

**ГИДРОХИМИЯ И ГИДРОБИОЛОГИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ВОДОЕМОВ  
ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ**

© 2022 г. Е.Ю. Афолина, Н.А. Ташлыкова, Л.В. Замана, А.П. Куклин,  
В.А. Абрамова, Л.П. Чечель

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения РАН  
Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, д. 16а. E-mail: kataf@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.01.2022. После доработки 30.06.2022. Принята к публикации 01.07.2022.

Водоёмы антропогенного генезиса как особый компонент техногенного ландшафта характеризуются экологическими условиями, отличными от естественных. Это ограниченная площадь водосбора, малая мощность донных отложений, высокое содержание металлов, металлоидов и солей. Объекты наших исследований – разнообразные озёрные образования, сформировавшиеся при разработке месторождений полезных ископаемых в Восточном Забайкалье. В статье по различным в своем образовании и назначении техногенным водоёмам горнопромышленных территорий охарактеризованы химический состав вод, видовое разнообразие и структура сообществ гидробионтов. Водоросли и зоопланктон техногенных водоемов в регионе с аридным климатом изучаются впервые. Исследованные воды имеют разнообразные морфометрические и физико-химические характеристики с широким диапазоном значений pH (2.99-8.80), общей минерализации (85.9-9065 мг/л), рудных и сопутствующих элементов. По химическому составу воды сульфатные и гидрокарбонатно-сульфатные, с разным соотношением магния и кальция. Видовое разнообразие альгофлоры и зоопланктона обследованных водоёмов невысокое (75 таксонов водорослей планктона, 8 таксонов макроводорослей, 63 вида и подвида беспозвоночных планктона), что связано с экстремальностью экологических условий, где видовое богатство является следствием влияния физико-химических условий среды обитания. Определяющими факторами для развития CRYPTOPHYTA является микро- и макрокомпонентный состав, общая минерализация, для других групп фитопланктона (Cyanobacteria, Bacillariophyta, Chrysophyta, Charophyta, Chlorophyta, Euglenophyta, Dynophyta) – содержание гидрокарбонатов. Количественные показатели зоопланктона положительно связаны с концентрацией аммонийного азота (для Crustacea) и отрицательно – с pH (Rotifera).

*Ключевые слова:* месторождение, техногенные водоемы, химический состав вод, фитопланктон, макроводоросли, зоопланктон.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2022-4-189-200**

**EDN: JMGUYF**

В процессе хозяйственной деятельности и коренной перестройки природных комплексов формируется техногенный ландшафт, одним из компонентов которого являются созданные и/или образовавшиеся на месте горных выработок искусственные водоемы различного типа (Грищенко, 1999), в мировой литературе известные как «карьерные озера» («pit lake») и «шахтные озера» («mining lake»; Bielańska-Grajner, Gładysz, 2010; Weithoff et al., 2010; Blanchette, Lund, 2016). Несмотря на их широкое распространение, становление, функционирование и перспективы существования этих новообразованных природно-антропогенных систем недостаточно исследованы (Kumar et al., 2009; Goździejewska et al., 2021). Особенно это касается изучения гидробионтов, обитающих в них. Известен ряд работ по биоте карьерных (шахтных) озер Африки (El-Bassat, Taylor, 2007), Европы (Wollmann et al., 2000; Beulker et al., 2003; Nixdorf et al., 2003; Bielańska-Grajner, Gładysz, 2010; Weithoff et al., 2010; Moser, Weisse, 2011; Goździejewska et al., 2021), Америки (Kalin et al., 2001; Ferrari et al., 2015). Изучение водоемов горнопромышленных территорий важно для решения различных экологических проблем (развитие сообществ гидробионтов в сложных геохимических условиях, улучшение качества воды для целей многостороннего использования

человеком и др.; Kumar et al., 2009; Blanchette, Lund, 2016; Skrzypczak et al., 2020; Paulsson, Widerlund, 2021; Ramanchuk et al., 2021; She et al., 2021).

На территории Забайкальского края, где одной из основных отраслей экономики является горнорудная промышленность, техногенные водоемы остаются малоизученными в плане геохимических исследований (Чечель, Замана, 2009; Замана, Чечель, 2015; Замана и др., 2020; Чечель, 2020) и, практически, не исследованными в гидробиологическом аспекте (Афони́на, Афони́н, 2015, 2017; Афони́на, Итигилова, 2012; Куклин, 2014). Комплексные работы по изучению химической и биологической составляющих техногенных водоемов на территории края проведены впервые. Целью настоящей работы является изучение химического состава в различных типах техногенных вод и основных характеристик сообществ гидробионтов для объективной оценки экологического состояния водоемов антропогенного генезиса.

