



Серия «Биология. Экология»
2024, Т. 49, С. 19–32
Онлайн-доступ к журналу:
<http://izvestiabio.isu.ru/ru>

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского
государственного
университета

Научная статья

УДК 556:504.455

<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2024.49.19>

Оценка трофического статуса прибрежных вод западной части озера Байкал по гидрохимическим показателям

Е. В. Елецкая, О. А. Тимошкин, И. В. Томберг*

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия
E-mail: lilitanna@lin.irk.ru

Аннотация. Представлены результаты оценки экологического состояния вод прибрежной (приурезовой) зоны вдоль западного побережья оз. Байкал от пос. Листвянка до м. Ижимей на о. Ольхон в 2020–2021 гг. Охарактеризован трофический статус вод на основании гидрохимических показателей (содержание соединений азота и фосфора). Проанализирована концентрация общего азота и фосфора и их минеральных форм, а также их соотношение в разные месяцы периода открытой воды на участках с различной антропогенной нагрузкой.

Ключевые слова: озеро Байкал, минеральный фосфор, минеральный азот, общий азот, общий фосфор, трофический статус.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзаданий Лимнологического института СО РАН 0279-2021-0007, 0279-2021-0014.

Для цитирования: Елецкая Е. В., Тимошкин О. А., Томберг И. В. Оценка трофического статуса прибрежных вод западной части озера Байкал по гидрохимическим показателям // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2024. Т. 49. С. 19–32. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2024.49.19>

Research article

Assessment of Trophic Status of the Coastal Waters of the Western Part of Lake Baikal According to Hydrochemical Indicators

E. V. Eletskaia, O. A. Timoshkin, I. V. Tomberg*

Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. According to long-term studies of the pelagial zone, Baikal waters are oligotrophic, while the coastal zone undergoes a significant anthropogenic load, which worsens its ecological state. In the last decade serious changes have been observed here, which are characterized as crisis: there is a massive development of benthic algae, both typical and not typical for Baikal species, blooming of blue-green algae, oppression and even death of Baikal sponges. It is assumed that the main cause of these phenomena is the increase of nitrogen and phosphorus compounds in the coastal zone as a result of uncontrolled development of tourist business, primarily, construction of numerous tourist resorts and hotels without wastewater collection and treatment systems in the water protection zone

© Елецкая Е. В., Тимошкин О. А., Томберг И. В., 2024

*Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

and multiplied number of units of the fleet servicing the industry. Chemical composition of the near-shore waters of the western part of the Lake Baikal (from the Listvyanka Settl. to Cape Izhimey) was performed to assess the ecological state of the coastal zone in 2020-2021. Water samples were collected twice a year in June and September 2020 and 2021 from the surface at a distance of 1 m from the shoreline at nine stations, with a total of 34 samples collected. The trophic status of the coastal waters of the studied area of the lake was determined based on the data of total nitrogen and phosphorus content, including their mineral forms. It was found that the waters should mainly be identified as mesotrophic according to the total phosphorus content. The total phosphorus content in the coastal water of Listvyanka, Khuzhir Settlements in June, as well as of B. Koty in September 2020 correspond to the values typical for the eutrophic reservoirs. According to the content of total and mineral nitrogen, as well as phosphate phosphorus, the waters of most studied areas were identified as oligotrophic ones. It is shown that organic forms of nitrogen and phosphorus dominate over mineral ones in the coastal waters of the western part of the lake.

Keywords: Lake Baikal, mineral phosphorus, mineral nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, trophic status.

For citation: Eletsckaya E. V., Timoshkin O. A., Tomberg I. V. Assessment of Trophic Status of the Coastal Waters of the Western Part of Lake Baikal According to Hydrochemical Indicators. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2024, vol. 49, pp. 19-32. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2024.49.19> (in Russian)

Введение

Озеро Байкал – один из самых удивительных географических объектов нашей планеты. Оно является крупнейшим природным резервуаром пресной воды (более 20 % мирового запаса), в котором обитает более 2640 видов животных и более 1000 видов растений; около 70 % первых эндемичны для озера и не встречаются нигде больше на Земле [Тимошкин, 2009]. Сохранение этого уникального озера является важнейшей научной и практической задачей не только для России, но и для всего мирового сообщества.

Известно, что воды пресных озёр, расположенных в зонах умеренного климата, имеют обычно низкое содержание биогенных элементов, что связано с незначительным их содержанием в почвах, ограниченностью поступления в холодный сезон и наличием растительности, которая способствует их потреблению и удержанию. Однако избыточное поступление питательных веществ из антропогенных источников может привести к эвтрофированию вод, когда происходит бурный рост водных растений и «цветение» фитопланктона. Вызванное ростом биомассы увеличение содержания органического вещества в воде обуславливает изменение численности и разнообразия бактерий (в том числе продуцентов токсинов), использующих органику в качестве источника питания [Розумная, 2011; Токсичные цианобактерии ... , 2013].

Главными агентами эвтрофирования водоёмов выступают соединения азота и фосфора [Aslan, Kapdan, 2006; Гашкина, Моисеенко, Кремлева, 2012; Мальфанов, Вахрушева, Тренина, 2017; Groundwater contamination ... , 2018]. Эти элементы играют ключевую роль в физиологии растительной и животной жизни водоёмов, так как необходимы для роста и развития, а также для поддержания жизненных процессов в организмах. В настоящее время накоплен уже достаточно большой опыт в изучении явления эвтрофирования водоёмов [Zdanowski, 1982; Henderson-Sellers, Markland, 1987; Nixon, 1995; Цветкова, Басова, 1998; Науменко, 2007; Mechanism and assessment ... , 2008;

Frumin, Gildeeva, 2015; Жидкова, Гусакова, 2017]. Исследования показали, что «цветение» воды обычно становится возможным, когда содержание азота превышает 0,4 мг/л, а фосфора – 0,01 мг/л, поэтому изучение динамики этих компонентов и изменений соотношений различных их форм позволяет оценить экологическое состояние водоёма [Неверова-Дзиопак, 2020].

