные оттенки пурпурного цвета.

В зимний период пурпурные серобактерии перемещались в подледный слой воды, что связано с их потребностью в энергии солнечного света для осуществления фотосинтеза, а также способностью к росту в присутствии кислорода. Но численность данной группы бактерий была недостаточно высокой, чтобы повлиять на окраску воды, возможно, из-за хорошего кислородного режима подо льдом озера.

Следует отметить, что в условиях недостатка кислорода в подледный период возможно массовое развитие пурпурных серобактерий, осуществляющих фотосинтез и активно потребляющих сероводород, поставляемый в больших количествах сульфатредуцирующими бактериями (рис. 2). Активное развитие пурпурных серобактерий может являться причиной часто наблюдаемого на озере изменения окраски верхних слоев воды.

К сероокисляющим бактериям также относятся хемолитотрофные бесцветные серобактерии, которые окисляют соединения серы с использованием кислорода аэробно. Их называют бесцветными серобактериями для того, чтобы отличить от пигментированных фототрофных серобактерий [Kim, Gadd, 2008]. Развитие данной группы бактерий всегда благоприятно для водоемов, загрязненных сероводородом и сульфидами. Бесцветные серобактерии играют важную роль в гидроэкосистемах, развиваются при наличии достаточного количества кислорода и сероводорода в среде обитания, они способны быстро удалять сульфиды из окружающей среды за счет высокой скорости их окисления, многие бактерии могут окислять сероводород до элементарной серы, накапливая серу внутри или вне своих клеток [Robertson, Kuenen, 2006].

Известно, что за изменение цвета воды в водоемах (появление ржавого цвета воды или ила) часто ответственны железокисляющие и марганецокисляющие бактерии, которые, кроме того, являются индикаторами загрязнения экосистемы тяжелыми металлами, а также играют важную роль в круговороте железа и марганца [Нетрусов, Котова, 2006; Нгун

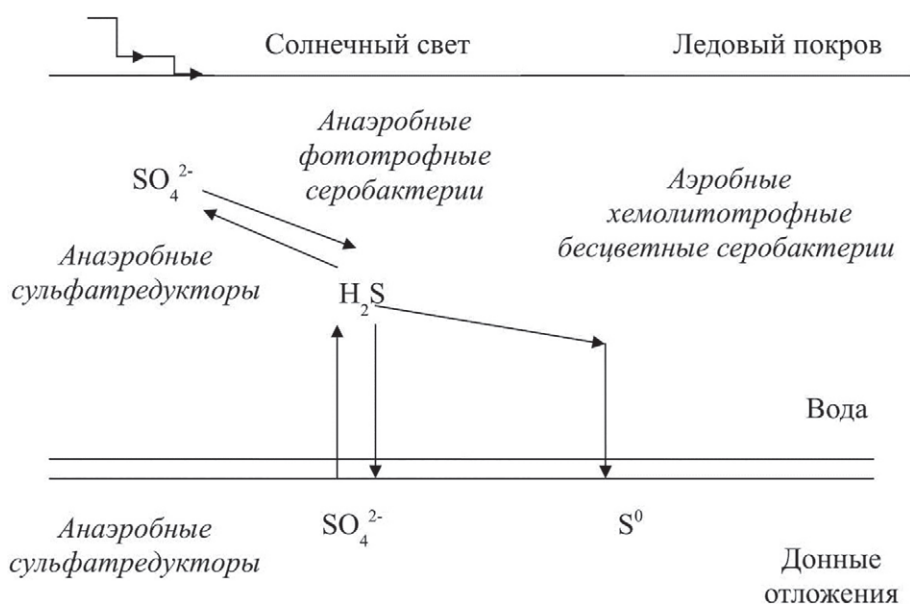


Рис. 2. Группы микроорганизмов, участвующие в циркуляции серы в экосистеме озера Комсомольское

Fig. 2. Groups of microorganisms involved in the sulfur circulation in the Lake Komsomolskoye ecosystem

и др., 2014]. Микроорганизмы осуществляют окисление железа как в аэробных, так и в анаэробных условиях. В большинстве случаев способность бактерий окислять железо сочетается с использованием энергии окисления молекулярной и сульфидной серы [Kapler, Newman, 2004].

