

ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ,  
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 57.044

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКОСИСТЕМЫ  
ОЗЕРА ИТКУЛЬ И СОСТОЯНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА

© 2019 г. С. Ф. Лихачев<sup>1</sup>, А. Р. Сибиркина<sup>1,\*</sup>, Д. Ю. Двинин<sup>1</sup>, Г. А. Войтович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Челябинский государственный университет,  
Россия 454001 Челябинск  
\*e-mail: ecol@csu.ru

Поступила в редакцию: 17.01.2016 г.

После доработки: 18.03.2018 г.

Принята к печати: 26.04.2018 г.

Представлены результаты гидрохимического анализа воды оз. Иткуль, являющего памятником природы Челябинской области и важным рекреационным объектом для отдыха и туризма населения Челябинской и Свердловской областей. По химическому составу вода оз. Иткуль пресная, имеет слабощелочную реакцию среды, очень мягкая, обогащена кислородом. Содержание таких биогенных веществ, как нитрит-, нитрат- и фосфат-ионы, низкое. Приведены описание и анализ экологических групп видов фитопланктона оз. Иткуль. Показано, что основу фитопланктона оз. Иткуль составляет комплекс эврибионтных и индифферентных видов, имеющих широкое географическое распространение. Результаты анализа содержания ионов цинка, меди, железа, марганца и никеля в воде и в органах и тканях плотвы сибирской показали, что имеется превышение допустимых остаточных концентраций в коже и костях рыбы по никелю. Содержание в воде железа и марганца, а также других микроэлементов значительно ниже ПДК, что свидетельствует об отсутствии стока промышленных вод в пределах водосбора озера.

*Ключевые слова:* озеро Иткуль, химический состав воды, микроэлементы, фитопланктон.

**DOI:** 10.31857/S0321-0596463290-297

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Иткуль находится в предгорно-лесной зоне, к западу от него тянется невысокий Каслинский хребет, к востоку — Зауральская равнина. Озеро расположено между северной оконечностью Вишневых гор и южными отрогами Сысертского кряжа в Иткульской депрессии, имеет эрозионно-тектоническое происхождение, занимает углубление округло-продолговатой формы, представляющее собой древне-тектоническое нарушение, видоизмененное экзогенными процессами. Чаша озера сложена преимущественно сланцами, а на северо-востоке — апогнейсовыми и гранитными blastomylonитами. Сланцевые толщи легко подвергаются эрозии как менее плотные по сравнению с blastomylonитами [1, 17, 18].

Воз. Иткуль впадает множество небольших рек и ручьев, из него вытекает руч. Иткульский. Прочность озера способствует стабильности качества воды, вода в озере пресная. Озеро отличается значительными глубинами, широко используется для рекреационных и рыбохозяйственных целей (относится к сигово-лещевым водоемам).

Уникальность горного оз. Иткуль не только в его своеобразии и живописности, но и в наличии целого ряда археологических памятников, включенных в список объектов культурного наследия Челябинской области, что привлекает большое число туристов, а это, в свою очередь, может привести к загрязнению экосистемы озера. Кроме того, озеро расположено в 25 км к северо-востоку от г. Верхний Уфалей, в котором сосредоточены предприятия черной металлургии, машиностроения, электротехники и др. Следовательно, несмотря на то, что экосистема озера не подвержена прямому техногенному воздействию, риск загрязнения существует. Учитывая, что загрязнение пресноводных водоемов входит в круг глобальных экологических проблем [7] и требует всестороннего контроля качества вод, гидрохимические исследования в озере в рамках фоновых мониторинговых контроля весьма актуальны. Полученные данные о природном (фоновом) состоянии водной экосистемы оз. Иткуль в дальнейшем при возможном ухудшении экологической обстановки могут послужить основой биомониторинговых исследований.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Общая протяженность оз. Иткуль составляет 23.14 км, в том числе по территории Верхнеуфалейского городского округа – 16.43 км, по территории Снежинского городского округа – 6.71 км. Граница охранной зоны оз. Иткуль составляет расстояние  $\geq 100$  м от границы оз. Иткуль и колеблется от 100 до 2625 м.