### Материалы и методы

*Характеристика района исследований.* Территория исследованных горнопромышленных объектов Юго-Восточного Забайкалья – Шерловогорского олово-полиметаллического, Спокойнинского вольфрамового, Жипкошинского сурьмяного, Малокулундинского и Орловского редкометалльных месторождений – находится в пределах Онон-Аргунской степи и представляет собой преимущественно степное среднегорье с небольшими участками лесостепных ландшафтов в привершинной части северных склонов. Здесь наблюдается сочетание степных и подтаежных ландшафтов (Солодухина, Помазкова, 2014). Следствием открытой разработки месторождений стало развитие на территориях, непосредственно прилегающих к месторождениям, техногенных ландшафтов, в которых выделяются два типа местности: обнаженный карьерно-отвалный и антропогенных донно-карьерных озер, питание которых осуществляется за счет подземных вод и атмосферных осадков.

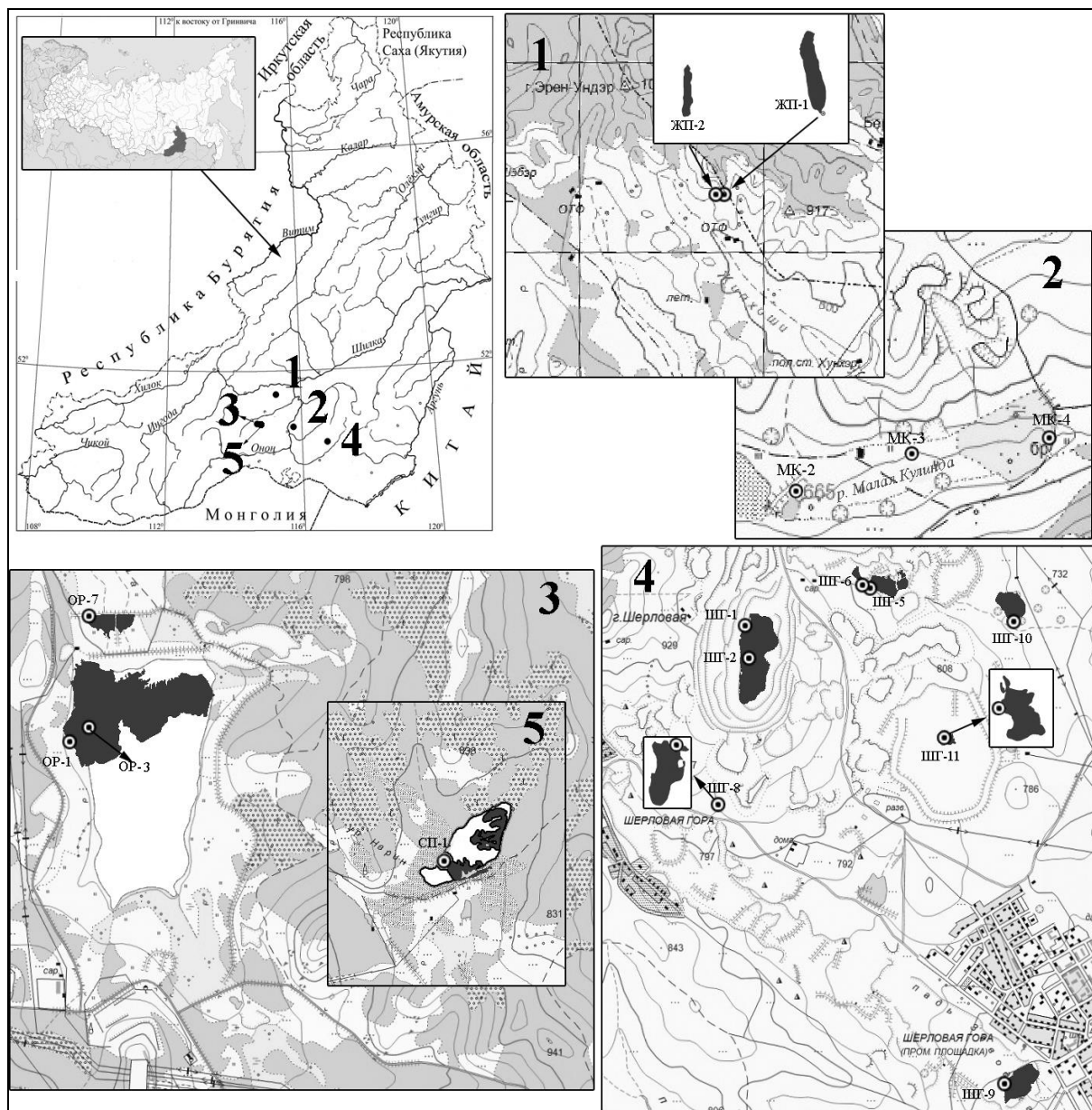
Территория Шерловогорского месторождения находится в пределах одноименного гранитного массива, который характеризуется комплексным оловополиметаллическим оруденением. Месторождение разрабатывалось открытым способом одноименным горно-обогатительным комбинатом (ГОК) до 1995 г. В пределах Орловско-Спокойнинского рудного узла выделяются два рудных поля: Орловское и Спокойнинское. Орловское рудное поле включает одноименное танталовое месторождение. Добыча танталовых руд на Орловском месторождении велась открытым способом. Хвостохранилище Орловского ГОКа, в которое ранее производился сброс хвостов обогащения вольфрамовых и танталовых руд, сейчас заполняется пульпой переработки руд Спокойнинского месторождения. Спокойнинское месторождение относится к грейзеновому вольфрамит-касситеритовому типу. Разработка открытым способом месторождения ведется и в настоящее время. До пуска Орловского ГОКа продукты переработки вольфрамовой руды сбрасывались в собственное хвостохранилище. В Мало-Кулиндинском месторождении по минеральному составу выделяются кварц-микроклиновые и кварц-микроклин-альбитовые пегматиты. Разработка месторождения велась открытым способом Орловским ГОКом до 1999 г. На Жипкошинском месторождении с 2006 по 2018 гг. двумя карьерами добывали сульфидно-сурьмяный концентрат.