В результате проведенных исследований удалось установить, что, несмотря на низкую численность железоокисляющих и марганец-окисляющих бактерий, они осуществляли окисление железа в условиях недостатка кислорода. Численность их была невысокой для формирования красного илистого налета из окисла железа на поверхности донных отложений в подледный период.

В условиях сильного дефицита кислорода и переизбытка сульфатов в гидроэкосистеме озера активный рост сульфатредуцирующих бактерий может привести к загрязнению водоема сероводородом, массовому развитию анаэробных пурпурных серобактерий, в результате возможно окрашивание верхних слоев воды озера и дальнейшее повышение концентрации сульфатов (рис. 2).

Благоприятный кислородный режим в озере в подледный период будет способствовать подавлению роста сульфатредукторов, пурпурных фототрофных серобактерий и развитию участвующих в процессе самоочищения аэробных микроорганизмов, в том числе бесцветных серобактерий.

Заключение

Для гидроэкосистемы озера Комсомольское в условиях насыщенности воды сульфатами характерно наличие сульфатредуцирующих и сероокисляющих бактерий в составе бактериопланктона и бактериобентоса.

После проведения комплексных мероприятий по расчистке дна от донных отложений и благоустройству береговой зоны наблюдалось значительное улучшение качества воды по гидрохимическим показателям.

По микробиологическим показателям вода в поверхностном и придонном слое оценивалась как «условно чистая» – «слабозагрязненная», т. е. I–II класса качества согласно классификации Росгидромета. В воде озера наблюдалось достаточно однородное вертикальное распределение бактериопланктона [РД 52.24.309-2016].

В придонном слое и особенно в донных отложениях развивались сульфатредукторы и создавались благоприятные условия для развития сероокисляющих бактерий, главных потребителей сероводорода. В подледный период происходило вертикальное перераспределение численности пурпурных фотосинтезирующих сероокисляющих бактерий в гидроэкосистеме озера. Если осенью пурпурные серобактерии заселяли лишь донные отложения и придонный слой воды, то в подледный период основная масса этой группы бактерий

перемещалась из донных отложений в поверхностный слой воды, что связано с их слабой чувствительностью к кислороду и необходимостью использовать солнечный свет для осуществления фотосинтеза.

В составе бактериобентоса была повышена численность сапрофитов, что свидетельствовало о присутствии легкоминерализуемого органического вещества в донных отложениях водоема. Экологическое состояние озера, согласно шкале экологических модификаций, оценивалось как «предкризисное» из-за высокой численности сульфатредукторов в донных отложениях.

В условиях низких концентраций кислорода в присутствии сульфатов в гидроэкосистеме озера активное развитие сульфатредуцирующих бактерий приведет к повышению концентрации сероводорода. Высокие концентрации сероводорода и металлов при низких концентрациях кислорода крайне благоприятны для массового развития анаэробных пурпурных серобактерий и окрашивания воды в оттенки пурпурного цвета, что неоднократно отмечалось на озере.

Для экосистемы оз. Комсомольское в подледный период крайне важно наличие достаточных концентраций растворенного кислорода, что положительно отразится на гидрохимическом режиме и будет способствовать подавлению роста анаэробных сульфатредукторов, а также развитию аэробных микроорганизмов в составе бактериопланктона и бактериобентоса.

Авторы благодарят сотрудников лаборатории эколого-аналитических измерений и мониторинга окружающей среды ИПЭН АН РТ (г. Казань) Н. В. Шурмину и Л. К. Галиахметову за помощь в проведении химико-аналитических измерений.

Литература

Ашихмина Т. Я., Кутявина Т. И., Домнина Е. А. Изучение процессов эвтрофикации природных и искусственно созданных водоемов (литературный обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 6–13.