Сбор материала для исследований проведен в безледный весенне-летне-осенний период (апрель–октябрь 2014 г.). Станции отбора проб зафиксированы на координатной сетке с помощью GPS-навигатора, имеющего точность определения точки на местности  $\pm 3$  м. Координаты станций отбора проб: ст. 1 (Западная точка):  $x - 56.161040$ ,  $y - 60.474401$ , ст. 2 (Кордон):  $x - 56.178605$ ,  $y - 60.482924$ , ст. 3 (д. Даутово):  $x - 56.181241$ ,  $y - 60.524816$ . Пробы отбирали в прибрежной зоне с поверхности озера (до 1.5 м) (рис. 1).

Отбор и хранение проб воды проводили согласно ГОСТ [4, 5]. Исследование температурного и кислородного режима проводили на месте отбора. Прозрачность определяли при помощи диска Секки, цветность – по светопоглощательной способности. Гидрохимический анализ воды проводился в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс) с применением титри-

метрического, нефелометрического, атомно-абсорбционного, расчетного методов.

Содержание меди, цинка, никеля, марганца и железа изучали в коже, костях и мышцах плотвы сибирской – *Rutilus rutilus* L. (Cyprinidae, Cypriniformes). Использовали половозрелых особей обоего пола, одинаковых по массе (38–42 г) и размеру (15.3–15.6 см).

Содержание химических веществ сравнивали с их ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения ( $\text{ПДК}_{\text{рбх}}$ ) [19].

Коэффициенты аккумуляции металлов в рыбе рассчитывали по формуле:  $K_A = C_p : C_v$  ( $K_A$  – коэффициент аккумуляции,  $C_p$  – концентрация металла в рыбе,  $C_v$  – концентрация металла в воде) [20]. Концентрации металлов в пробах тканей плотвы сибирской (*Rutilus rutilus* L.) сравнивали с принятыми в РФ допустимыми остаточными концентрациями (ДОК) этих элементов в свежих рыбопродуктах [20].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование химического состава природных вод зависит от факторов, как непосредственно влияющих на водную среду, так и определяющих условия, в которых протекает взаимодействие веществ с водой [16]. Выявлено, что температура воды озера в весенний период

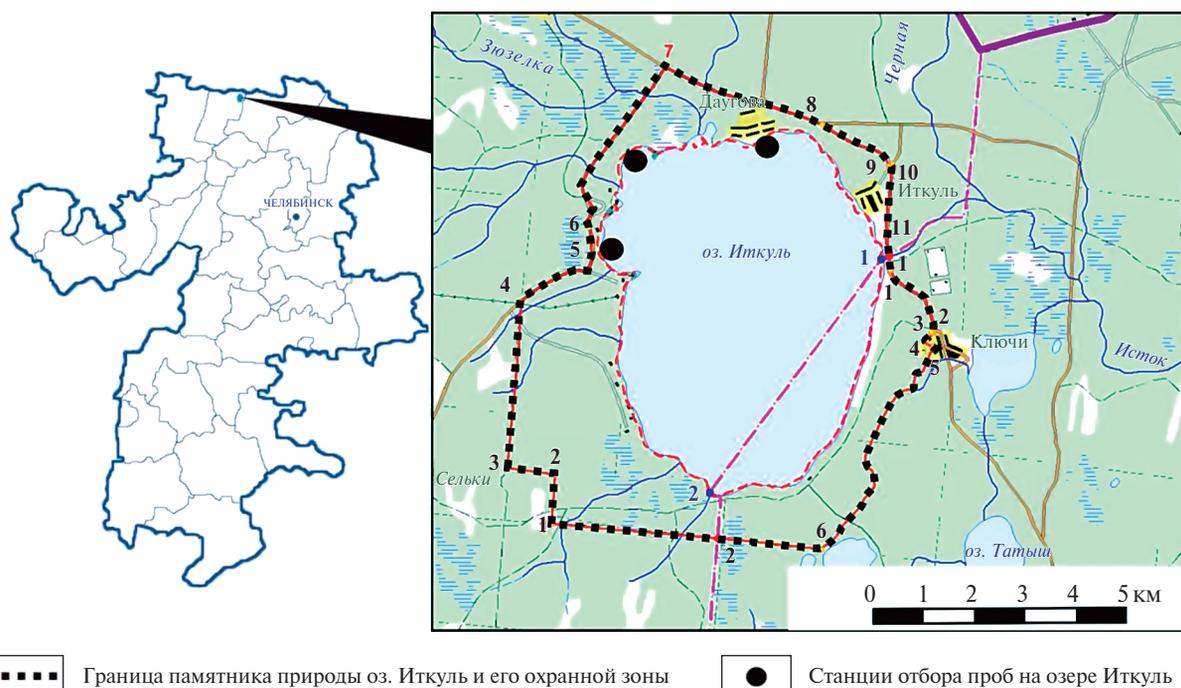


Рис. 1. Картограмма оз. Иткуль (положение оз. Иткуль в пределах Челябинской области и обозначение станций отбора проб), 2014 г.