Согласно данным многолетних исследований пелагиали воды Байкала являются олиготрофными [Current chemical composition ... , 2017], прибрежная же зона претерпевает значительную антропогенную нагрузку, что ухудшает её экологическое состояние. В последнее десятилетие здесь отмечаются серьёзные изменения, которые характеризуются как кризисные: наблюдается массовое развитие бентосных водорослей как типичных, так и не характерных для Байкала видов, цветение сине-зелёных водорослей, угнетение и даже гибель байкальских губок [Nearshore benthic blooms ... , 2014; Rapid ecological change ... , 2016; *Dolichospermum lemmermannii* (Nostocales) ... , 2021]. Предполагается, что основная причина этих явлений – увеличение поступления в прибрежную зону соединений азота и фосфора в результате бесконтрольного развития туристического бизнеса, в первую очередь строительства в водоохранной зоне многочисленных не имеющих систем сбора и очистки сточных вод турбаз и отелей и увеличившееся в разы число единиц обслуживающего индустрию флота [Current chemical composition ... , 2017; Eletskaaya, Tomberg, 2020].

Цель настоящей работы – оценить современный трофический статус прибрежных вод западного побережья оз. Байкал по содержанию соединений азота и фосфора.

Материалы и методы

Исследования химического состава воды приурезовой зоны западной части оз. Байкал (рис. 1) проводились в контексте общей оценки экологического состояния прибрежной зоны водоёма. Пробы воды отбирали дважды в год в июне и сентябре 2020 и 2021 гг. с поверхности на удалении 1 м от береговой линии на девяти станциях, всего собраны 34 образца. Пробы проанализированы на содержание общего и минерального (нитраты, нитриты и ионы аммония) азота, а также общего и минерального (фосфаты) фосфора. Химический анализ выполняли на базе аккредитованной Лаборатории гидрохимии и химии атмосферы с использованием общепринятых в гидрохимии пресных вод методов¹. Концентрации биогенных элементов измеряли на спектрофотометре UNICO-2100 (United Products & Instruments, США): нитриты с реактивом Грисса, нитраты с салициловокислым натрием, аммонийный азот – индофенольным методом, фосфаты – методом Дениже – Аткинса

¹ РД 52.24.383-2005. Массовая концентрация аммиака и ионов аммония в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом в виде индофенолового синего. Ростов-на-Дону, 2005. 32 с.; РД Массовая концентрация общего азота в водах. Методика измерений спектрофотометрическим методом с минерализацией проб в термореакторе. Ростов-на-Дону, 2016. 34 с.; ГОСТ 33045-2014. Вода. Методы определения азотсодержащих веществ. М. : Стандартинформ, 2019. 31 с.; ГОСТ 18309-2014. Вода. Методы определения фосфорсодержащих веществ. М. : Стандартинформ, 2015. 25 с.; Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 1. Ростов-на-Дону : НОК, 2009. 1045 с.

с хлористым оловом в качестве восстановителя. Содержания общего фосфора и азота измерялись после персульфатного окисления до минеральных форм. Органические формы элементов были рассчитаны по разнице между общим содержанием и их минеральной частью.

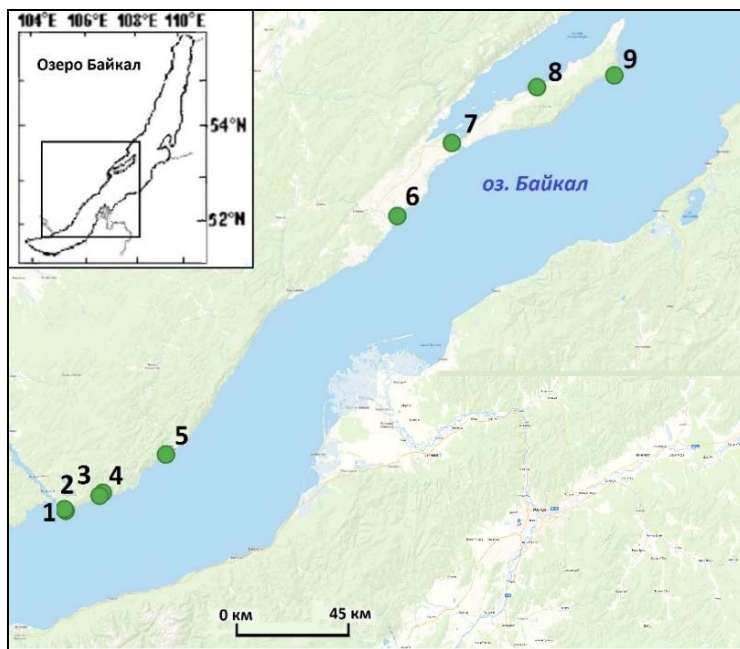


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб воды в приузловой зоне западной части оз. Байкал в 2020–2021 гг.: 1 – зал. Лиственичный, напротив пос. Листвянка, станция «Почта»; 2 – зал. Лиственичный, напротив пос. Листвянка, станция «Нерпинарий»; 3 – бух. Бол. Коты, напротив пос. Бол. Коты, станция «Жилище»; 4 – бух. Бол. Коты, напротив пос. Бол. Коты, станция «Гаммарус»; 5 – напротив пос. Бол. Голоустное; 6 – бух. Ая; 7 – зал. Базарный, напротив пос. Сахюрта; 8 – зал. Хужирский, напротив пос. Хужир; 9 – м. Ижимей

Результаты и обсуждение

В работе использованы давно разработанные и широко применяемые в современной практике критерии оценки трофического статуса водоёмов, базирующиеся на концентрациях соединений азота и фосфора (табл. 1).

Анализ полученных данных о содержании биогенных элементов в прибрежной воде оз. Байкал в период открытой воды в 2020–2021 гг. показал, что содержание минерального фосфора ($P-PO_4$) в прибрежной воде озера в течение всего периода исследований было низким и в основном не превышало 0,010 мг/л (табл. 2–5), что соответствует значениям, установленным для олиготрофных водоёмов (см. табл. 1). Исключение составила проба прибрежной воды в черте пос. Листвянка (станция «Нерпинарий»), где в июне 2020 г. его концентрация достигла 0,017 мг/л, что соответствует мезотрофному типу.