Брюханов А. Л., Корнеева В. А., Динарева Т. Ю., Каранчук О. В., Нетрусов А. И., Пименов Н. В. Компоненты антиокислительных систем в клетках аэротолерантных сульфатредуцирующих бактерий рода *Desulfovibrio* (штаммы А2 и TomC), выделенных из отходов добычи металлов // Микробиология. 2016. Т. 85, № 6. С. 625–634. doi: 10.7868/S0026365616060045

Брянцева И. А., Турова Т. П., Ковалева О. Л., Кострикина Н. А., Горленко В. М. Новая крупная алка-

лофильная пурпурная серобактерия *Ectothiorhodospira magna* sp. nov. // Микробиология. 2010. Т. 79, № 6. С. 782–792.

Горбунов М. Ю., Уманская М. В. Массовое развитие пурпурной серной бактерии *Chromatium okenii* (EHRB. 1838) PERTY 1852 в небольшом городском озере Дачное (г. Тольятти, Самарская область) // Известия Самарского НЦ РАН. 2014. Т. 16, № 5(5). С. 1722–1725.

ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. М.: Изд-во стандартов, 1980. 5 с.

ГОСТ 31942-2012. Вода. Отбор проб для микробиологического анализа. М.: Стандартинформ, 2013. 28 с.

Гриднева Е. В., Грабович М. Ю., Дубинина Г. А., Черноусова Е. Ю., Акимов В. Н. Экофизиология литотрофных сероокисляющих представителей рода *Sphaerotilus* – обитателей сульфидных источников Северного Кавказа // Микробиология. 2009. Т. 78, № 1. С. 89–97.

Дзюбан А. Н., Косолапов Д. Б., Кузнецова И. А. Микробиологические процессы в донных отложениях Рыбинского водохранилища и озера Плещеево как факторы формирования качества водной среды // Гидробиологический журнал. 2005. Т. 41, № 4. С. 82–88.

Захарова Ю. Р., Парфенова В. В. Метод культивирования микроорганизмов, окисляющих железо и марганец в донных осадках оз. Байкал // Изв. РАН. Сер. биол. 2007. № 3. С. 290–295.

Звягинцев Д. Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: МГУ, 1991. 304 с.

Иванов Д. В., Зиганшин И. И., Валиев В. С., Хасанов Р. Р., Маланин В. В., Марасов А. А., Шамаев Д. Е., Паймикина Э. Е. Характеристика донных отложений озера Комсомольское // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Матер. II Междунар. конф. (Казань, 19–24 мая 2019 г.). Казань, 2019. Ч. 2. С. 93–98.

Колешко О. И. Экология микроорганизмов почвы: Лаб. практикум. Минск: Высш. шк., 1981. 176 с.

Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.

Лунина О. Н., Саввичев А. С., Кузнецов Б. Б., Пименов Н. В., Горленко В. М. Аноксигенные фототрофные бактерии стратифицированного озера Кисло-Сладкое (Кандалакшский залив Белого моря) // Микробиология. 2014. Т. 83, № 1. С. 90–108. doi: 10.7868/S002636561401008X

Нгун К. Т., Плешаков Е. В., Решетников М. В., Кузнецов В. В. Использование микробиологических показателей в эколого-почвенном мониторинге города Медногорска // Изв. Саратов. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2014. Т. 14, вып. 1. С. 55–60.

Нетрусов А. И., Котова И. Б. Микробиология. М.: Академия, 2006. 352 с.

Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций

вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». М.: Минсельхоз РФ, 2016. 153 с.

РД 52.24.309-2016. Руководящий документ. Организация и проведение режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2016. 100 с.

