

## МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА БОЛЬШОЕ ГОЛУБОЕ (РЕСПУБЛИКА ТАТАРСТАН)

Исследовались микробные сообщества озера Большое Голубое (г. Казань). В результате притока сульфатных подземных вод в экосистеме озера развиваются микроорганизмы, участвующие в круговороте серы. В составе бактериопланктона и бактериобентоса количественно преобладают бесцветные серобактерии. Их высокая численность свидетельствует о важной роли в самоочищении гидросистемы от сероводорода. Донные отложения озера населены сульфатредукторами, численность которых значительно увеличивается с глубиной озера. Для защиты от окислительного стресса они формируют микробные консорциумы с железобактериями. По микробиологическим показателям вода озера характеризуется как «условно чистая». Состояние озера по шкале экологических модификаций оценивается в пределах нормы.

Ключевые слова: озеро Большое Голубое; бактериопланктон; бактериобентос; серобактерии; сульфатредукторы; железобактерии; олигокарбофилы; сапрофиты.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.3.13.20>

### Введение

Система Голубых озер расположена на территории государственного природного заказника регионального значения «Голубые озера» (Республика Татарстан) и включает три озера: Большое Голубое, Малое Голубое и Проточное. Озера имеют исключительную природоохранную значимость. Вода озер отличается высокой прозрачностью и необычным аквамариновым цветом, обусловленным мощным притоком холодных подземных вод, насыщенных сульфатами (Уникальные ..., 2001). Известно, что основную роль в круговороте серы в водоемах с повышенной нагрузкой по сульфатам и сульфидам играют биологические процессы, осуществляемые при участии сульфатредуцирующих и сероокисляющих бактерий (Lavrentyeva et al., 2019; Морозова и др., 2021). Сульфатредукторы используют сульфат в качестве акцептора электронов, восстанавливая его до сульфида, а бесцветные серобактерии окисляют восстановленные соединения серы кислородом или нитратом в качестве акцептора электронов, часто накапливая серу внутри или вне своих клеток (Muzyer et al., 2013). Пурпурные серобактерии могут также использовать сульфид, элементарную серу и тиосульфат в качестве доноров электронов при анаэробном фотосинтезе (Гриднева и др., 2009).

Ранее на Голубых озерах проводились исследования гидрохимического режима и гидробиологических сообществ (Уникальные ..., 2001; Ан-

дреева и др., 2017а, 2017б; Токинова и др., 2017; Токинова, Любарский, 2019). Однако, знания об основных диагностических группах микроорганизмов, участвующих в превращении соединений серы, остаются все еще недостаточными. Цель данного исследования – охарактеризовать микробные сообщества воды и донных отложений оз. Большое Голубое, сформировавшиеся в условиях притока сульфатно-кальциевых подземных вод.

### Материалы и методы исследования

Озеро Большое Голубое (N 55°54'24.52'', E 49°09'26.46'') имеет площадь 2.73 га и преимущественно небольшие глубины 1–3 м. Озеро образовано мощными родниками с дебитом от 240 до 690 л/с. Выход на поверхность восходящих напорных источников создает на дне углубления в форме воронок, наиболее глубокая из которых достигает глубины 15.7 м. Вода сульфатно-кальциевая, с повышенной минерализацией 2.3–2.5 мг/дм<sup>3</sup>. В зоне выхода подземных источников температура воды постоянна в течение всего года, 6–8°C. Донные отложения озера представлены темно-серыми и серыми илами, имеющими сапропелевидную консистенцию и запах сероводорода (Иванов и др., 2016; Токинова и др., 2017; Токинова, Любарский, 2019).

Отбор проб воды и донных отложений проводился в июне 2021 г. на 3-х станциях (ст. 1–3) в центральной и южной части оз. Большое Голубое