Полевые исследования проводились в июне 2021 г. на водоемах горнопромышленных объектов Шерловогорского (семь водоемов), Жипкошинского, Орловского (по два водоема) и Спокойнинского (один водоем) месторождений. В районе Малокулундинского месторождения опробовалась р. Малая Кулинда (приток р. Онон) в двух точках и образованный ею подпрудный водоём. Всего обследовано 14 водных объектов (рис. 1).

Рудный карьер Шерловогорского месторождения является самым глубоким (более 35 м) и обширным по площади (0.143 км<sup>2</sup>). Глубина Орловского хвостохранилища, площадь которого 0.049 км<sup>2</sup>, в центральной части достигала 3.6 м. Хвостохранилище Шерловогорского месторождения самое мелководное, его наибольшая глубина не превышала 0.5 м. Площадь водной поверхности других водоемов варьировала от менее 0.001 км<sup>2</sup> (подпрудное озеро – р. Малая Кулинда и Жипкошинские карьеры) до 0.049 км<sup>2</sup> (подпрудное озеро у пос. Шерловая Гора).

*Сбор и обработка проб.* Отбор гидрохимических и гидробиологических проб осуществлялся в прибрежье (глубина – до 0.5 м), по Шерловогорскому карьеру и Орловскому хвостохранилищу и в

центральной (глубоководной) части водоемов. Химический анализ вод выполнялся в аттестованной лаборатории Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (г. Чита), определение анионов, биогенных компонентов, перманганатной окисляемости осуществлялись общепринятыми методами. Основные катионы и металлы определялись атомно-адсорбционным методом на спектрофотометре SOLAAR M6. Дополнительно отбирались пробы воды для их последующего анализа методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Химический анализ воды методом ICP-MS проводился в Институте геохимии имени А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) на приборе ELEMENT2.