(апрель) менялась в пределах 3.7–3.8°C; в летний (июнь–июль–август) – от 21.5 до 22°C (биологическое лето); в осенний – от 8°C (в сентябре) до 1.5°C (в октябре). По термическому режиму оз. Иткуль относится к умеренным (смешанным) озерам, для которых летом характерна прямая температурная стратификация и температура >4°C, зимой – обратная температурная стратификация и температура <4°C.

С термическим режимом связана вертикальная циркуляция воды, которая содействует распространению кислорода. Содержание растворенного кислорода – одна из важнейших характеристик качества воды, служит интегральным показателем продукционно-деструкционных и динамических процессов в водных экосистемах [9]. Недостаток кислорода приводит к заморным явлениям, резко снижает способность водоемов к самоочищению. В ходе исследования установлено, что эти процессы не характерны для оз. Иткуль, так как во все периоды и на всех станциях отбора проб зафиксировано достаточно высокое насыщение кислородом поверхностного слоя воды, составляющее в среднем 9.7 мг/дм<sup>3</sup>.

Установлено, что вода в озере по показателю общей жесткости характеризуется как мягкая – 1.73 ммоль/дм<sup>3</sup> (при изменении показателя 1.56–1.70–1.92 – весна–лето–осень соответственно). Общую жесткость воды обуславливают растворимые соли кальция и магния, между этими ионами и жесткостью воды выявлена достоверно высокая корреляционная связь, причем зависимость между жесткостью и ионами магния ( $r = 0.96$ ) более сильная, нежели между жесткостью и ионами кальция ( $r = 0.91$ ). Положительно коррелируют между собой содержания ионов кальция и магния ( $r = 0.76$ ). Кальций и магний активно участвуют в биохимических процессах, склонны к образованию комплексных соединений с гумусовыми кислотами, причем для магния способность закрепляться на коллоидных частицах выражена сильнее [22], поэтому содержание ионов магния ниже, чем ионов кальция.

Среди компонентов солевого состава, помимо ионов Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>, преобладают HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-ионы, что характерно для пресных слабоминерализованных водоемов гидрокарбонатного типа кальциево-магниевой группы. Основной источник главных ионов оз. Иткуль – выщелачивание невысоких гор, сложенных углистыми сланцами и включающих в себя карбонатные породы – известняки и доломиты. Геологическое строение дна озера определяет особенности физико-хи-

мического состава воды оз. Иткуль. Вода озера находится в постоянном контакте с известняками и изверженными породами, в результате углекислый газ, образующийся в этих водах при разложении органических веществ, полностью нейтрализуется карбонатами кальция и магния. В условиях равновесия с карбонатными породами рН поверхностных вод – от 7.3 до 8.4, что, очевидно, наблюдается и в оз. Иткуль.

К одному из основных элементов питания растений относится калий, в связи с этим его содержание в природных водах несколько ниже содержания натрия. Среднее содержание макроионов убывает в следующем порядке: Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > K<sup>+</sup>, в течение года происходят незначительные изменения их концентраций, но не изменяется соотношение, что обусловлено гидрологическими особенностями озера и геологическим строением дна водоема (табл. 1).

Исследования качества воды оз. Иткуль в 2007 и 2014 гг. позволили установить корреляционные связи между изучаемыми показателями. Выявлено, что изменение рН воды отрицательно коррелирует с жесткостью воды ( $r = -0.7$ ) и с содержанием ионов HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> ( $r$  = от -0.3 для пары рН–SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> до -0.8 для пары рН–Mg<sup>2+</sup>). Положительная корреляция обнаружена между рН и ионами K<sup>+</sup> ( $r = 0.4$ ). Вместе с тем между ионами, отрицательно коррелирующими с рН, существуют положительные корреляционные зависимости. Наиболее сильные зависимости выявлены между ионами Cl<sup>-</sup> и Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ( $r = 0.8–0.9$ ). Отрицательные корреляционные зависимости обнаружены между ионами Ca<sup>2+</sup> и NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ( $r$  = до -0.3).