Таблица 1

Признаки распознавания трофности водных экосистем
[по: Многокритериальная оценка экологического ... , 1997; Неверова-Дзюпак, 2020]

Критерий мг/л	Уровень трофии		
	Олиготрофный	Мезотрофный	Эвтрофный
P-PO ₄ ³⁻	< 0,01	0,01–0,02	> 0,02
P _{общ}	0,005–0,010	0,01–0,03	0,03–0,10
N _{мин}	0,2–0, 4	0,40–0,65	0,65–1,5
N _{общ}	< 0,4	0,40–0,60	0,6–1,5

Азот в воде оз. Байкал представлен аммонийной, нитритной, нитратной формами, а также присутствует в виде органических соединений. В минеральной части (N_{мин}) для озера характерно преобладание нитратной формы, нитритный и аммонийный азот обычно регистрируются в прибрежных водах в незначительных концентрациях, и их повышение на отдельных станциях может служить сигналом антропогенного загрязнения. Содержание аммонийного азота в воде в период исследования варьировало от следовых значений до 0,022 мг/л. Максимальное содержание регистрировали в прибрежных водах напротив пос. Хужир. Концентрация нитритного азота не превышала 0,009 мг/л, максимальное значение отмечено в бух. Ая (см. табл. 2–5). Концентрации нитратного азота изменялись от 0,01 до 0,29 мг/л, максимальные значения наблюдались напротив пос. Листвянка (станции «Почта», «Нерпинарий»).

Содержание N_{мин} (рассчитано по сумме концентраций аммонийной, нитритной, нитратной форм) в прибрежных водах на исследуемых станциях не превышало значений, характерных для олиготрофных озёр (см. табл. 1–5). Максимальные концентрации были отмечены в июне 2021 г. напротив посёлков Листвянка (обе станции) и Бол. Голоустное и составляли 0,29 мг/л, 0,30 мг/л, 0,28 мг/л соответственно (см. табл. 4). Вероятно, наблюдаемые максимумы были обусловлены поступлением азота (в основном нитратной формы) с водами впадающих в озеро на этих участках притоков. Так, в воде впадающих в зал. Лиственичный в пределах одноимённого поселка ручьёв Мал. Черемшанка (станция «Почта», расположенная в 50 м южнее устья ручья) и Бол. Черемшанка (станция «Нерпинарий» в 50 м южнее устья ручья) содержание нитратного азота в июне в разные годы варьировало от 4,49 до 10,43 мг/л, а содержание в воде озера близ точек их впадения при этом изменялось от 0,40 до 0,91 мг/л [Антропогенные изменения ... , 2019], что согласуется с полученными нами данными. Высокое содержание азота в речных водах связано в первую очередь с антропогенной нагрузкой в бассейнах этих водотоков, а их повышенная водность в первой половине июня обусловила достаточно большую площадь, на которой регистрируется влияние речных вод на прибрежную зону озера.

Таблица 2

Содержание биогенных веществ (мг/л)
в прибрежных водах в западной части оз. Байкал в июне 2020 г.

Компонент	Станции отбора								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N-NH ₄ ⁺	< 0,001	< 0,001	0,003	0,003	0,004	0,001	0,001	0,022	0,008
N-NO ₂ ⁻	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001	0,002	0,001
N-NO ₃ ⁻	0,05	0,09	0,04	0,06	0,02	0,01	0,01	0,10	0,05
N _{мин}	0,05	0,09	0,05	0,06	0,03	0,01	0,02	0,13	0,06
N _{орг}	0,07	0,19	0,81	0,13	0,12	0,13	0,10	0,40	0,12
N _{общ}	0,13	0,28	0,86	0,19	0,15	0,14	0,11	0,53	0,18
P-PO ₄ ³⁻	0,004	0,017	0,001	0,005	0,001	0,003	0,003	0,002	0,008
P _{орг}	0,007	0,030	0,013	0,027	0,019	0,025	0,015	0,031	0,008
P _{общ}	0,011	0,047	0,014	0,032	0,021	0,028	0,018	0,033	0,015

Таблица 3

Содержание биогенных веществ (мг/л)
в прибрежных водах в западной части оз. Байкал в сентябре 2020 г.

Компо- нент	Станции отбора								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N-NH ₄ ⁺	–	0,002	0,006	0,013	0,008	0,005	0,009	0,004	–
N-NO ₂ ⁻	–	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,009	< 0,001	0,001	–
N-NO ₃ ⁻	–	0,06	0,03	0,03	0,05	0,04	0,01	0,022	–
N _{мин}	–	0,06	0,04	0,04	0,06	0,05	0,02	0,03	–
N _{орг}	–	0,12	0,06	0,09	0,09	0,12	0,11	0,16	–
N _{общ}	–	0,18	0,10	0,13	0,15	0,18	0,12	0,18	–
P-PO ₄ ³⁻	–	< 0,001	0,005	0,002	0,003	0,006	0,002	0,002	–
P _{орг}	–	0,011	0,004	0,005	0,027	0,011	0,008	0,006	–
P _{общ}	–	0,011	0,009	0,007	0,030	0,017	0,009	0,008	–

Таблица 4

Содержание биогенных веществ (мг/л)
в прибрежных водах в западной части оз. Байкал в июне 2021 г.

Компонент	Станции отбора								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N-NH ₄ ⁺	0,001	0,002	0,004	0,005	0,003	< 0,001	0,002	0,003	0,006
N-NO ₂ ⁻	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
N-NO ₃ ⁻	0,29	0,29	0,02	0,04	0,28	0,05	0,03	0,04	0,06
N _{мин}	0,30	0,29	0,02	0,05	0,28	0,05	0,03	0,05	0,07
N _{орг}	0,11	0,16	0,12	0,09	0,13	0,13	0,16	0,16	0,05
N _{общ}	0,41	0,45	0,14	0,13	0,41	0,18	0,19	0,20	0,10
P-PO ₄ ³⁻	0,002	0,005	0,005	0,008	0,004	0,003	0,002	0,002	0,003
P _{орг}	0,014	0,011	0,006	0,002	0,006	0,011	0,013	0,015	0,010
P _{общ}	0,017	0,016	0,011	0,010	0,010	0,014	0,015	0,017	0,013

Таблица 5

Содержание биогенных веществ (мг/л)
в прибрежных водах в западной части оз. Байкал в сентябре 2021 г.