**Рис. 1.** Схема расположения пунктов опробования техногенных водоёмов рудных месторождений. Условные обозначения: 1 – Жипкошинское (ЖП-1, ЖП-2 – карьерные озера); 2 – Малокулундинское (МК-2 – подпрудное озеро, МК-3 и МК-4 – р. Малая Кулинда); 3 – Орловское (ОР-1, ОР-3 – хвостохранилище, ОР-7 – озеро ниже хвостохранилища), 4 – Шерлогогорское (ШГ-1, ШГ-2 – рудный карьер, ШГ-5, ШГ-6 – пруды, ШГ-8 – озеро под отвалами рудного карьера, ШГ-9 – подпрудное озеро у пос. Шерловая Гора; ШГ-10 – карьерное озеро, ШГ-11 – хвостохранилище), 5 – Спокойнинское (СП-1 – хвостохранилище).

Сбор и анализ проб фито-, зоопланктона и макроводорослей проводился с использованием стандартных методик (Киселев, 1969; Водоросли, 1989; Садчиков, 2003). Пробы фитопланктона отбирались из одного-трех горизонтов (поверхность, глубина прозрачности, дно), пробы зоопланктона – тотально (дно-поверхность) средней сетью Джели (размер ячеек сита 0.064 мм) и процеживанием 100 л воды (интегральная проба) через сеть (ячейка 0.073 мм). В сборах определяли видовой состав и количественные характеристики (численность и биомассу). Биомассу водорослей определяли по объему отдельных клеток или колоний водорослей (Садчиков, 2003), у зоопланктона – по уравнениям связи длины тела и сырой массы (Ruttner-Kolisko, 1977; Балушкина, Винберг, 1979). Классификация таксонов и синонимы каждой группы водорослей приведены согласно электронной базе AlgaeBase (Guiry, Guiry, 2019); название видов и таксонов зоопланктона дано в соответствии с современной номенклатурой (WoRMS, 2022). Одновременно с отбором проб проводились определения температуры воды и удельной электрической проводимости (с помощью мультипараметрового анализатора WTW Multi 340I (Германия)), окислительно-восстановительного потенциала и водородного показателя – с помощью анализатора воды «Анион 7051». Глубину измеряли лотом, прозрачность воды – по белому диску Секки.

*Анализ данных.* Математическая обработка полученных данных проводилась с использованием пакета программ Microsoft Excel 2010 и STATISTICA 10. Для изучения взаимосвязей структурных характеристик планктона (общее число видов фито- и зоопланктона, число видов в таксономических группах (Cyanobacteria, Bacillariophyta, Cryptophyta, Chrysophyta, Charophyta, Chlorophyta, Euglenophyta, Dynophyta, Rotifera, Copepoda, Cladocera), численность и биомасса всего фито- и зоопланктона и отдельно таксономических групп) и абиотических факторов среды (температура воды, общая минерализация, pH, Eh, макро- и микрокомпонентный состав, перманганатная окисляемость, биогенные элементы) применяли факторный анализ методом главных компонент (РСА). Нормирование данных проводили по делению исходных данных на среднее квадратичное отклонение соответствующих переменных (Шипунов и др., 2014). Абсолютное значение нагрузки выше 0.7 принимали за существенную связь.

### Результаты и их обсуждение

*Физико-химическая характеристика изученных водоемов.* Морфометрические и физико-химические параметры исследованных водоемов существенно различались (табл. 1).

Температура воды в водоемах варьировала от 11.6°C (Спокойнинское хвостохранилище, Жипкошинский карьер) до 24°C (Шерловогорское хвостохранилище). Прозрачность воды в глубоководном рудном карьере составляла 3 м, в Орловском хвостохранилище – 0.6 м.

Воды в Шерловогорском рудном карьере кислые (pH – от 2.99 до 3.14). С увеличением глубины отмечались вариации физико-химических показателей состава вод. В верхнем слое зафиксирован температурный скачок, температура воды снижалась от 15.7°C (на поверхности) до 5°C (у дна). Отмечалось также заметное понижение значений Eh (от 508 до 270 мВ), концентрации растворенного кислорода (от 0.44 до 0 г/л) и, напротив, возрастание минерализации от 3026<sup>1</sup> до 6210 мг/л (с учётом концентраций Al и тяжелых металлов), а также концентраций ионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup> и металлов. Величина pH сохранялась в сильнокислой области вне зависимости от глубины водоема. По химическому составу воды карьера сульфатные магниевые-кальциевые и цинково-магниевые-кальциевые (табл. 1).