По характеру анионного состава вода озера соответствует пресноводным водоемам. Один из основных факторов, обуславливающих качество природных вод, – содержание биогенных элементов, которые поступают в озеро в результате процессов жизнедеятельности микроорганизмов или привносятся с атмосферными осадками. Исследование показало, что вода озера бедна биогенными элементами, в том числе нитритами, нитратами и фосфатами, которые отнесены к 3-му классу опасности и являются информативным индикатором поступления в водоем нитратных и фосфорных удобрений, промышленных и бытовых сточных вод, особенно после биологической очистки воды. Содержание биогенных элементов зависит от рН воды, в воде с низким рН их содержание мало. Содержание

**Таблица 1.** Средний химический состав воды оз. Иткуль за 2007 и 2014 гг. (в скобках – общий диапазон изменения показателя; в каждый период отобрано по 25 проб)

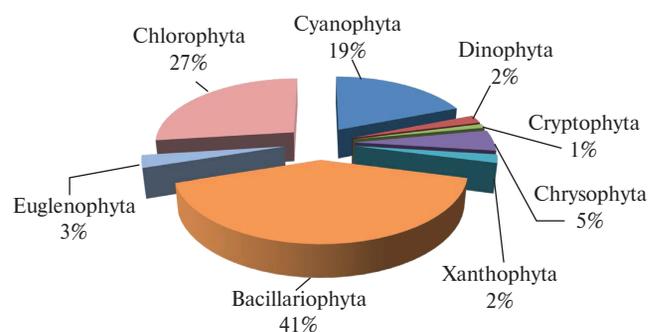
Гидрохимические показатели	ПДК <sub>вр</sub>	Содержание химических веществ и значение показателей в различные сезоны		
		весенний	летний	осенний
Ca <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	180.0	15.2 (12.8–17.1)	18.1 (17.6–18.8)	20.1 (18.2–25.3)
Mg <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	40.0	9.7 (7.3–13.1)	9.7 (8.6–10.6)	11.1 (9.0–15.8)
Na <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	120.0	3.6 (2.7–4.5)	3.7 (3.3–4.3)	4.3 (3.3–5.8)
K <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	50.0	2.9 (2.5–3.5)	3.6 (3.2–4.3)	4.5 (3.1–5.6)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0.39	0.24 (0.05–0.58)	0.14 (0.05–0.41)	0.34 (0.05–0.90)
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Не лимитировано	61.4 (54.9–64.7)	88.6 (86.6–90.9)	97.1 (86.6–122.0)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	100.0	25.2 (10.1–40.5)	20.81 (15.8–27.75)	24.0 (17.7–29.3)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	9.1	7.6 (4.5–12.4)	0.5 (0.1–0.8)	1.9 (0.7–4.3)
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0.020	0.003	0.004 (0.003–0.005)	0.004 (0.003–0.007)
Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	300.0	5.5 (3.0–9.9)	3.2 (2.8–3.8)	5.3 (3.1–10.6)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0.20	–	0.08 (0.04–0.15)	0.10 (0.01–1.20)
Mn <sup>2+</sup> , мкг/дм <sup>3</sup>	100.0	4.9 (4.9–5.0)	8.8 (4.8–14.7)	4.2 (1.1–7.9)
Fe <sub>общ</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	100.0	–	8.98 (2.47–17.17)	2.83 (0.15–12.65)
Общая жесткость, ммоль/дм <sup>3</sup>	7.0	1.6 (1.2–1.9)	1.7 (1.7–1.8)	1.9 (1.7–2.6)
pH	6.5–8.5	7.7 (7.3–7.9)	7.5 (7.3–7.7)	7.6 (7.1–7.9)
Eh, мВ	Не лимитировано	254 (250–260)	255 (240–270)	258 (240–280)
Электропроводность	Не лимитировано	136.2 (106.0–168.9)	146.5 (137.4–160.3)	171.3 (146.2–225.0)

нитритов, нитратов и фосфатов в воде не превышает ПДК даже в летний и осенний периоды.