Компонент	Станции отбора								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N-NH ₄ ⁺	0,003	0,002	0,003	0,016	< 0,001	0,003	< 0,001	0,003	0,006
N-NO ₂ ⁻	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	< 0,001	0,001	0,001
N-NO ₃ ⁻	0,04	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,016	0,012	0,02
N _{мин}	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
N _{орг}	0,26	0,14	0,08	0,15	0,18	0,13	0,18	0,08	0,11
N _{общ}	0,21	0,18	0,10	0,18	0,21	0,15	0,20	0,09	0,14
P-PO ₄ ³⁻	< 0,001	< 0,001	0,006	0,003	0,004	0,001	0,006	0,001	< 0,001
P _{орг}	0,011	0,016	0,021	0,004	0,014	0,015	0,025	0,010	0,009
P _{общ}	0,011	0,016	0,027	0,008	0,019	0,016	0,031	0,011	0,009

Исследования показали, что по содержанию общего азота воды большинства районов запада Байкала относятся к олиготрофному типу (рис. 2). Исключения составляют пробы, отобранные напротив посёлков Хужир в июне 2020 г., Листвянка (обе станции) и Бол. Голоустное в июне 2021 г., в которых содержание N_{общ} соответствовало значениям, характерным для мезотрофных водоёмов. Максимум был отмечен в прибрежной воде напротив пос. Бол. Коты (станция «Жилище») в июне 2020 г. и составил 0,86 мг/л, что соответствует эвтрофному типу.

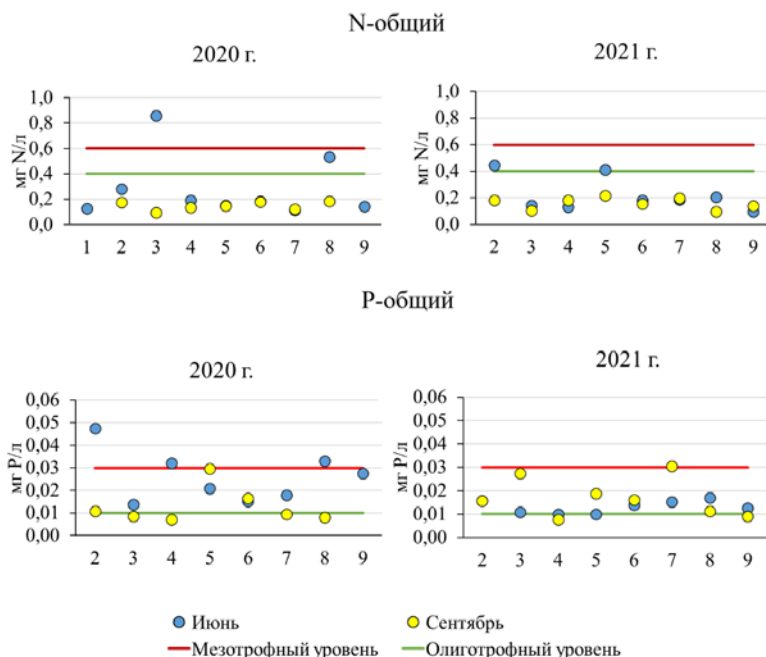


Рис. 2. Содержание общего азота и общего фосфора в прибрежных водах западной части оз. Байкал (по данным 2020–2021 гг.)

Близкие уровни концентраций общего азота отмечали в летний период 2019 г. в прибрежной воде юго-восточной части оз. Байкал [Afonina, 2021]. Максимальные значения регистрировали в воде у пос. Култук в июне (0,90 мг/л), что характеризует прибрежные воды как эвтрофные. Концентрации $N_{\text{общ}}$ в водах побережья напротив посёлков Солзан (июнь), Култук и г. Слюдянки (август) соответствовали мезотрофному типу, а прибрежные воды в районе г. Байкальска, посёлков Мангутай, Утулик, Мурино, Паньковка 2 и Новоснежная в этот период относились к олиготрофному типу [Afonina, 2021]. Согласно результатам исследований, проведённых в районе пос. Бол. Коты в 2020–2021 гг., по среднемесячному содержанию общего азота в июне воды литоральной зоны относились к мезотрофным [Assessment of the current ... , 2023].

Результаты анализа содержания общего фосфора показали, что в большинстве районов западного побережья его концентрации в прибрежных водах соответствовали значениям, характерным для мезотрофного водоёма (см. рис. 2). Исключения составили пробы воды, отобранные напротив посёлков Листвянка (станция «Нерпинарий»), Бол. Коты (станция «Гаммарус»), Хужир, где в июне 2020 г. качество воды снижалось до эвтрофного.

Ранее нами был проведён анализ трофического статуса приустьевых вод юго-восточной части оз. Байкал, который показал, что по содержанию $P_{\text{общ}}$ в летний период они в основном также относятся к мезотрофному типу [Eletskaaya, Tomberg, 2020]. Повышение до эвтрофных значений отмечено только в июле в водах в районах г. Слюдянки, посёлков Энхалук и Максимиха.