Воды Шерловогорского хвостохранилища также характеризовались низкой величиной pH (3.03). Отмечен значительный рост минерализации до 9065 мг/л за счет накопления SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, катионов и металлов. По химическому составу воды сульфатные кальциевые-магниевые (табл. 1). Слабокислые значения pH (5.9 и 6.04) имели воды прудов, находящихся недалеко от рудного карьера. Минерализация в них изменялась от 2839 до 5191 мг/л. Химический тип воды – сульфатный кальциевый-магниевый (табл. 1).

Значительная трансформация физико-химических параметров подземных вод в результате техногенного нарушения геологической среды в процессе отработки Шерловогорского

---

<sup>1</sup> Очень высокая минерализация характерна для кислых водоемов, где идет интенсивное образование сульфатов (Эпова и др., 2018; Еремин, Эпова, 2018).

месторождения выразилась в формировании сильнокислых и кислых сульфатных вод. Воды рудного карьера характеризуются вертикальной стратификацией физико-химических параметров (термо-, окси-, хемоклин), что также отмечается и в других кислых карьерных озерах Башкортостана, Южного Урала (Удачин и др., 2008, 2009), Австрии, Германии (Weithofa et al., 2010; Moser, Weisse, 2011), Канады (Gammons et al., 2009).

**Таблица 1.** Физико-химические параметры техногенных вод горнопромышленных объектов рудных месторождений Восточного Забайкалья.

Параметры*	Точки отбора проб											
	ШГ-1, 2	ШГ-5	ШГ-6	ШГ-8	ШГ-9	ШГ-10	ШГ-11	ОР-1, 3	ОР-7	СП-1	МК-2, 3, 4	ЖП-1, 2
S, км <sup>2</sup>	0.143	0.033	0.006	0.001	0.049	0.036	0.005	0.513	0.025	0.025	12**	0.001
T, °C	5-15.7***	18.2	21.6	18.1	17.6	15.5-16.6	24.0	14.8-17.6	13.0	11.6	13.8-15	11.6-12.0
pH	2.99-3.14	6.04	5.90	8.80	7.82	7.73	3.03	7.77-7.80	7.53	6.77	6.99-7.08	8.27-8.29
Eh, мВ	270-508	265	261	181	170	145	295	142-172	174	190	184-191	211-232
ПО, мг/л	0.50-34.2	0.78	2.25	2.68	2.83	1.32	0.70	2.75-2.98	3.69	18.0	16.7-27.6	0.94
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л	0	0	0	73.3	211.7	172.6	0	166-167	238	47.1	40.6-45.7	49.3-72.1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л	2076-3608	1993	3448	210.7	130.9	1496	5879	94.2-96.6	134	9.09	18.4-25.8	52.3-157.9
Ca <sup>2+</sup> , мг/л	363.1-600	207.2	355.1	41.7	46.9	371.6	607	40.6-42.4	63.9	12.8	10.9-14.5	28.1-44.3
Mg <sup>2+</sup> , мг/л	159.1-321	224.5	317	30.6	33.2	143.8	494	9.26-9.34	15.7	3.58	3.46-4.42	6.25-10.6
Na <sup>+</sup> , мг/л	23.5-35.1	25	31.4	22.7	34.3	49.4	182.7	34.9-35.4	50.3	3.60	6.01-7.78	3.82-10.9
K <sup>+</sup> , мг/л	4.37-12.1	3.65	6.73	0.39	1.60	4.17	19.1	15.5	7.77	9.89	2.34-5.95	1.3-1.77
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л	0.62-1.78	5.13	7.77	1.03	19.6	0.82	1.88	9.82	2.25	0.78	1.18-1.71	1.80-2.64
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/л	0.01-0.52	0.11	0.15	0.01	0.15	0.01	0.01	0.20-0.22	0.28	0.01	0.003-0.01	0.01-0.08
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/л	1.45-1.88	0.21	0.31	<0.1	<0.1	0.54	0.12	0.49-0.56	<0.1	0.59	0.42-0.70	0.10-1.24
Si, мг/л	17.9-31.1	4.36	4.98	0.93	2.02	8.18	18.4	2.7-2.7	4.6	1.70	5.68-6.71	3.68-7.87
P <sub>общ</sub> , мг/л	0.04-0.05	0.05	0.05	0.10	0.11	0.08	0.05	0.06-0.09	0.08	0.38	0.08-0.16	0.20-0.24
Σионов, мг/л	3026-6210	2839	5191	394	508	2249	9065	383-389	529	92	85.9-108	146-333
Al, мг/л	28.6-49.8	8.6	12.6	0.12	0.03	0.03	131	0.08-0.10	0.04	0.24	0.03-0.05	0.02
Mn, мг/л	66.2-184	50.4	155	0.05	0.02	0.07	296	0.64-0.68	0.23	0.03	0-0.01	0.01
Fe, мг/л	23.5-568	0.06	0.10	0.13	0.03	0.04	0.48	0.03-0.05	0.15	0.25	0.10-0.11	0.02
Co, мг/л	0.69-2.01	0.20	1.56	4·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	4·10 <sup>-4</sup>	4.03	5·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	2·3·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-4</sup>
Cu, мг/л	0.95-2.70	0.61	1.17	4·10 <sup>-3</sup>	3·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	8.35	1·10 <sup>-3</sup>	8·10 <sup>-4</sup>	0.01	2·3·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-3</sup>
Zn, мг/л	266-810	294	830	0.10	0.04	0.05	1313	0-0.01	3·10 <sup>-3</sup>	0.01	0.01	3·10 <sup>-3</sup>
As, мг/л	0.01-1.45	2·10 <sup>-3</sup>	4·10 <sup>-3</sup>	0.05	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2·3·10 <sup>-3</sup>	0.68
Cd, мг/л	2.01-3.0	6.31	13.1	9·10 <sup>-4</sup>	6·10 <sup>-4</sup>	8·10 <sup>-4</sup>	38.9	4·5·10 <sup>-4</sup>	3·10 <sup>-4</sup>	6·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-5</sup> -1·10 <sup>-4</sup>	6·7·10 <sup>-5</sup>
Pb, мг/л	0.14-0.34	0.47	0.66	3·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	9·10 <sup>-4</sup>	1.70	8·10 <sup>-4</sup>	8·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	7·10 <sup>-4</sup> -2·10 <sup>-3</sup>	4·5·10 <sup>-4</sup>
Sb, мг/л	0.78-1.02	0.95	2.49	3.14	1.96	1.94	1.71	0.10-0.17	0.26	0.29	0.81-1.66	4212-6982
ХТВ	SO <sub>4</sub> Mg-Ca****	SO <sub>4</sub> Ca-Mg		HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Ca-Mg	SO <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub> Ca-Mg	SO <sub>4</sub> Mg-Ca	SO <sub>4</sub> Ca-Zn-Mg	SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> Na-Ca		HCO <sub>3</sub> Mg-Ca	SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> Mg-Ca	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Mg-Ca