Саввичев А. С., Лунина О. Н., Русанов И. И., Захарова Е. Е., Веслополова Е. Ф., Иванов М. В. Микробиологические и изотопно-геохимические исследования озера Кисло-Сладкое – меромиктического водоема на побережье Кандалакшского залива Белого моря // Микробиология. 2014. Т. 83, № 2. С. 191–203. doi: 10.7868/S002636561401011X

Токинова П. П., Сергеев А. С. О причинах массовой гибели рыбы в озере Комсомольское (г. Казань) // Чистая вода. Казань: Сб. трудов X Специализ. выставки и Конгресса (Казань, 17–19 окт. 2019 г.). Казань, 2019. С. 119–122.

Adamovich B. V., Medvinsky A. B., Nikitina L. V., Radchikova N. P., Mikheeva T. M., Kovalevskaya R. Z., Veres Yu. K., Chakraborty A., Rusakov A. V., Nurieva N. I., Zhukova T. V. Relations between variations in the lake bacterioplankton abundance and the lake trophic state: Evidence from the 20-year monitoring // Ecol. indicators. 2019. Vol. 97. P. 120–129. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.09.049

Dolla A., Fournier M., Dermoun Z. Oxygen defense in sulfate-reducing bacteria // J. Biotechnol. 2006. Vol. 126, no. 1. P. 87–100. doi: 10.1016/j.jbiotec.2006.03.041

Engstrom D. R., Fritz S. C., Almendinger J. E., Juggins S. Chemical and biological trends during lake evolution in recently deglaciated terrain // Nature. 2000. Vol. 408. P. 161–166. doi: 10.1038/35041500

Grein F., Ramos A. R., Venceslau S. S., Pereira I. A. Unifying concepts in anaerobic respiration: insights from

dissimilatory sulfur metabolism // Biochim. Biophys. Acta. 2013. Vol. 1827, no. 2. P. 145–160. doi: 10.1016/j.bbabi.2012.09.001

Kapler A., Newman D. K. Formation of Fe (III) – minerals by Fe (II) – oxidizing photoautotrophic bacteria // Geochim. Cosmochim. Acta. 2004. Vol. 68, no. 6. P. 1217–1226. doi: 10.1016/j.gca.2003.09.006

Kim B. H., Gadd G. M. Bacterial physiology and metabolism. New-York: Cambridge University Press, 2008. P. 408–481. doi: 10.1017/CBO9780511790461.013

Madigan M. T., Jung D. O. An overview of purple bacteria: systematic, physiology and habitat / Eds. C. N. Hunter, F. Daldal, M. C. Thurnauer, J. T. Beatty. Dordrecht: Springer Academic Publ., 2009. P. 1–15. doi: 10.1007/978-1-4020-8815-5_1

Morozova O. V., Ratushnyak A. A., Trushin M. V. Participation of planktonic and benthic bacteria in the polyphosphate-accumulating process in mesocosms contaminated with phosphate and nitrate // World Appl. Sci. J. 2012. Vol. 19, no. 1. P. 12–19. doi: 10.5829/idosi.wasj.2012.19.01.64182

Robertson L. A., Kuenen J. G. The Prokaryotes / Eds. M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K. H. Schleifer, E. Stackebrandt. New-York: Springer-Verlag, 2006. P. 985–1011. doi: 10.1007/0-387-30742-7_31

Smith V. H., Joe S. B., Howarth R. W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystem // Limnol. Oceanogr. 2006. Vol. 51, no. 1. P. 351–355. doi: 10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0351

Smith V. H., Shindler D. W. Eutrophication science: where do we go from here? // Trends in ecology and evolution. 2009. Vol. 24. P. 201–207. doi: 10.1016/j.tree.2008.11.009

Поступила в редакцию 14.10.2021

References

Ashikhmina T. I., Kutuyavina T. I., Domnina E. A. Izuchenie protsessov evtrofikatsii prirodnykh i iskusstvenno sozdannykh vodoemov (literaturnyi obzor) [Studying the processes of natural and man-made reservoirs eutrophication (a review)]. *Teor. i priklad. ekol.* [Theoretical and Appl. Ecol.]. 2014. Vol. 3. P. 6–13.