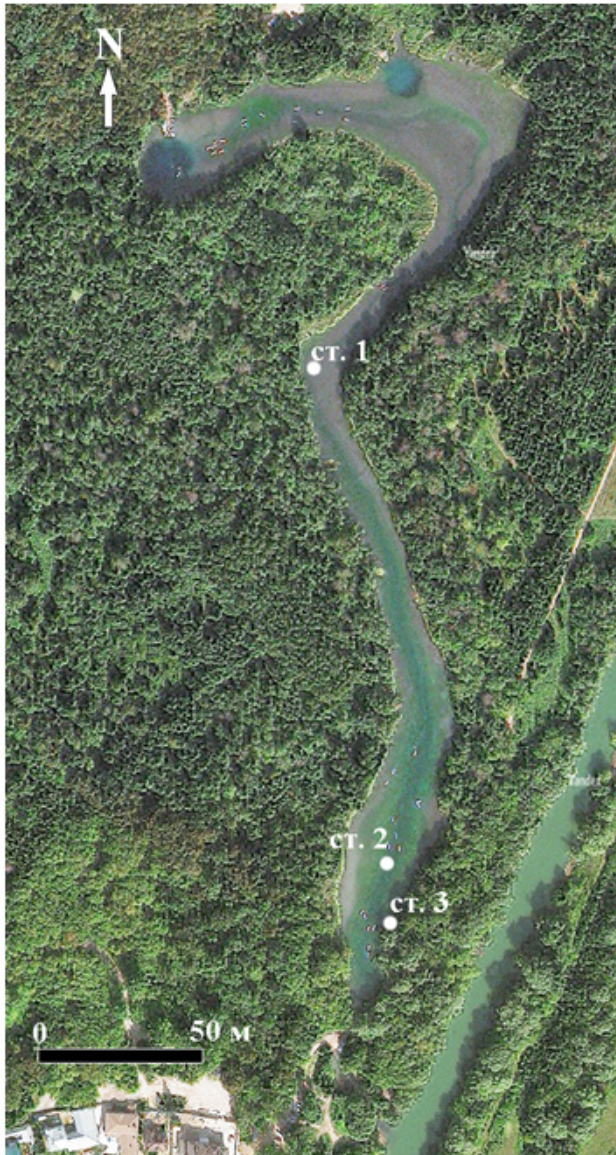


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб на оз. Большое Голубое  
 Fig.1. Lake Bolshoe Goluboe. Layout of sampling stations

(рис.1).

На ст. 1 глубина воды достигает 0.6 м, пробы бактериопланктона отобраны с поверхности. Ст. 2 – глубина 2.5–3 м, дно покрыто зарослями харовых водорослей, поверхностная и придонная пробы. Ст. 3, глубина 0.5–0.6 м, зона *Cladophora* sp. у берега озера, пробы взяты из скопления водорослевых талломов, образующих плавающие по поверхности маты, и в придонном слое под матами. Пробы донных отложений отобраны с помощью дночерпателя. Повторность отбора проб 3-х кратная. Одновременно проведен отбор проб воды на гидрохимический анализ.

Исследовались: общая численность бактерий, соотношение общей численности бактерий к количеству сапрофитов, численность сапрофитов, олигокарбофилов, железо- и марганцеокси-

люющих бактерий, а также индекс трофности как соотношение количества олигокарбофилов и сапрофитов. Для определения микроорганизмов, участвующих в круговороте серы, оценивали численность сульфатредукторов, пурпурных и бесцветных серобактерий.

Общее количество бактериопланктона и бактериобентоса определяли методом прямого счета на мембранных фильтрах «Владипор» (Кузнецов, Дубинина, 1989; Morozova et al., 2012). Остальные группы микроорганизмов определяли путем посева на селективные питательные среды.

Для определения олигокарбофильных бактерий использовали среду Горбенко, для учета сапрофитов – среду СПА (Кузнецов, Дубинина, 1989). Для выявления сульфатредукторов использовали модифицированную среду Баарса (Кузнецов, Дубинина, 1989; Морозова и др., 2021). Пурпурные сероокисляющие бактерии выращивали анаэробно при дневном освещении, на среде (Брянцева и др., 2010). Бесцветные сероокисляющие бактерии выращивали аэробно на среде (Брянцева и др., 2010). Присутствие сульфатов в среде определяли добавлением в диагностическую питательную среду 5% раствора  $\text{BaCl}_2$  в 2N HCl.

Учет гетеротрофных железобактерий и марганцеобактерий проводили на модифицированной среде (Захарова, Парфенова, 2007; Морозова и др., 2021). Учет автотрофных железобактерий производили на среде Лиске (Звягинцев, 1991).

Совместное культивирование железобактерий и сульфатредуцирующих бактерий проводили на диагностической среде Баарса. Для этого пробы воды и донных отложений инкубировали на среде Баарса при небольшом пространстве между пробкой и средой. После двух недель инкубации пробирки оценивались на присутствие оранжевого цвета в верхней части пробирки (гидроксида железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , образуемого железобактериями) и черного осадка в нижней части пробирки (сульфида железа  $\text{FeS}$ , образуемого сульфатредукторами).

Для определения наиболее вероятного числа микроорганизмов в пробах воды и грунта использовали таблицу Мак-Креди (Колешко, 1981).

Микробиологические анализы проб делали в трех повторностях. Посев на питательные среды проводили из двух соседних разведений. Статистическую обработку данных проводили с использованием программного пакета Microsoft Excel для Windows 10.