**Примечания к таблице 1.** Точки отбора проб представлены на рисунке 1. \*Параметры: S – площадь, T – температура воды, Eh – окислительно-восстановительный потенциал, ПО – перманганатная окисляемость, ХТВ – химический тип воды, \*\* – общая протяженность реки (км), \*\*\* – min-max, \*\*\*\* – в пробе ШГ-2 тип воды SO<sub>4</sub> Zn-Mg-Ca.

Воды остальных обследованных водоемов нейтральные и слабощелочные (pH – 6.04-8.29).

Значения Eh варьировали в пределах от 142 до 232 мВ. Минерализация изменялась от 92 до 2249 мг/л. По химическому составу воды преимущественно сульфатные с разным соотношением магния и кальция (табл. 1).

Воды р. Малая Кулинда ультрапресные и пресные (85.9-108 мг/л) с нейтральными значениями рН (6.99-7.08) и слабой окислительной (переходной) обстановкой (184-191 мВ). Химический состав вод гидрокарбонатно-сульфатный магниевый-кальциевый.

По формам азота наиболее высокое содержание в виде нитратного иона в воде подпрудного озера у пос. Шерловая гора имеет, по-видимому, биогенную природу, тогда как в воде Орловского хвостохранилища источником  $\text{NO}_3^-$  является остаточный азот от взрывчатых веществ в переработанных рудах, как это показано по другим месторождениям региона (Замана и др., 2020). Немногом выше фонового содержание неорганического азота в воде одного из Жипкошинских карьеров, но уже в аммонийной форме, переход в которую может быть вызван пониженным значением Eh. Содержание общего фосфора (при содержании выше 0.1 мг/л доминирует органическая форма) повышено в пробах воды Спокойнинского хвостохранилища и Жипкошинских карьеров, причиной могут быть обогащенность руд фосфатными минералами или особенности состава биоты и биотических процессов в этих водоёмах. По содержанию кремния выделяются воды Шерловгорского карьера и хвостохранилища, что обусловлено высокой кислотностью среды, усиливающей выщелачивание силикатных и алюмосиликатных минералов горных пород и препятствующей мобилизации кремния вторичными гидрогенными минералами.