Bryukhanov A. L., Korneeva V. A., Dinareva T. Yu., Karanchuk O. V., Netrusov A. I., Pimenov N. V. Komponenty antiokislitel'nykh sistem v kletkakh aerotolerantnykh sul'fatredutsiruyushchikh bakterii roda *Desulfovibrio* (shtammy A2 i TomC), vydelennykh iz otkhodov dobychi metallov [Components of antioxidant systems in the cells of aerotolerant sulfate-reducing bacteria of the genus *Desulfovibrio* (strain A2 and TomC), isolated from metal mining waste]. *Microbiol.* [Microbiol.]. 2016. Vol. 85, no. 6. P. 625–634. doi: 10.7868/S0026365616060045

Bryantseva I. A., Tourova T. P., Kostrikina N. A., Gorlenko V. M., Kovaleva O. L. Novaya krupnaya alkalofil'naya purpurnaya serobakteriya *Ectothiorhodospira magna* sp. nov. [*Ectothiorhodospira magna* sp. nov., a new large alkaliphilic purple sulfur bacterium]. *Microbiol.* [Microbiol.]. 2010. Vol. 79, no. 6. P. 780–790.

Dzyuban A. N., Kosolapov D. B., Kuznetsova B. B. Mikrobiologicheskie protsessy v donnykh otlozheniyakh Rybinskogo vodokhranilishcha i ozera Pleshcheevo kak faktory formirovaniya kachestva vodnoi sredy [Microbiological processes in bottom sediments of Rybinsk reservoir and Lake Pleshevo as factors in formation of the quality of aquatic environment]. *Gidrobiol. zhurn.* [Hydrobiol. J.]. 2005. Vol. 41, no. 4. P. 82–88.

Gorbunov M. Yu., Umanskaya M. V. Massovoe razvitiye purpurnoi sernoi bakterii *Chromatium okenii* (EHRB. 1838) PERTY 1852 v nebol'shom gorodskom ozere Dachnoe (g. Tol'yatti, Samarkaya oblast') [Mass development of purple sulfur bacteria *Chromatium okenii* (EHRB. 1838) PERTY 1852 in a small town Lake Dachnoe (Tolgiatti, Samara region)]. *Izvestiya Samarskogo NC RAN* [Izvestia RAS SamSC]. 2014. Vol. 16, no. 5(5). P. 1722–1725.

GOST 17.1.5.01-80. Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozhenii vodnykh ob'ektov dlya analiza na zagriaznennost' [GOST 17.1.5.01-80. Nature protection. Hydrosphere. General requirements for sampling bottom sediments of water bodies for contamination analysis]. Moscow: IZD-VO STANDARTOV, 1980. 5 p.

GOST 31942-2012. Voda. Otbor prob dlya mikrobiologicheskogo analiza [GOST 31942-2012. Water. Sampling for microbiological analysis]. Moscow: Standartinform, 2013. 28 p.

Gridneva E. V., Grabovich M. Yu., Dubinina G. A., Chernousova E. Yu., Akimov V. N. Ekofiziologiya litotrofnikh serookislyayushchikh predstavitelei roda *Sphaerotilus* – obitatelei sul'fidnykh istochnikov Severnogo Kavkaza [Ecophysiology of lithotrophic sulfur-oxidizing representatives of the genus *Sphaerotilus* – inhabitants of sulfide sources of the North Caucasus]. *Microbiol.* [Microbiol.]. 2009. Vol. 78, no. 1. P. 89–97.

Ivanov D. V., Ziganshin I. I., Valiev V. S., Khasanov R. R., Malanin V. V., Marasov A. A., Shamaev D. E., Paimikina E. E. Kharakteristika donnykh otlozhenii ozera Komsomol'skoe [Sediments characteristics of Lake Komsomolskoye]. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya*: Mater. II mezhdunar. konf. (Kazan 19–24 maya 2019 g.) [Lakes of Eurasia: Problems and solutions: Proceed. II int. conf. (Kazan, May 19–24, 2019)]. Kazan, 2019. Part II. P. 93–98.