Значение pH определяет не только миграцию химических элементов, но и развитие, жизнедеятельность и распределение водных организмов. Максимальная продуктивность вод приходится на pH 6.5–8.5. Вода озера характеризуется pH 7.6 и, по классификации А.И. Перельмана [6], является нейтральной и слабощелочной (табл. 1), а для обитающих в озере рыб формируется благоприятная среда обитания. В летне-осенний период 2014 г. в воде озера был обнаружен 71 вид фитопланктона, относящийся к 10 классам, 23 порядкам, 54 родам из пяти систематических отделов пресноводных водорослей. Причем доля диатомовых водорослей (Bacillariophyta) в общем количестве видов фитопланктона увеличилась с 39 (2007 г.) до 41% (2014 г.), Cyanophyta – с 17 (2007 г.) до 10% (2014 г.). В целом для озера, согласно проведенным исследованиям в период открытой воды в 2007–2014 гг., обнаружено 174 вида фитопланктона, относящегося к 13 классам, 35 порядкам, 90 родам из восьми систематических отделов пресноводных водорослей.

В планктонной альгофлоре оз. Иткуль по видовому богатству абсолютно преобладают диатомовые водоросли (Bacillariophyta) – 41%, следующая группа по количеству выявленных видов – зеленые водоросли (Chlorophyta) – 27%, велико видовое богатство сине-зеленых водорослей (Cyanophyta) – 19%, доля остальных групп водорослей в сложении альгофлоры незначительная (рис. 2).

Таксономический состав фитопланктона озера – типичный для водоемов умеренной климатической зоны с преобладанием диатомовых и зеленых водорослей. Значительное превы-

**Рис. 2.** Соотношение высших систематических таксонов фитопланктона оз. Иткуль.

шение числа видов диатомовых над другими группами водорослей характерно для водоемов горно-лесной природно-климатической зоны. Увеличивающееся в отдельные периоды видовое богатство сине-зеленых водорослей свидетельствует о повышении трофического статуса озера.

Анализ экологических групп видов фитопланктона оз. Иткуль показал отсутствие закисления и засоления оз. Иткуль. Эколого-географический анализ выявленного фитопланктона показал, что основу фитопланктона оз. Иткуль составляет комплекс эврибионтных и индифферентных видов, имеющих широкое географическое распространение.

В августе 2014 г. зафиксировано усиление развития сине-зеленых водорослей с образованием нагонных явлений у берега. Полностью сменился доминирующий комплекс фитопланктона по сравнению с 2007 г. Так, в августе 2007 г. в озере наблюдалось массовое развитие одного вида — *Gloeotrichia echinulate* со средней численностью по акватории — 30–50 колоний на 1 л (колония содержит 30 000–100 000 клеток). Массовое развитие *Gloeotrichia echinulata* распространено в пресноводных водоемах региона, при макроскопических размерах колоний прозрачность воды не снижается и оставляет возможность фотосинтеза другим группам водорослей. В августе 2014 г. комплекс доминирующих видов оз. Иткуль состоял из других видов сине-зеленых водорослей, таких как *Microcystis aeruginosa* f. *aeruginosa*, *M. flosaquae*, *Microcystis viridis*, *M. wesenbergii*, *Oscillatoria limosa*. Мелкоклеточные виды микроцистиса сильно снижают прозрачность воды, выделяют токсины, препятствуют развитию других водорослей. Отмечено много цист сине-зеленых водорослей рода *Anabaena* sp., вегетировавших ранее, а также были обильны споры *Aphanizomenon*.

Кроме доминирующего комплекса сине-зеленых, часто встречались колонии зеленой водоросли *Botryococcus braunii*, продолжали развиваться нетребовательные к освещению диатомовые водоросли родов *Aulacoseira*, эпифитные и бентосные виды диатомей (*Cymbella*, *Gomphonema*, *Neidium*).

Вхождение в доминирующий планктонный комплекс цианобактерий на протяжении летне-осенних месяцев, появление все новых видов приводят к угрозам массового развития *Suaenophyta* при благоприятных условиях и к резкому ухудшению качества воды в водоеме.

Природные воды почти никогда не бывают прозрачными из-за наличия в них взвешенных частиц минерального или органического происхождения и, как было сказано выше, наличия микроскопических водорослей. Однако в оз. Иткуль прозрачность воды высокая и составляет до 4.6 м по диску Секки (при норме  $\geq 3$  м). Улучшению качества воды способствует проточность водоема: в озеро впадает несколько ручьев и рек — Буркалка, Долгая, Зюзелка, Карабайка и др., вытекает руч. Иткульский, который связывает озеро с системой р. Синары.