Неблагоприятные для миграции тяжелых металлов условия определяют относительно невысокие их содержания в водах хвостохранилища Орловского ГОКа и озера, расположенного ниже его дамбы. Повышенные концентрации в этих водах были зафиксированы лишь для марганца и железа. Спокойнинское хвостохранилище в течение длительного времени не эксплуатировалось, и воды его пруда характеризовались невысоким содержанием металлов. Относительно низкие концентрации тяжелых металлов в водах, дренирующих Малокулиндинское и Жипкошинское месторождения, определяются их геологическим строением, а также неблагоприятной средой миграции. Одновременно с этим в нейтральных и щелочных водах активно мигрируют и накапливаются такие высокотоксичные элементы, как мышьяк и сурьма, концентрации которых достигают весьма высоких значений в водах двух карьерных озер Жипкошинского месторождения (табл. 1).

Главной отличительной особенностью изученных водных объектов является широкий диапазон значений рН водной среды, определяющий наличие различных по кислотности типов вод (Чечель, Замана, 2009). Кислые воды с аномально высокими концентрациями тяжёлых металлов формируются в результате окисления входящих в состав руд сульфидных минералов при отсутствии или недостаточном для нейтрализации кислотности содержании в рудах или вмещающих породах карбонатных минералов. В противном случае, как это показано по другим полиметаллическим месторождениям Восточного Забайкалья, воды имеют нейтральную или щелочную среду и существенно более низкие концентрации тяжелых металлов (Замана, Чечель, 2015).

*Фитопланктон.* В фитопланктоне обследованных водоемов зарегистрировано 75 таксонов рангом ниже рода из 8 отделов (Chlorophyta – 29 таксонов, Bacillariophyta – 25, Cyanobacteria – 5, Chrysophyta – 4, Cryptophyta, Charophyta, Dinophyta и Euglenophyta – по 3 таксона). Наименьшее число таксонов (2) отмечено в Шерловгорском хвостохранилище, наибольшее (52) – в подпрудном озере у пос. Шерловая Гора. В Шерловгорском рудном карьере водоросли планктона не обнаружены.

В составе фитопланктона преобладали Chlorophyta (8–59%) и Bacillariophyta (14–50%). Зеленые и диатомовые водоросли имели наибольший вес в Шерловгорском и Орловском хвостохранилищах, диатомовые – в Спокойнинском хвостохранилище и подпрудном озере (р. Малая Кулинда). Доминирующий комплекс фитопланктона носил преимущественно хлорофитово-диатомовый характер с некоторой долей участия Chrysophyta и Cryptophyta. В подпрудном озере (р. Малая Кулинда) и Спокойнинском хвостохранилище в составе доминирующего комплекса преобладали Chlorophyta (72–86% общей численности), в Орловском хвостохранилище – Bacillariophyta (15–61%), Chlorophyta (до 20%) и Chrysophyta (14–29%). В водных объектах Шерловгорского месторождения характер доминирующего комплекса диатомово-хлорофитовый при заметном участии криптофитовых (в прудах до 90%) и золотистых (до 30% водорослей).

Биотопический анализ флоры показал, что большего разнообразия достигали планктонные (39%) и факультативно-планктонные (42%) водоросли. Согласно фитогеографическому анализу большая часть водорослей (73%) являются широко распространенными. На некоторую специфику флоры исследуемых водоемов указывают обнаруженные голарктические, арктоальпийские и бореальные виды из Chlorophyta и Chrysophyta. По отношению к минерализации альгофлора представлена пресноводными видами – 88% и эвригалинными видами – 12%. Среди галофилов отмечены *Nitzschia graciliformis* Lange-Bertalot & Simonsen 1978, *Oocystis lacustris* Chodat 1897. Распределение видов по отношению к pH следующее: 61% – индифференты, 39% – алкалифилы. К алкалифилам относится такой массовый и часто встречаемый вид, как *Fragilaria radians* (Kützing) D.M. Williams & Round 1987.