Koleshko O. I. Ekologiya mikroorganizmov pochvy: Laboratornyi praktikum [Ecology of microorganisms of soil: Laboratory practice]. Minsk: Vyssh. shk., 1981. 175 p.

Kuznetsov S. I., Dubinina G. A. Metody izucheniya vodnykh mikroorganizmov [Methods for studying water microorganisms]. Moscow: Nauka, 1989. 288 p.

Lunina O. N., Savichev A. S., Kuznetsov B. B., Pimenov N. V., Gorlenko V. M. Anoksigennyye fototrofnyye bakterii stratifitsirovannogo ozera Kislo-Sladkoe (Kandalakshskii zaliv Belogo morya) [Anoxygenic phototrophic bacteria of the stratified Lake Kislo-Sladkoe (White Sea, Kandalaksha Bay)]. *Microbiol.* [Microbiol.]. 2014. Vol. 83, no. 1. P. 90–108. doi: 10.7868/S002636561401008X

Ngun C. T., Pleshakov E. V., Reshetnikov M. V., Kuznetsov V. V. Ispol'zovanie mikrobiologicheskikh pokazatelei v ekologo-pochvennom monitoringe goroda Mednogorska [The use of microbial indicators in environmental soil monitoring of the city of Mednogorsk]. *Izv. Sarat. un-ta. Ser. Nauki o Zemle* [Proceed. Saratov Univ. Ser. Earth Sci.]. 2014. Vol. 14, no. 1. P. 55–60.

Netrusov A. I., Kotova I. B. Mikrobiologiya [Microbiology]. Moscow: Akademiya, 2006. 352 p.

Prikaz Ministerstva sel'skogo khozyaistva Rossiiskoi Federatsii ot 13.12.2016 g. #552 "Ob utverzhenii normativov kachestva vody vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya" [Order of the Ministry of agriculture of the Russian Federation No. 552 dated 13.12.2016 On approval of water quality standards for fisheries water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fisheries water bodies]. Moscow: Minsel'khoz RF, 2016. 153 p.

RD 52.24.309–2016. Rukovodyashchii dokument. Organizatsiya i provedenie rezhimnykh nablyudenií za zagryazneniem poverkhnostnykh vod sushi [RD 52.24.309–2016. Guidance document. Organization and carrying out of routine observations of pollution of surface waters of the land]. Rostov-na-Donu: Roshydromet, 2016. 100 p.

Savichev A. S., Lunina O. N., Rusanov I. I., Zakharova E. E., Veslopolova E. F., Ivanov M. V. Mikrobiologicheskie i izotopno-geokhimitskie issledovaniya ozera Kislo-Sladkoe meromikticheskogo vodoema na poberezh'e Kandalakshskogo zaliva Belogo morya [Microbiological and isotopic geochemical investigation of Lake Kislo-Sladkoe, a meromictic water body at the Kandalaksha Bay Shore (White Sea)]. *Mikrobiol.* [Microbiol.]. 2014. Vol. 83, no. 2. P. 191–203. doi: 10.7868/S002636561401011X

Tokinova R. P., Sergeev A. S. O prichinakh massovoi gibeli ryby v ozere Komsomol'skoe (g. Kazan') [On the reasons for the mass death of fish in Lake Komsomolskoye (Kazan)]. *Chistaya voda. Kazan': Sb. trudov X Specializ. vystavki i Kongressa (Kazan')*, 17–19 oct. 2019 g.) [Pure Water. Kazan: Abs. X conf. and congress (Kazan, Oct. 17–19, 2019)]. Kazan, 2019. P. 119–122.

Zakharova Yu. R., Parfenova V. V. Metod kul'tivirovaniya mikroorganizmov, okislyayushchikh zhelezo i marganets v donnykh osadkakh oz. Baikal [The method of cultivation of microorganisms that oxidize iron and manganese in the bottom sediments of Lake Baikal]. *Izv. RAN. Ser. Biol.* [Biol. Bull. Russ. Acad. Sci.]. 2007. No. 3. P. 290–295.