Для вод Байкала характерно низкое содержание органических форм азота и фосфора. Анализ литературных данных показал постепенное увеличение содержания доли этих форм в общем составе. Так, в 1969 г. в водах пелагиали южной части озера средневзвешенная концентрация $N_{\text{орг}}$ составляла 0,08 мг/л, что соответствует 47 % от его общего содержания, в 1989 г. концентрация его была 0,10 мг/л, а доля в общем содержании – 55 %. Средневзвешенная концентрация $P_{\text{орг}}$ в 1969 г. составляла 0,004 мг/л (27 %), а в 1986 г. – 0,009 мг/л, что составило 47 % от общего содержания фосфора [Вотинцев, 1975; Тарасова, 1998]. В настоящее время в летний период в прибрежной воде большинства исследуемых районов органические формы азота и фосфора преобладают над минеральными (рис. 3, 4). Максимальное значение содержания органического азота составило 0,81 мг/л напротив пос. Бол. Коты (станция «Жилище») в июне 2020 г. (95 % от $N_{\text{общ}}$). Максимальное содержание органического фосфора было отмечено тогда же напротив пос. Хужир и составило 0,031 мг/л (94 % от $P_{\text{общ}}$).

Анализ полученных данных показал, что в 2020 г. доля минерального азота в прибрежной воде не превышала 40 %, при этом напротив пос. Бол. Коты (станция «Жилище») и в бух. Ая в июне эта величина составила лишь 5 % от общего содержания N (см. рис. 3). В июне 2021 г. доля $N_{\text{мин}}$ достигала 73 %, а в сентябре не превышала 25 % от общего содержания. Вероятно, снижение концентраций минеральных форм азота и увеличение содержания органического азота в сентябре по сравнению с июнем могут быть обусловлены потреблением минеральных форм водными растениями и фитопланктоном в летний период.

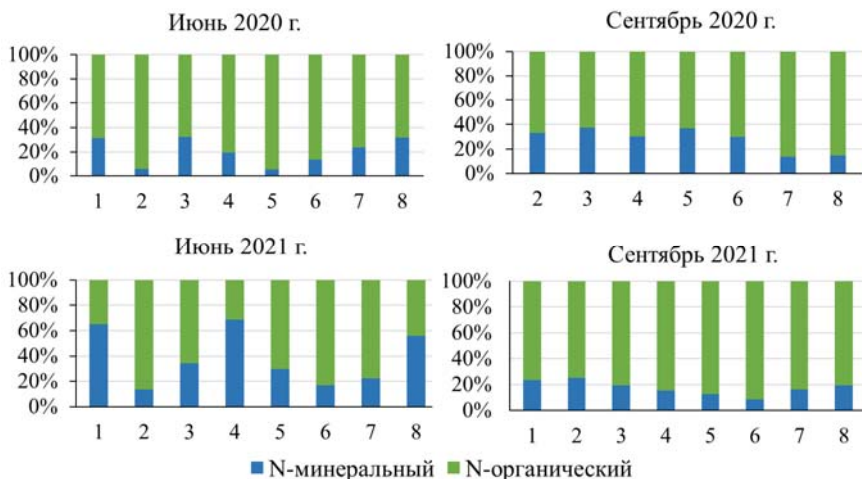


Рис. 3. Процентное содержание минеральных и органических форм азота в водах западной части оз. Байкал в 2020–2021 гг.

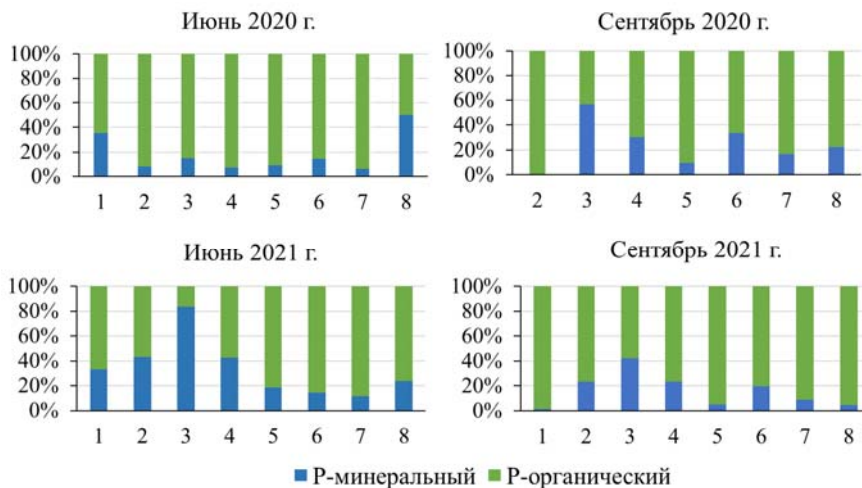


Рис. 4. Процентное содержание минеральных и органических форм фосфора в водах западной части оз. Байкал в 2020–2021 гг.

Доля минерального фосфора в прибрежных водах озера в 2020 г. не превышала 60 %; в сентябре напротив пос. Листвянка (станция «Нерпинарий») было отмечено 100%-ное содержание органического фосфора, что может быть связано с активным цветением водорослей (см. рис. 4). В июне 2021 г. ситуация улучшилась, доля минерального фосфора достигала 84 %, однако в сентябре 2021 г., по сравнению с 2020 г., значительного изменения содержания минерального фосфора не отмечалось.

Полученные результаты согласуются с данными, опубликованными ранее для прибрежной зоны оз. Байкал, согласно которым с середины июля по

конец сентября доля органического азота и фосфора также доминировала над минеральным и достигала 90 и 100 % соответственно [Eletskaia, Tomberg, 2020; Afonina, 2021; Assessment of the current ... , 2023].

Заключение

Концентрации минерального азота и фосфора фосфатов в приуезовой воде западной части оз. Байкал в период наших исследований в основном не превышали значений, установленных для олиготрофных водоёмов. По содержанию общего азота прибрежные воды исследуемых районов в большинстве случаев также относились к олиготрофному типу. В районах с высокой антропогенной нагрузкой (прибрежье у посёлков Листвянка, Бол. Голоустное, Хужир) в июне, когда происходит интенсивный смыв накопленных за зиму загрязняющих веществ из населённых пунктов, воды характеризовались как мезотрофные, в районе пос. Бол. Коты (станция «Жилище») как эвтрофные. В отличие от содержания общего азота содержание общего фосфора в приуезовой воде исследуемых районов в основном соответствовало водам мезотрофного типа, в районах посёлков Листвянка и Хужир в отдельные сезоны трофический статус повышался до эвтрофного. В летний период в прибрежной воде западной части Байкала нами отмечено доминирование органических форм азота и фосфора над минеральными.