Различные процессы в водной среде обуславливают изменение минерализации воды. Определение электропроводности дает возможность систематически контролировать колебания общей минерализации воды. Электропроводность обычно находится в сложной зависимости от концентрации растворенных минеральных солей и температуры воды [15], не исключение и оз. Иткуль. Увеличение содержания главных ионов осенью сопровождается изменением электропроводности воды, о чем свидетельствует выявленная положительная корреляционная зависимость между этими исследуемыми показателями и электропроводностью воды (коэффициент корреляции варьировал в пределах 0.42–0.93).

Из-за процессов выщелачивания горных пород, слагающих дно водоемов, в природных водах всегда присутствуют ионы железа. Железо в поверхностных водах может находиться в коллоидном и растворенном состоянии (в виде ионов  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ , способных к образованию комплексов с органическими кислотами). Как показали исследования авторов, содержание железа составило всего 2.83 мкг/дм<sup>3</sup> осенью и 8.98 мкг/дм<sup>3</sup> в летнее время, т.е.  $\leq 9\%$  от ПДК<sub>вр</sub>.

Важную экологическую и физиологическую роль в жизни высших растений, водорослей и гидробионтов в водоемах играет марганец, который активно включается в миграционные циклы, аккумулируется в различных компонентах водных экосистем [16]. Для химии марганца очень характерны окислительно-восстановительные реакции. Так, ионы  $Mn^{3+}$  в водных растворах неустойчивы, окисляют воду, образуя и выделяя в воду кислород [10, 13]. Двухвалентный марганец существует только в растворенном состоянии, трехвалентный — как в растворенном состоянии, так и в твердой фазе, четырехвалентный — только в твердой фазе [12]. В аэробных условиях [12] образуются производные  $Mn^{4+}$ . Вода оз. Иткуль характеризуется аэробными условиями; очевидно, именно этот фактор и определяет

**Таблица 2.** Содержание микроэлементов в воде оз. Иткуль, мкг/дм<sup>3</sup>

Элемент	$\bar{X} \pm S\bar{x}$	$C_{\min} - C_{\max}$
Медь	2.59 ± 0.004	1.43–5.06
Цинк	4.11 ± 0.57	1.55–8.04
Свинец	0.39 ± 0.02	0.01–1.32
Никель	4.13 ± 0.68	2.93–5.14
Стронций	110.4 ± 5.7	78.7–140.0
Кадмий	0.0196 ± 0.0008	0.001–0.080
Хром	0.20 ± 0.007	0.05–0.28

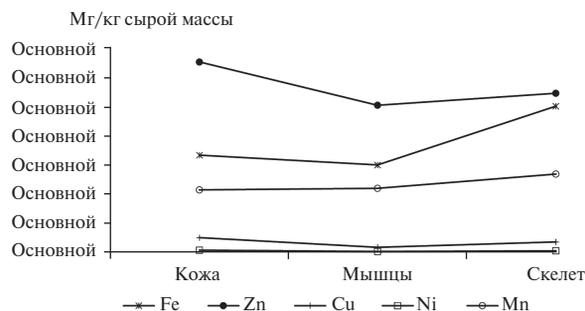
низкое содержание ионов  $Mn^{2+}$  в воде, составляющее 4.2–8.8% от ПДК<sub>вр</sub>. Исследование показало, что растворимость ионов марганца положительно коррелирует с рН ( $r = 0.34$ ) и с ионами железа ( $r = 0.48$ ).

Цветность природных вод чаще всего обусловлена присутствием в воде гумусовых веществ почвенного, растительного или планктонного происхождения. Вода в озере в летний период характеризуется очень малой и малой цветностью – 19.6 град. (14.0–28.0). Максимальный показатель цветности воды отмечается в июле–августе, что обусловлено присутствием в воде гуминовых веществ, которые образуются при разрушении органических соединений в донных отложениях, вымываются из них и поступают в воду. Малая цветность воды, а также низкое содержание железа не ухудшают органолептических свойств воды, соответственно – не оказывают отрицательного влияния на развитие водных организмов в результате резкого снижения концентрации растворенного кислорода в воде, который расходуется на окисление соединений железа и гумусовых веществ.

Качество природных вод определяется всей совокупностью химических веществ (органических, биогенных), макро- и микроэлементов в воде. Содержание отдельных микроэлементов в воде озера представлено в табл. 2.