Степень загрязненности воды оценивалась по общей численности бактериопланктона, чис-

ленности сапрофитов и по их соотношению согласно классификации качества вод по гидробиологическим показателям Росгидромета (РД 52.24.309–2016), экологическое состояние водоема – по шкале экологических модификаций на основе показателей бактериобентоса (Дзюбан и др., 2005).

### Результаты и их обсуждение

По результатам гидрохимических исследований, в воде оз. Большое Голубое отмечены высокие концентрации сульфатов, кальция и магния (табл. 1). По величине общей жёсткости (34.5–35.0 °Ж) вода озера относится к очень жёсткой.

В поверхностных слоях воды на разных участках озера (ст. 1 и 2), свободных от плавающих матов кладофоры, изменения в основных химических показателях незначительны или отсутствуют. В толще водорослевого мата (ст. 3п) происходит заметное снижение концентрации сульфатов (в 1.4–1.7 раза) и железа (в 2.2–2.8 раза), отмечается увеличение содержания кислорода и снижение реакции среды до нейтральной.

Относительно поверхностных, изменения в придонных слоях воды имеют незначительные

отличия, за исключением зоны под матами водорослей (ст. 3д). Здесь наблюдается значительное возрастание концентрации сероводорода и сульфидов до сверхнормативных значений, обуславливающих их высокую токсичность для рыб, а также насыщение воздуха рядом с озером специфическим неприятным запахом.

Общее количество бактериопланктона в целом оставалось низким, незначительно изменяясь на разных участках озера и с глубиной (табл. 2).

При сравнении структурных показателей микробоценозов в зоне водорослевых матов отмечено повышение численности сапрофитов и снижение индекса трофности, что указывает на незначительное увеличение органики вследствие естественного отмирания водорослей.

В воде озера обнаружены бесцветные сероокисляющие бактерии. По сравнению с поверхностью в придонных слоях отмечено повышение численности бесцветных серобактерий, особенно выраженное в зоне зарослей харовых водорослей (ст. 2Д), где они составляли до 0.8% в общей численности бактериопланктона. В составе этой группы бактерий обнаружены клетки овальной или палочковидной формы, а также нитчатые

Таблица 1. Гидрохимические характеристики поверхностного (п) и придонного (д) слоев воды оз. Большое Голубое

Table 1. Hydrochemical indicators of surface (s) and bottom (b) water layers in Lake Bolshoe Goluboe

Показатели Indicators	Станции / Stations				
	1п / 1s	2п / 2s	2д / 2b	3п / 3s	3д / 3b
pH	7.9	7.9	7.9	7.3	7.3
O <sub>2</sub> раств., мг/дм <sup>3</sup> O <sub>2</sub> soluble, mg/dm <sup>3</sup>	6.2	6.0	7.7	14.2	5.1
ХПК, мг/дм <sup>3</sup> COD, mg/dm <sup>3</sup>	4.1	4.6	8.7	<4.0	5.2
БПК, мг/дм <sup>3</sup> BOD <sub>5</sub> , mg/dm <sup>3</sup>	<0.5	0.6	<0.5	0.9	<0.5
Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup> Sulfate, mg/dm <sup>3</sup>	1088	1323	680	765	1475
Гидрокарбонаты, мг/дм <sup>3</sup> Bicarbonate, mg/dm <sup>3</sup>	247	252	251	261	242
Железо общ., мг/дм <sup>3</sup> Iron total, mg/dm <sup>3</sup>	0.17	0.13	0.13	0.06	0.05
Сероводород и сульфиды, мг/дм <sup>3</sup> Hydrogen sulfide and sulfides, mg/dm <sup>3</sup>	0.02	0.06	0.06	<0.02	0.13
Жесткость, мг·экв/л Hardness, mg eq/l	34.5	34.5	35.0	34.8	34.8
Кальций, мг/дм <sup>3</sup> Calcium, mg/dm <sup>3</sup>	591	587	589	587	583
Магний, мг/дм <sup>3</sup> Magnesium, mg/dm <sup>3</sup>	61.3	63.8	67.7	66.4	68.9

Таблица 2. Характеристика различных диагностических групп микроорганизмов в составе бактериопланктона оз. Большое Голубое  
 Table 2. Different microorganisms' diagnostic groups in Lake Bolshoe Goluboe bacterioplankton