Список литературы

Антропогенные изменения гидрохимических и санитарно-микробиологических показателей качества воды в притоках южного Байкала (зал. Лиственничный) / В. В. Мальник, О. А. Тимошкин, А. Н. Сутурин, Н. А. Онищук, М. В. Сакирко, И. В. Томберг, А. С. Горшкова, Н. С. Забанова // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 5. С. 533–543.

Вотинцев К. К., Мещерякова А. И., Поповская Г. И. Круговорот органического вещества в озере Байкал. Новосибирск : Наука, 1975. 190 с.

Гашкина Н. А., Моисеенко Т. И., Кремлева, Т. А. Особенности распределения биогенных элементов и органического вещества в малых озерах и лимитирование их трофности на Европейской территории России и западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2012. № 12. С. 17–25.

Жидкова А. Ю., Гусакова Н. В. Оценка внутренней биогенной нагрузки на воды Таганрогского залива Азовского моря с позиции эвтрофирования // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». 2017. № 4. <https://doi.org/10.15862/04RRO417>

Мальфанов И. Л., Вахрушева С. А., Тренина Н. Е. Оценка состояния Куршского залива на основании анализа содержания форм азота и фосфора в 2013–2017 годах // Труды Атлант-НИРО. 2017. Т. 1, № 4. С. 46–55.

Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. II. Трофический статус водных экосистем / В. В. Дмитриев, Н. В. Мякишева, В. Ю. Третьяков, Н. В. Хованов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7, Геология. География. 1997. № 1. С. 51–67.

Науменко Н. А. Эвтрофирование озер и водохранилищ. СПб. : Росгидромет, 2007. 252 с.

Неверова-Дзюпак Е. В., Цветкова Л. И. Оценка трофического состояния поверхностных вод. СПб. : Изд-во С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. унив., 2020. 176 с.

Розумная Л. А. Антропогенная эвтрофикация пресноводных озер Средней полосы России // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 2. С. 78–80.

Тимошкин О. А. Сложившиеся тенденции и современный уровень решения проблемы; наиболее интересные открытия в области биоразнообразия Байкала за последние годы // Аннотированный список фауны озера Байкал и его водосборного бассейна. Т. 2. Водоемы и водотоки юга Восточной Сибири и Северной Монголии. Новосибирск : Наука, 2009. С. 1423–1428.

Тарасова Е. Н. Компоненты трофического статуса в водах озер Байкал, Хубсугул и Телецкое // Сибирский экологический журнал. 1998. № 5. С. 383–390.

Токсичные цианобактерии в озере Байкал / О. И. Белых, А. С. Гладких, Е. Г. Сороковинова, И. В. Тихонова, С. А. Потапов // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2013. Т. 6, № 3. С. 27–34.

Цветкова Л. И., Басова С. Л. Развитие эвтрофирования в Невской губе и Финском заливе за последние 100 лет // Тез. докл. науч. чтен. «Белые ночи». СПб. : МАНЭБ, 1998. С. 90–91.

Afonina T. E. Dynamics of Biogens to Estimate Ecological State of Coastal Waters of Southern Baikal // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. Vladivostok, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042017>

Assessment of the Current Trophic Status of the Southern Baikal Littoral Zone / V. Domyshva, S. Vorobyeva, L. Golobokova, O. Netsvetaeva, N. Onischuk, M. Sakirko, O. Khuriganova, A. Fedotov // Water. 2023. Vol. 15, № 6. P. 1–14. <https://doi.org/10.3390/w15061139>

Aslan S., Kapdan I. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae // Ecological Engineering. 2006. Vol. 28, N 1. P. 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.04.003>

Current chemical composition of Lake Baikal water. Inland Waters / T. V. Khodzher, V. M. Domyshva, L. M. Sorokovikova, M. V. Sakirko, I. V. Tomberg // Inland Waters. 2017. Vol. 7, P. 250–258. <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1329982>

Dolichospermum lemmermannii (Nostocales) bloom in world's deepest Lake Baikal (East Siberia): abundance, toxicity and factors influencing growth / N. A. Bondarenko, I. V. Tomberg, A. A. Shirokaya, O. I. Belykh, I. V. Tikhonova, G. A. Fedorova, O. G. Netsvetaeva, E. V. Eletskaia, O. A. Timoshkin // Limnol. Freshw. Biol. 2021. N 1. C. 1101–1110. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2021-A-1-1101>

Eletskaia E. V., Tomberg I. V. The concentration of mineral and total phosphorus in the coastal water of southeast coast of Lake Baikal // Limnol. Freshw. Biol. 2020. N 4. P. 896–898. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-896>

Frumin G. T., Gildeeva I. M. Eutrophication of water bodies – a global environmental problem // Russ. J. Gen. Chem. 2015. N 84. P. 2483–2488. <https://doi.org/10.1134/S1070363214130015>

Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia) // O. A. Timoshkin, M. V. Moore, N. N. Kulikova, I. V. Tomberg, V. V. Malnik, M. N. Shimaraev, E. S. Troitskaya, A. A. Shirokaya, V. N. Sinyukovich, E. P. Zaitseva, V. M. Domyshva, M. Yamamuro, A. E. Poberezhnaya, E. M. Timoshkina // J. Great Lakes Res. 2018. N 44. P. 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.01.008>

Henderson-Sellers B., Markland H. R. Decaying lakes: The origins and control of cultural eutrophication. Chichester : Wiley, 1987. 254 p.

Mechanism and assessment of water eutrophication / X. Yang, X. Wu, H. Hao, Zh. He // J. Zhejiang Univ. Sci. 2008. N 9. P. 197–209.

Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal / L. S. Kravtsova, L. A. Izhboldina, I. V. Khanaev, G. V. Pomazkina, E. V. Rodionova, V. M. Domyshva, M. V. Sakirko, I. V. Tomberg, T. Ya. Kostornova, O. S. Kravchenko, A. B. Kupchinsky // Great Lakes Res. 2014. N 40. P. 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.02.019>

Nixon S. W. Coastal marine eutrophication: a definition social causes and future concerns // Ophelia. 1995. Vol. 41. P. 199–21.

Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? / O. A. Timoshkin, D. P. Samsonov, M. Yamamuro, M. V. Moore, O. I. Belykh, V. V. Malnik, M. V. Sakirko, A. A. Shirokaya, N. A. Bondarenko, V. M. Domyshva, G. A. Fedorova, A. I. Kochetkov, A. V. Kuzmin, A. G. Lukhnev, O. V. Medvezhonkova, A. V. Nepokrytykh, E. M. Pasynkova, A. E. Poberezhnaya, N. V. Potapuskaya, N. A. Rozhkova, N. G. Sheveleva, I. V. Tikhonova, E. M. Timoshkina, I. V. Tomberg,

E. A. Volkova, E. P. Zaitseva, Yu. M. Zvereva, A. B. Kupchinsky, N. A. Bukshuk // J. Great Lakes Res. 2016. N 42. P. 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>

Zdanowski B. Variability of Nitrogen and Phosphorus Contents and Lake Eutrophication // Pol. Arch. Hydrobiol. 1982. Vol. 29, N 3/4. P. 541–597.

References

Mal'nik V.V., Timoshkin O.A., Suturin A.N., Onishchuk N.A., Sakirko M.V., Tomberg I.V., Gorshkova A.S., Zabanova N.S. Antropogennyye izmeneniya gidrokhimicheskikh i sanitarnomikrobiologicheskikh pokazatelei kachestva vody v pritokakh yuzhnogo Baikala (zal. Listvennichnyi) [Anthropogenic changes in hydrochemical and sanitary-microbiological indicators of water quality in tributaries of southern Baikal (Larchivnichny Bay)]. *Vodnye resursy* [Water resources]. 2019, vol 46, no. 5, pp. 533-543 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0321-0596465533-543>

Votintsev K.K., Meshcheryakova A.I., Popovskaya G.I. *Krugovorot organicheskogo veshchestva v ozere Baikal* [Organic matter cycle in Lake Baikal]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1975, 190 p. (in Russian)

Gashkina N.A., Moiseenko T.I., Kremleva T.A. Osobennosti raspredeleniya biogennykh elementov i organicheskogo veshchestva v malykh ozerakh i limitirovanie ikh trofnosti na Evropeiskoi territorii Rossii i zapadnoi Sibiri. [Features of the distribution of biogenic elements and organic matter in small lakes and the limitation of their trophic activity in the European territory of Russia and Western Siberia]. *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*, 2012, no. 12, pp. 17-25. (in Russian)

Zhidkova A.Yu., Gusakova N.V. Otsenka vnutrennei biogennoi nagruzki na vody Taganrogskogo zaliva Azovskogo morya s pozitsii evtrofirovaniya [Assessment of the internal biogenic load on the waters of the Taganrog Bay of the Sea of Azov from the position of eutrophication]. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 2017, no 4. <https://doi.org/10.15862/04RRO417> (in Russian)

Mal'fanov I.L., Vakhrusheva S.A., Trenina N.E. Otsenka sostoyaniya Kurshskogo zaliva na osnovanii analiza sodержaniya form azota i fosfora v 2013–2017 godakh [Assessment of the state of the Curonian Lagoon based on the analysis of the content of nitrogen and phosphorus forms in 2013-2017]. *Trudy AtlantNIRO*, 2017, vol. 1, no. 4, pp. 46-55. (in Russian)

Dmitriev V.V., Myakisheva N.V., Tretyakov V.Yu., Khovanov N.V. Mnogokriterial'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya i ustoichivosti geosistem na osnove metoda svodnykh pokazatelei. II. Troficheskii status vodnykh ekosistem [Multi-criteria assessment of the ecological status and stability of geosystems based on the method of summary indicators. II. Trophic status of aquatic ecosystems]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Geology. Geography*, 1997, vol. 7, no. 1, pp. 51-67. (in Russian)

Naumenko N.A. *Evtrofirovaniye ozer i vodokhranilishch* [Eutrophication of lakes and reservoirs]. St.-Petersb., Rosgidromet Publ., 2007, 252 p. (in Russian)

Neverova-Dziopak E.V., Tsvetkova L.I. *Otsenka troficheskogo sostoyaniya poverkhnostnykh vod* [Assessment of the trophic state of surface waters]. St.-Petersb., St. Petersburg St. Univ. Architecture and Civil Engineering Publ., 2020, 176 p. (in Russian)

Rozumnaya L.A. Antropogennaya evtrofikatsiya presnovodnykh ozer Srednei polosity Rossii [Anthropogenic eutrophication of freshwater lakes in Central Russia]. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 2011, no. 2, pp. 78-80. (in Russian)

Timoshkin O.A. Slozhivshiesya tendentsii i sovremenniy uroven resheniya problemy; naibolee interesnye otkrytiya v oblasti bioraznoobraziya Baikala za poslednie gody [Current trends and the current level of problem solving; the most interesting discoveries in the field of biodiversity of Lake Baikal in recent years]. *Annotirovannyi spisok fauny ozera Baikal i ego vodosbornogo basseina. T. 2. Vodoemy i vodotoki yuga Vostochnoi Sibiri i Severnoi Mongolii* [Index of animal species inhabiting Lake Baikal and its catchment area. Vol. 2. Basins and Channels in the South of East Siberia and North Mongolia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009, pp. 1423-1428. (in Russian)

Tarasova E.N. Komponenty troficheskogo statusa v vodakh ozer Baikal, Khubsugul i Teletskoe [Components of the trophic status in the waters of Lakes Baikal, Khubsugul and Teletskoye]. *Contemp. Probl. Ecol.*, 1998, no. 5, pp. 383-390. (in Russian)