Согласно данным табл. 2, ни по одному из микроэлементов не обнаружено превышений ПДК [19], что свидетельствует об отсутствии антропогенных источников поступления этих микроэлементов (стока промышленных вод) в пределах водосбора озера.

Наиболее распространенный вид рыб в озере – плотва сибирская (*Rutilus rutilus* L.). На рис. 3 представлены кривые распределения ионов металлов по органам и тканям плотвы сибирской.

**Рис. 3.** Распределение ионов тяжелых металлов по органам и тканям плотвы сибирской (*Rutilus rutilus* L.).

Известно, что железо, цинк, медь, марганец относятся к незаменимым элементам, а никель – к примесным элементам, биологическая роль которых мало выяснена или неизвестна. Среднее содержание металлов в рыбе, обитающей в оз. Иткуль, убывает в следующем порядке:  $Zn > Fe > Mn > Cu > Ni$ . По никелю зафиксировано превышение ДОК в коже и костях рыбы в 1.4 раза, для остальных элементов концентрация составила 13–79% от ДОК. В пробах костей скелета плотвы сибирской концентрации железа и марганца выше, чем в коже и мышцах, – соответственно в 1.6 и 1.7 раз для железа и в 1.3 и 1.2 раза для марганца. Содержание цинка, меди и никеля в коже в 1.4, 2.8 и 2.3 раза выше, чем в мышцах исследованных рыб. Биоаккумуляционные свойства органов и тканей плотвы по отношению к исследованным металлам можно охарактеризовать по коэффициенту аккумуляции ( $K_A$ ) (табл. 3).

Несмотря на невысокое содержание соединений никеля и марганца в воде, они активно аккумулируются в органах и тканях плотвы. Это объясняется механизмом биологического действия *d*-элементов, связанного с их способностью к комплексообразованию. Максимальной комплексообразующей способностью обладают *d*-элементы с незаполненными *d*-подуровнями, как у никеля и марганца [2]. Известно, что марганец участвует в формировании костной ткани [22], а накопление никеля отмечается в костях и легких животных [14]. В настоящих

**Таблица 3.** Коэффициент аккумуляции металлов по органам и тканям плотвы сибирской (*Rutilus rutilus* L.)

$K_A$	Железо	Марганец	Медь	Цинк	Никель
Кожа	0.51	1.10	0.36	0.87	1.40
Мышцы	0.48	1.24	0.13	0.64	0.60
Скелет	0.79	1.47	0.25	0.69	1.00
Средний	0.59	1.27	0.25	0.73	1.00

исследованиях максимум марганца обнаружен именно в костях скелета плотвы, а никеля – в коже, непосредственно контактирующей с водой.

### ВЫВОДЫ

По химическому составу вода оз. Иткуль пресная, имеет слабощелочную реакцию, очень мягкая, характеризуется присутствием свободного кислорода и химических элементов высшей валентности, бедна биогенными элементами, включая нитрит-, нитрат- и фосфат-ионы.

Основу фитопланктона оз. Иткуль составляет комплекс эврибионтных и индифферентных видов, имеющих широкое географическое распространение. Экологические группы видов фитопланктона оз. Иткуль подтверждают отсутствие закисления и засоления оз. Иткуль.

Содержание в воде железа и марганца, а также других микроэлементов (меди, цинка, свинца, стронция, кадмия, никеля, хрома) значительно ниже ПДК, что свидетельствует об отсутствии стока промышленных вод в пределах водосбора озера.