Показатели Indicators	Станции / Stations				
	1п / 1s	2п / 2s	2д / 2b	3п / 3s	3д / 3b
Общее количество бактериопланктона, 10 <sup>6</sup> кл/мл Bacterioplankton total number, 10 <sup>6</sup> cells/ml	0.82±0.02	0.72±0.01	0.74±0.00	0.71±0.02	0.86±0.04
Сапрофиты, кл/мл Saprophytes, cells/ml	27±4	35±7	52±2	94±3	117±10
Олигокарбофилы, кл/мл Oligocarbofiles, cells/ml	200±11	320±12	300±17	340±28	400±13
Индекс трофности Trophic index	7.4	9.1	5.7	3.6	3.4
Общее количество бактериопланктона /сапрофиты, 10 <sup>4</sup> Bacterioplankton total number /saprophytes, 10 <sup>4</sup>	3.0	2.0	1.4	0.7	0.7
Сульфатредукторы*, кл/мл Sulfate-reducing bacteria*, cells/ml	0	0.7	2.5	6.0	2.5
Пурпурные серобактерии*, кл/мл Purple sulfur bacteria*, cells/ml	0	0	1.3	6.0	2.5
Бесцветные серобактерии*, кл/мл Colorless sulfur bacteria*, cells/ml	25	25	6000	250	700
Автотрофные железокисляющие бактерии*, кл/мл Autotrophic iron-oxidizing bacteria, cells/ml	2.5	2.5	6.0	1.3	2.5

\* Наиболее вероятное число микроорганизмов  
 The most likely number of microorganisms

формы.

Пурпурные фотосинтезирующие сероокисляющие бактерии, предпочитающие развиваться на заросших участках водоемов, в микроаэрофильных условиях, обнаружены в зоне водорослевых матов кладофоры и в придонном слое среди зарослей хары. Присутствуют в единичных количествах, так как более значительному развитию этой группы бактерий препятствует присутствие в водной среде растворенного кислорода.

Сульфатредуцирующие бактерии, несмотря на высокие концентрации в воде сульфатов, обнаруживались в единичных количествах клеток. Развитию этой группы строго анаэробных бактерий, по-видимому, также могло препятствовать высокое содержание растворенного кислорода и малое количество органического вещества.

Общая численность бактериобентоса, количество сапрофитов, соотношение количества сапрофитов к общему числу бактерий были невысокими (табл. 3). Состояние донных отложений по шкале экологических модификаций находилось в пределах нормы. Количество сульфатредукторов превышало норму лишь в донных отложениях зоны харовых водорослей (ст. 2).

Вместе с тем, на ст. 2 отмечена очень высокая численность бесцветных серобактерий, способных окислять сероводород, продуцируемый суль-

фатредукторами (рис. 2).

Важную роль в круговороте железа и марганца в водоемах играют железо- и марганцеокисляющие бактерии. Массовое развитие этих бактерий сопровождается изменением цвета среды (вода или донные отложения приобретают охристую окраску) за счет выпадения окислов железа или марганца (Нетрусов, Котова, 2006). Обе группы присутствовали в донных отложениях озера. Были выделены нитчатые формы железобактерий, для которых характерно образование длинных скрученных нитей, покрытых гидроокисью железа, а также отдельные клетки, покрытые капсулами из гидроокиси железа. Установлено наличие комплексов между железокисляющими и сульфатредуцирующими бактериями (рис. 2). При инкубировании на диагностической питательной среде Баарса в пробирках в присутствии небольшого количества кислорода, происходило развитие не только сульфатредукторов, но и железокисляющих бактерий. Совместное обнаружение сульфатредукторов и железобактерий говорит о том, что эти микроорганизмы потенциально могут взаимодействовать друг с другом в своем микроокружении в водоеме.

Поскольку сульфатредукторы – строгие анаэробы, рост которых подавляется кислородом, то формирование комплексов с железобактериями

Таблица 3. Численность различных диагностических групп микроорганизмов в составе бактериобентоса оз. Большое Голубое  
Table 3. Different microorganisms' diagnostic groups in Lake Bolshoe Goluboe bacteriobenthos