Zvyagintsev D. G. Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimmii [Methods of soil microbiology and biochemistry]. Moscow: MGU, 1991. 304 p.

Adamovich B. V., Medvinsky A. B., Nikitina L. V., Radchikova N. P., Mikheeva T. M., Kovalevskaya R. Z., Veres Yu. K., Chakraborty A., Rusakov A. V., Nurieva N. I., Zhukova T. V. Relations between variations in the lake bacterioplankton abundance and the lake trophic state: Evidence from the 20-year monitoring. *Ecol. indicators*. 2019. Vol. 97. P. 120–129. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.09.049

Dolla A., Fournier M., Dermoun Z. Oxygen defense in sulfate-reducing bacteria. *J. Biotechnol.* 2006. Vol. 126, no. 1. P. 87–100. doi: 10.1016/j.jbiotec.2006.03.041

Engstrom D. R., Fritz S. C., Almendinger J. E., Juggins S. Chemical and biological trends during lake evolution in recently deglaciated terrain. *Nature*. 2000. Vol. 408. P. 161–166. doi: 10.1038/35041500

Grein F., Ramos A. R., Venceslau S. S., Pereira I. A. Unifying concepts in anaerobic respiration: insights from dissimilatory sulfur metabolism. *Biochim. Biophys. Acta*. 2013. Vol. 1827, no. 2. P. 145–160. doi: 10.1016/j.bbabi.2012.09.001

Kapler A., Newman D. K. Formation of Fe (III) – minerals by Fe (II) – oxidizing photoautotrophic bacteria. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2004. Vol. 68, no. 6. P. 1217–1226. doi: 10.1016/j.gca.2003.09.006

Kim B. H., Gadd G. M. Bacterial physiology and metabolism. New-York: Cambridge University Press, 2008. P. 408–481. doi: 10.1017/CBO9780511790461.013

Madigan M. T., Jung D. O. An overview of purple bacteria: systematic, physiology and habitat. Dordrecht: Springer Academic Publ., 2009. P. 1–15. doi: 10.1007/978-1-4020-8815-5_1

Morozova O. V., Ratushnyak A. A., Trushin M. V. Participation of planktonic and benthic bacteria in the polyphosphate-accumulating process in meso-

cosms contaminated with phosphate and nitrate. *World Appl. Sci. J.* 2012. Vol. 19, no. 1. P. 12–19. doi: 10.5829/idosi.wasj.2012.19.01.64182

Robertson L. A., Kuenen J. G. The Prokaryotes. New-York: Springer-Verlag, 2006. P. 985–1011. doi: 10.1007/0-387-30742-7_31

Smith V. H., Joe S. B., Howarth R. W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystem. *Lim-*

nol. Oceanogr. 2006. Vol. 51, no. 1. P. 351–355. doi: 10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0351

Smith V. H., Shindler D. W. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in ecology and evolution.* 2009. Vol. 24. P. 201–207. doi: 10.1016/j.tree.2008.11.009

Received October 14, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Морозова Ольга Владимировна

старший научный сотрудник лаб. гидробиологии, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Россия, 420087
эл. почта: oollggaa@mail.ru
тел.: +79869063753

Токинова Римма Петровна

заведующая лаб. гидробиологии, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Россия, 420087
эл. почта: r.token@rambler.ru

Иванов Дмитрий Владимирович

заместитель директора по научной работе, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Россия, 420087
эл. почта: water-rf@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Morozova, Olga

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauraskaya St., 420087 Kazan, Russia
e-mail: oollggaa@mail.ru
tel: +79869063753

Tokinova, Rimma

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauraskaya St., 420087 Kazan, Russia
e-mail: r.token@rambler.ru

Ivanov, Dmitry

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauraskaya St., 420087 Kazan, Russia
e-mail: water-rf@mail.ru