Изучение биоаккумуляционной способности органов и тканей плотвы сибирской (*Rutilus rutilus* L.) по отношению к микроэлементам выявило незначительное превышение ДОК в коже и костях рыбы по содержанию никеля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреева М.А.* Озера Среднего и Южного Урала. Челябинск: ЮУКИ, 1973. 270 с.
2. *Берлянд А.С., Ершов Ю.А., Книжник А.З., Попков В.А.* Общая химия. Биофизическая химия. Химия биогенных элементов. Учебник для мед. спец. вузов. М.: Высш. шк., 2007. 560 с.
3. *Брукс Р.Р.* Загрязнение микроэлементами // Химия окружающей среды. М.: Химия, 1982. С. 371–413.
4. ГОСТ 17.1.5.05-85 Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. М.: Стандартинформ, 2010. 12 с.
5. ГОСТ Р 51592-2000 Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2000. 48 с.
6. *Гришина Е.П.* Основы химии окружающей среды: учеб. пособие. Ч. 2. Химические процессы в гидросфере. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2009. 60 с.
7. *Гуреева Н.В.* Исследование качества воды реки в пределах города с помощью некоторых биохимических методов // Сиб. экол. журн. 2011. № 1. С. 113–121.
8. *Добровольский В.В.* География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
9. *Ерина О.Н.* Режим растворенного кислорода в стратифицированных водохранилищах москворецкой системы водоснабжения г. Москвы Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2015. 188 с.
10. *Караетьянц М.Х., Дракин С.И.* Общая и неорганическая химия. М.: Химия, 1993. 632 с.
11. *Линник, П.М., Набиванец Б.И.* Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 271 с.
12. *Мартынова М.В.* Формы нахождения марганца, их содержание и трансформация в пресноводных отложениях // Экол. химия. 2012. № 21 (1). С. 38–52.
13. *Некрасов Б.В.* Учебник общей химии. М.: Химия, 1981. 560 с.
14. *Ноздрюхина Л.Р.* Биологическая роль микроэлементов в организме животных и человека. М.: Наука, 1977. 184 с.
15. *Овчинников А.М.* Общая гидрогеология. М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. геологии и охране недр, 1955. 385 с.
16. *Огрызкова О.С., Эйрих А.Н., Серых Т.Г., Дрюпина Е.Ю., Усков Т.Н., Папина Т.С.* Сезонные изменения миграции содержания марганца в воде Новосибирского водохранилища // Изв. АГУ. 2014. С. 176–180.
17. ООПТ регионального значения Челябинской области. Типовое положение о памятниках природы регионального значения в Челябинской области. Инф. бюл. Вып. 1. Челябинск, 2007. 112 с.
18. Особо охраняемые природные территории Челябинской области (1992) / Под общей ред. Матвеева А.С. Челябинск: АТОКСО, 1992. 152 с.
19. Постановление от 13 июля 2017 года № 97 “О внесении изменений в ГН 2.1.5.1315-03 “Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования”. Постановление Гл. гос. сан. врача РФ от 30.04.2003 № 78.
20. *Попов П.А., Трифонова О.В.* Содержание и характер накопления металлов в рыбах реки Томи // Сиб. экол. журн. 2007. № 6. С. 961–967.
21. Санитарные правила и нормы (СанПиН) 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. М.: Минздрав России, 2001. 148 с.
22. *Харанжевская Ю.А., Воистинова Е.С., Иванова Е.С.* Химический состав и качество болотных вод в бассейне реки Чая // Сиб. экол. журн. 2011. № 1. С. 137–145.

## HYDROCHEMICAL PECULIARITIES OF THE ITKUL LAKE ECOSYSTEM AND ITS PHYTOPLANKTON CONDITION

© 2019 S. F. Likhachev<sup>1</sup>, A. R. Sibirkina<sup>1,\*</sup>, D. Yu. Dvinin<sup>1</sup>,  
G. A. Voitovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chelyabinsk State University,  
Russia 454001 Chelyabinsk  
\*e-mail: ecol@csu.ru

Received: 17.01.2016

Received version received: 18.03.2018

Accepted: 26.04.2018

We present the results of the hydrochemical analysis in Lake Itkul, which is the natural monument in the Chelyabinsk Region and an important recreational facility for the population of the Chelyabinsk and Sverdlovsk Regions. The water of Lake Itkul is fresh in terms of chemical composition, has low-alkaline medium reaction, and is very soft and saturated with oxygen. The water content in biogenic substances such as ions of nitrite, nitrate, and phosphate is low. Description and analysis of ecological groups of phytoplankton species of Lake Itkul are provided. The phytoplankton of Lake Itkul comprises eurybiontic and neutral species having wide geographical distributions. Analysis of ion contents of the zinc, copper, manganese, and nickel in the water and organs and tissues of the common roach indicated high residual concentrations of nickel in fish skin and bones, above allowable values. The content of iron, manganese, and other secondary elements in water was significantly lower than their maximum allowable concentrations, reflecting the absence of industrial water discharge within the lake water intake.

**Keywords:** Itkul Lake, water chemical composition, microelements, phytoplankton.

**DOI:** 10.31857/S0321-0596463290-297