Показатели Indicators	Станции / Stations		
	1	2	3
Общее количество бактериобентоса, 10 <sup>7</sup> кл/г Bacteriobenthos total number, 10 <sup>7</sup> cells/g sediments	7.45±0.1	7.05±0.3	4.30±0.2
Сапрофиты, 10 <sup>2</sup> кл/г Saprophytes, 10 <sup>2</sup> cells/g	4.2±0.1	26±1.7	10±0.8
Олигокарбофилы, 10 <sup>2</sup> кл/г Oligocarbofiles, 10 <sup>2</sup> cells/g	37±2.0	70±1.5	32±3.1
Индекс трофности Trophic index	8.8	2.7	3.2
Сапрофиты/очб, 10 <sup>-5</sup> Saprophytes/ tnb, 10 <sup>-5</sup>	0.5	3.0	2.0
Сульфатредукторы*, 10 <sup>2</sup> кл/г Sulfate-reducing bacteria*, 10 <sup>2</sup> cells/g	0.6	50	0.6
Пурпурные серобактерии*, 10 <sup>2</sup> кл/г Purple sulfur bacteria*, 10 <sup>2</sup> cells/g	0	0.025	0.6
Бесцветные серобактерии*, 10 <sup>2</sup> кл/г Colorless sulfur bacteria*, 10 <sup>2</sup> cells/g	13	110	13
Автотрофные железобактерии*, 10 <sup>2</sup> кл/г Autotrophic iron-oxidizing bacteria, 10 <sup>2</sup> cells/g	0.6	6.0	0.6
Гетеротрофные железо-/марганецооксилирующие бактерии, 10 <sup>2</sup> кл/г Heterotrophic iron-oxidizing bacteria / manganese-oxidizing bacteria, 10 <sup>2</sup> cells/g	1.5±0.2 /2.3±0.1	5.3±0.1 /2.6±0	2.3±0.1 /2.2±0.1

\* Наиболее вероятное число микроорганизмов  
The most likely number of microorganisms

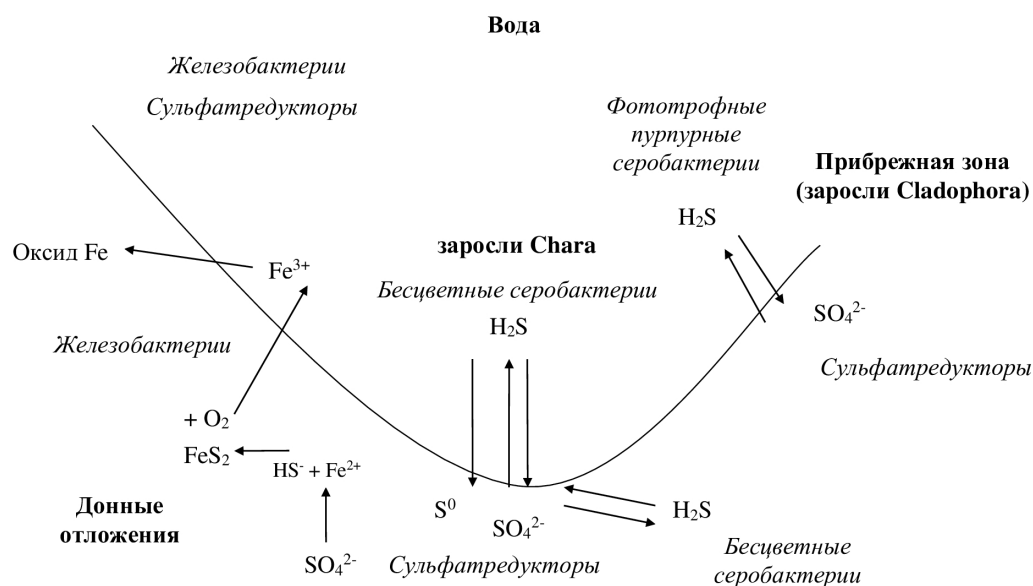


Рис. 2. Микробные сообщества, участвующие в круговороте серы в экосистеме оз. Большое Голубое  
Fig. 2. Groups of microorganisms involved in the sulfur circulation in the Lake Bolshoe Goluboe ecosystem

является одним из способов защиты от окислительных стрессов (Brooks, Field, 2021). Железобактерии активно поглощают кислород даже при низких его концентрациях, что способствует созданию анаэробных условий, благоприятных для роста сульфатредукторов. Последние поставляют субстрат для железобактерий, восстанавливая сульфаты до сульфидов. Сульфиды вступают в химические реакции с образованием двухвалентного железа, а железобактерии окисляют его до трехвалентного состояния. Процесс окисления двухвалентного железа в трехвалентное в природной воде происходит очень медленно, поэтому железобактерии очень важны для водоемов. Они поставляют трехвалентное железо, которое при взаимодействии с сероводородом образует гидрат сернистого железа – основной компонент лечебного ила.

В поверхностных и придонных слоях воды автотрофные железокисляющие бактерии обнаруживались в единичном числе клеток. Марганецокисляющие бактерии из водной толщи озера выделить не удалось.

Биоиндикация состояния озера по основным микробиологическим показателям позволяет оценить его воды как «условно чистые» согласно классификации Росгидромета. Это подтверждается и результатами ранее проведенных исследований бактериопланктона в оз. Большое Голубое (Андреева и др., 2017а). Согласно шкале экологических модификаций экологическое состояние озера также находится в пределах нормы. В большинстве проб воды и донных отложений количественно преобладают олигокарбофилы, что говорит о низком содержании органики в экосистеме озера.