Belykh O.I., Gladkikh A.S., Sorokovikova E.G., Tikhonova I.V., Potapov S.A. Toksichnye tsianobakterii v ozere Baikal [Toxic cyanobacteria in Lake Baikal]. *The Bull. Irkutsk St. Univ. Ser. Biol. Ecol.*, 2013, vol. 6, no 3, pp. 2734. (in Russian)

Tsvetkova L.I., Basova S.L. Razvitie evtrofirovaniya v Nevskoi gube i Finskoy zalive za poslednie 100 let [The development of eutrophication in the Neva Bay and the Gulf of Finland over the past 100 years]. *Tez. dokl. nauch. chten. «Belye nochi»* [Abstr. Sci Read. "White Nights", St.-Petersburg, Russia]. St.-Petersb., MANEB Publ., 1998, pp. 90-91. (in Russian)

Afonina T.E. Dynamics of Biogens to Estimate Ecological State of Coastal Waters of Southern Baikal. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. Vladivostok, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042017>

Domysheva V., Vorobyeva S., Golobokova L., Netsvetaeva O., Onischuk N., Sakirko M., Khuriganova O., Fedotov A. Assessment of the Current Trophic Status of the Southern Baikal Littoral Zone. *Water*, 2023, vol. 15, no. 6, pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/w15061139>

Aslan S., Kapdan I. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. *Ecol. Engin.*, 2006, vol. 28, no. 1, pp. 64-70. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.04.003>

Khodzher T.V., Domysheva V.M., Sorokovikova L.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V. Current chemical composition of Lake Baikal water. *Inland Waters*, 2017, vol. 7, pp. 250-258. <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1329982>

Bondarenko N.A., Tomberg I.V., Shirokaya A.A., Belykh O.I., Tikhonova I.V., Fedorova G.A., Netsvetaeva O.G., Eletskaia E.V., Timoshkin O.A. *Dolichospermum lemmermannii* (Nostocales) bloom in world's deepest Lake Baikal (East Siberia): abundance, toxicity and factors influencing growth. *Limnol. Freshw. Biol.*, 2021, no. 1, pp. 1101-1110. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2021-A-1-1101>

Eletskaia E.V., Tomberg I.V. The concentration of mineral and total phosphorus in the coastal water of southeast coast of Lake Baikal. *Limnol. Freshw. Biol.*, 2020, no. 4, pp. 896-898. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-896>

Frumin G.T., Gildeeva I.M. Eutrophication of water bodies – a global environmental problem. *Russ. J. Gen. Chem.*, 2015, no. 84, pp. 2483-2488. <https://doi.org/10.1134/S1070363214130015>

Timoshkin O.A., Moore M.V., Kulikova N.N., Tomberg I.V., Malnik V.V., Shimaraev M.N., Troitskaya E.S., Shirokaya A.A., Sinyukovich V.N., Zaitseva E.P., Domysheva V.M., Yamamuro M., Poberezhnaya A.E., Timoshkina E.M. Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia). *J. Great Lakes Res.*, 2018, no. 44, pp. 230-244. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.01.008>

Henderson-Sellers B., Markland H.R. *Decaying lakes: The origins and control of cultural eutrophication*. Chichester, John Wiley & Sons, 1987. 254 p.

Yang X., Wu X., Hao H., He Zh. Mechanism and assessment of water eutrophication. *J. Zhejiang Univ. Sci.*, 2008, no. 9, pp. 197-209.

Kravtsova L.S., Izhboldina L.A., Khanaev I.V., Pomazkina G.V., Rodionova E.V., Domysheva V.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V., Kostornova T.Ya., Kravchenko O.S., Kupchinsky A.B. Near-shore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal. *J. Great Lakes Res.*, 2014, no. 40, pp. 441-448. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.02.019>

Nixon S. W. Coastal marine eutrophication: a definition social causes and future concerns. *Ophelia*, 1995, vol. 41, pp. 199-21.

Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M., Moore M.V., Belykh O.I., Malnik V.V., Sakirko M.V., Shirokaya A.A., Bondarenko N.A., Domysheva V.M., Fedorova G.A., Kochetkov A.I., Kuzmin A.V., Likhnev A.G., Medvezhonkova O.V., Nepokrytykh A.V., Pasyukova E.M., Poberezhnaya A.E., Potapskaya N.V., Rozhkova N.A., Sheveleva N.G., Tikhonova I.V., Timoshkina E.M., Tomberg I.V., Volkova E.A., Zaitseva E.P., Zvereva Yu.M., Kupchinsky A.B., Bukshuk N.A. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? *J. Great Lakes Res.*, 2016, no. 42, pp. 487-497. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>

Zdanowski B. Variability of Nitrogen and Phosphorus Contents and Lake Eutrophication // *Pol. Arch. Hydrobiol.*, 1982, vol. 29, no. 3/4, pp. 541-597.

Сведения об авторах***Елецкая Елена Владимировна***

*аспирант, младший научный сотрудник
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664033, Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3
e-mail: lilitanna@lin.irk.ru*

Тимошкин Олег Анатольевич

*доктор биологических наук, профессор,
заведующий лабораторией.
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664033, Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3
e-mail: tim@lin.irk.ru*

Томберг Ирина Викторовна

*кандидат географических наук, старший
научный сотрудник
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664033, Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3
e-mail: kaktus@lin.irk.ru*

Information about authors***Eletsckaya Elena Vladimirovna***

*Postgraduate, Junior Research Scientist
Limnological Institute SB RAS
3, Ulaanbaatar st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: lilitanna@lin.irk.ru*

Timoshkin Oleg Anatolyevich

*Doctor of Sciences (Biology), Professor,
Head of Laboratory
Limnological Institute SB RAS
3, Ulaanbaatar st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: tim@lin.irk.ru*

Tomberg Irina Viktorovna

*Candidate of Science (Geography),
Senior Research Scientist
Limnological Institute SB RAS
3, Ulaanbaatar st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: kaktus@lin.irk.ru*

Статья поступила в редакцию **27.04.2024**; одобрена после рецензирования **20.06.2024**; принята к публикации **23.07.2024**
Submitted **April, 27, 2024**; approved after reviewing **June, 20, 2024**; accepted for publication **July, 23, 2024**