### Заключение

В результате притока сульфатных подземных вод в экосистеме оз. Большое Голубое развиваются микробные сообщества, участвующие в круговороте серы. В их составе высока численность бесцветных серобактерий, окисляющих сероводород, что свидетельствует о важной роли серобактерий в процессе самоочищения водоема. Наиболее благоприятные условия для их роста создаются в донных отложениях и придонном слое воды в южной части озера среди зарослей харовых водорослей *Chara* sp. В донных отложениях этого участка также активно развиваются сульфатредукторы, для защиты от кислорода формирующие комплексы с железобактериями.

Низкая численность сульфатредукторов в воде озера обусловлена присутствием растворенного кислорода и малыми количествами органики.

В кислородных условиях эти бактерии не осуществляют процесс сульфатредукции. Вместе с тем, в воде исследованных участков озера отмечено присутствие сероводорода и сульфидов в сверхнормативных концентрациях, являющихся высокотоксичными для гидробионтов. Наиболее значительное их скопление зафиксировано в придонных слоях воды в зоне водорослевых матов *Cladophora* sp.

### Список литературы

1. Андреева М.Г., Буторова Л.Е., Любин П.А. Бактериопланктон и бактериобентос озера Большое Голубое (Татарстан) // Устойчивое развитие регионов: опыт, проблемы, перспективы / Материалы докл. междунар. конф. Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2017а. С. 3–7.
2. Андреева М.Г., Буторова Л.Е., Токинова Р.П. Сульфатредуцирующие бактерии Голубых озер Республики Татарстан // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации / Материалы докл. VI междунар. научно-практич. конф. Пенза: Наука и просвещение, 2017б. С. 23–26.
3. Брянцева И.А., Турова Т.П., Ковалева О.Л., Кострикина Н.А., Горленко В.М. Новая крупная алкалофильная пурпурная серобактерия *Ectothiorhodospira magna* sp. nov. // Микробиология. 2010. Т. 79, №6. С. 782–792.
4. Гриднева Е.В., Грабович М.Ю., Дубинина Г.А., Чернусова Е.Ю., Акимов В.Н. Экофизиология литотрофных сероокисляющих представителей рода *Sphaerotilus* – обитателей сульфидных источников Северного Кавказа // Микробиология. 2009. Т. 78, №1. С. 89–97.
5. 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.
6. Захарова Ю.Р., Парфенова В.В. Метод культивирования микроорганизмов, окисляющих железо и марганец в донных осадках оз. Байкал // Известия РАН. Серия Биологическая. 2007. №3. С. 290–295.
7. Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: МГУ, 1991. 304 с.
8. Иванов Д.В., Зиганшин И.И., Маланин В.В., Марасов А.А., Шамаев Д.Е., Рупова Э.Х. Характеристика донных отложений Голубых озер г. Казани // Российский журнал прикладной экологии. 2016. №3. С. 19–22.
9. Колешко О.И. Экология микроорганизмов почвы: Лабораторный практикум. Минск: Высшая школа, 1981. 176 с.
10. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.
11. Морозова О.В., Токинова Р.П., Иванов Д.В. Эколого-микробиологическая оценка качества воды озера Комсомольское в условиях урбанизации // Труды Карельского научного центра РАН, сер. Лимнология. 2021. №4. С. 119–133. DOI: 10.17076/lim1322.
12. Нетрусов А.И., Котова И.Б. Микробиология. М.: Изд. центр Академия, 2006. 352 с.
13. РД 52.24.309-2016. Руководящий документ. Организация и проведение режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши.
14. Токинова Р.П., Любарский Д.С. Флора и растительность солоноватых водоемов природного заказника «Голубые озера» (Среднее Поволжье) // Ботанический журнал. 2019. Т. 104, № 10. С. 1499–1513. DOI: 10.1134/S0006813619100119.
15. Токинова Р.П., Бердник С.В., Буторова Л.Е., Любар-

ский Д.С., Андреева М.Г., Абрамова К.И., Любин П.А. Бiorазнообразии Голубых озер Приказанья // Российский журнал прикладной экологии. 2017. №4. С. 16–20.

16. Уникальные экосистемы солоноватоводных карстовых озер Среднего Поволжья / Ред. А.Ф. Алимов, Н.М. Мингазова. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2001. 256 с.

17. Brooks C.N., Field E.K. Orange leads to black: evaluating the efficacy of co-culturing iron-oxidizing and sulfate-reducing bacteria to discern ecological relationships // Environmental microbiology reports. 2021. V. 19, №3. P. 317–324. DOI: 10.1111/1758-2229.12932.

18. Lavrentyeva E.V., Banzaraktsaeva T.G., Radnagurueva A.A., Buryukhaev S.P., Dambaev V.B., Baturina O.A., Kozyreva L.P., Barkhutova D.D. Microbial community of Umkhei Thermal Lake (Baikal Rift Zone) in groundwater discharge zone // Contemporary problems of ecology. 2019. V. 12. P. 584–593. DOI: 10.1134/S1995425519060088

19. 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 applied sciences journal. 2012. V. 19, №1. P. 12–19. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2012.19.01.64182.

20. Muyzer G., Kuenen J. G., Robertson L. Colorless sulfur bacteria // The Prokaryotes / Eds. E. Rosenberg, E.F. DeLong, S. Lory, E. Stackebrandt, F. Tompson. Heidelberg: Springer, 2013. P. 555–588.

## References

1. Andreeva M.G., Butorova L.E., Lyubin P.A. Bakterioplankton i bakteriobentos озера Bol'shoe Goluboe (Tatarstan) [Bacterioplankton and bacteriobentos of Bolshoe Goluboe lake (Tatarstan)] // Ustojchivoe razvitiye regionov: opyt, problemy, perspektivy [Sustainable development of regions: experience, problems, prospects] / Materialy dokl. mezhdunar. konf. Kazan': AN RT, 2017a. P. 3–7.

2. Andreeva M.G., Butorova L.E., Tokinova R.P. Sul'fatredytsiruyushchie bakterii Golubyyh ozer Respubliki Tatarstan [Sulfate-reducing bacteria of the Blue Lakes of the Republic of Tatarstan] // Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii [Fundamental and applied scientific research: current problems, achievements and innovations] / Materialy dokl. VI Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2017b. P. 23–26.

3. 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] // Mikrobiologiya [Microbiology in Russian]. 2010. Vol. 79, No 6. P. 780–790.

4. Gridneva E.V., Grabovich M.YU., Dubinina G.A., Chernousova E.YU., Akimov V.N. Ekofiziologiya litotrofnyyh serookislyayushchih predstavitelej roda *Sphaerotilus* – obitatelej sul'fidnyh istochnikov Severnogo Kavkaza [Ecophysiology of lithotrophic sulfur-oxidizing representatives of the genus *Sphaerotilus* – inhabitants of sulfide sources of the North Caucasus] // Mikrobiologiya [Microbiology]. 2009. Vol. 78, No 1. P. 89–97.

5. Dzuban A.N., Kosolapov D.B., Kuznecova B.B. Mikrobiologicheskie processy v donnyh otlozheniyah Rybinskogo vodohranilishcha i озера Pleshechevo kak faktory formirovaniya kachestva vodnoj sredy [Microbiological processes in bottom sediments of Rybinsk reservoir and Pleshechevo Lake as factors in formation of the quality of aquatic environment] // Gidrobiologicheskij zhurnal [Hydrobiological journal]. 2005. Vol. 41, No 4. P. 82–88.

6. Zaharova Yu.R., Parfenova V.V. Metod kull'tivirovaniya mikroorganizmov, oksislyayushchih zhelezo i marganec v donnyh osadkah oz. Bajkal [The method of cultivation of microorganisms that oxidize iron and manganese in the bottom sediments of Baikal Lake] // Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya [Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences]. 2007. No 3. P. 290–295.

7. Zvyagincev D.G. Metody pochvennoj mikrobiologii i biokhimi [Methods of soil microbiology and biochemistry]. Moscow: Moscow state university, 1991. 304 p.

8. Ivanov D.V., Ziganshin I.I., Malanin V.V., Marasov A.A., SHamaev D.E., Rupova E.H. Harakteristika donnyh otlozhenij Golubyyh ozer g. Kazani [Characteristics of bottom sediments of Blue lakes of Kazan] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian Journal of Applied Ecology]. 2016. No 3. P. 19–22.

9. Koleshko O.I. Ekologiya mikroorganizmov pochvy: Laboratornyj praktikum [Ecology of microorganisms of soil: Laboratory practice]. Minsk: Vysshaya shkola, 1981. 175 p.

10. Kuznecov S.I., Dubinina G.A. Metody izucheniya vodnyh mikroorganizmov [Methods of investigation of water microorganisms]. Moscow: Nauka, 1989. 288 p.

11. Morozova O.V., Tokinova R.P., Ivanov D.V. Ekologo-mikrobiologicheskaya ocenka kachestva vody озера Komsomol'skoe v usloviyah urbanizatsii [Ecological and microbiological assessment of Lake Komsomolskoye water quality under urbanization] // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN, ser. Limnologiya [Proceedings of the Karelian scientific center of the Russian Academy of Sciences, ser. Limnology]. 2021. No 4. P. 119–133. DOI: 10.17076/lim1322.

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

13. RD 52.24.309-2016. Rukovodnyashchij dokument. Organizatsiya i provedenie rezhimnyh nablyudenij za zagryazneniem poverhnostnyh vod sushi [Guidance document. Organization and conduct of monitoring observations of pollution of water land.].

14. Tokinova R.P., Lyubarsky D.S. Flora i rastitel'nost' solonovatyh vodoemov prirodnoho zakaznika «Golubye озера» (Srednee Povolzh'e) [Flora and vegetation of brackish reservoirs of the Nature Reserve “Golubye озера” (Middle Volga region)] // Botanicheskij zhurnal [Botanical journal]. 2019. Vol. 104, No 10. P. 1499–1513. DOI: 10.1134/S0006813619100119.

15. Tokinova R.P., Berdnik S.V., Butorova L.E., Lyubarskiy D.S., Andreeva M.G., Abramova K.I., Lyubin P.A. Bioraznoolbrazie Golubyyh ozer Prikazan'ya [Biodiversity of the Golubye lakes of Kazan] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2017. No 4. P. 16–20.

16. Unikal'nye ekosistemy solonovатовodnyh karstovyh ozer Srednego Povolzh'ya [Unique ecosystems of brackish-water karst lakes of the Middle Volga region] / Red. A.F. Alimov, N.M. Mingazova. Kazan': Kazan university, 2001. 256 p.

17. Brooks C.N., Field E.K. Orange leads to black: evaluating the efficacy of co-culturing iron-oxidizing and sulfate-reducing bacteria to discern ecological relationships // Environmental microbiology reports. 2021. Vol. 19, No 3. P. 317–324. DOI: 10.1111/1758-2229.12932.

18. Lavrentyeva E.V., Banzaraktsaeva T.G., Radnagurueva A.A., Buryukhaev S.P., Dambaev V.B., Baturina O.A., Kozyreva L.P., Barkhutova D.D. Microbial community of Umkhei Thermal Lake (Baikal Rift Zone) in groundwater discharge zone // Contemporary problems of ecology. 2019. Vol. 12. P. 584–593. DOI: 10.1134/S1995425519060088.

19. 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 applied sciences journal. 2012. Vol. 19, No 1. P. 12–19. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2012.19.01.64182.

20. Muyzer G., Kuenen J. G., Robertson L. Colorless sulfur

bacteria // The Prokaryotes / Eds. E. Rosenberg, E.F. DeLong, S. Lory, E. Stackebrandt, F. Tompson. Heidelberg: Springer, 2013. P. 555–588.

---

Morozova O.V., Tokinova R.P., Lyubarsky D.S.  
**Microbial communities of water and sediments of Bolshoe Goluboe Lake (the Republic of Tatarstan).**

The microbial communities of the Lake Bolshoe Goluboe hydroecosystem (Kazan, RT) were studied. As a result of sulfate groundwater influx, microorganisms involved in the sulfur cycle develop in the lake hydroecosystem. The colorless sulfur bacteria predominate quantitatively in bacterioplankton and

bacteriobenthos. The high abundance of this bacterial group indicates its important role in hydroecosystem self-purification from the hydrogen sulfide. The lake bottom sediments are inhabited by sulfate-reducing bacteria, their number increases significantly with the depth of the lake. To protect against oxidative stress, sulfate-reducing bacteria form microbial consortia with iron-oxidizing bacteria. According to microbiological indicators, the lake water is characterized as «conditionally clean». The state of the lake according to the scale of ecological modifications is estimated within the normal range.

*Keywords:* Bolshoe Goluboe lake; bacterioplankton; bacteriobenthos; sulfur bacteria; sulfate-reducing bacteria; iron-oxidizing bacteria; oligocarbo- philes; saprophytes.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

**Информация о статье / Information about the article**

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 06.05.2022

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 30.05.2022

Принята к публикации / Accepted for publication: 15.06.2022

**Информация об авторах**

Морозова Ольга Владимировна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: oollggaa@mail.ru.

Токинова Римма Петровна, кандидат биологических наук, зав. лабораторией, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: r.tokin@rambler.ru

Любарский Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: lds57@mail.ru

**Information about the authors**

Olga V. Morozova, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: oollggaa@mail.ru.

Rimma P. Tokinova, Ph.D. in Biology, Head of Laboratory, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: r.tokin@rambler.ru.

Dmitrii S. Lyubarsky, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: lds57@mail.ru