Численность и биомасса водорослей изменялись в широких пределах, от 1.84 (пруд Шерловогорского месторождения) до 1627.68 тыс. кл./л (Орловское хвостохранилище) и от 0.58 (Шерловогорское хвостохранилище) до 1691.08 мг/м<sup>3</sup> (озеро под отвалами рудного карьера) соответственно (табл. 2).

**Таблица 2.** Некоторые показатели фито- и зоопланктона техногенных вод горнопромышленных объектов рудных месторождений Восточного Забайкалья.

Фитопланктон										
П*	ШГ-5	ШГ-6	ШГ-8	ШГ-9	ШГ-10	ШГ-11	ОР-3	ОР-7	ОР-8	МК-2
n**	4	4	37	52	9	2	22	29	13	8
N***	1.84	863.63	244.15	1502.55	141	1.93	236.25-356.81	1627.68	132.63	14.20
V****	1.21	109	133.76	1619.08	374.91	0.58	339.76-553.88	727.95	20.24	7.43
Зоопланктон										
П	ШГ-8	ШГ-9	ШГ-10	ОР-3	ОР-7	ОР-8	МК-2	ЖП-2*****		
n	5	12	9	32	17	12	3	2		
N	12.05	57.63	219.02	5.89-141.60	601.44	228.21	58.80	–		
V	19.79	46.26	380.37	16.48-297.47	774.34	6156.6	1447.28	–		

**Примечания к таблице 2.** Точки отбора проб представлены на рисунке 1. \*П – показатель, \*\*n – число видов, \*\*\*N – численность, тыс. кл./л (для фитопланктона) и тыс. экз./м<sup>3</sup> (для зоопланктона), \*\*\*\*V – биомасса, мг/м<sup>3</sup>, \*\*\*\*\* – качественная проба.

Количественно в фитопланктоне преобладали зеленые и диатомовые водоросли, формируя соответственно до 90% и 85% общей численности и до 70% и 92% общей биомассы. Массовыми являлись 7 видов: у золотистых – *Dinobryon sertularia* Ehrenberg 1834, у диатомовых – *Fragilaria crotonensis* Kitton 1869, *F. radians*, *Lindavia comta* (Kützing) Nakov, Gullory, Julius, Theriot & Alverson 2015, у криптофитовых – *Cryptomonas erosa* Ehrenberg 1832, *C. caudata* Massart 1920, у зеленых – *Monoraphidium contortum* (Thuret) Komárková-Legnerová in Fott 1969, *Schroederia setigera* (Schroder) Lemmermann 1898. В состав фитопланктона водоёмов Шерловогорского месторождения наибольший вклад вносили виды рода *Cryptomonas* (до 80% по численности и биомассы). В водах водоемов Орловского месторождения преобладали диатомовые (*F. crotonensis* и *F. radians* (48-62%)) и золотистые (*D. sertularia* (до 30%)) водоросли. В Спокойнинском хвостохранилище – *S. setigera* (80%).

Водоемы с кислой средой (pH ≤ 3) являются экстремальным местообитанием для гидробионтов (Seckbach et al., 2007). Наши исследования показали отсутствие водорослей в кислых условиях. В альгофлоре закисленных рудными дренажными водами озерах Германии (Seckbach et al., 2007; Röncke et al., 2010; Weithoff et al., 2010) отмечено присутствие около 10 видов при доминировании стенобионтных наннофлагеллят *Ochromonas* (Chrysophyta), *Chlamydomonas* (Chlorophyta), *Gymnodinium* (Dunophyta). В фитопланктоне обследованных нами водоемах при pH в диапазоне 3-6 отмечено 2-4 вида водорослей из отделов Bacillariophyta, Cryptophyta и Chlorophyta. Наши данные

подтверждают, что видовое богатство водорослей в неагрессивных и нейтрально-слабощелочных водах (рН 7-8.8) значительно выше, чем в водоемах с низким значением рН (Lessmann et al., 2000; Wollmann et al., 2000; Nixdorf et al., 2001; Романов и др., 2011; Копырина, 2016). В водных объектах Шерловогорского и Орловского ГОКов в составе водорослей планктона число отмеченных систематических групп изменялось от 5 до 7, а количество таксонов рангом ниже рода было максимальным.

Среди нитчатых водорослей зарегистрировано 8 таксонов из 4 отделов (Chlorophyta (4 вида), Ochrophyta (2) и Cyanobacteria, Charophyta (по 1 виду)). Макроводоросли в водоемах образовывали одно, реже двух видовые скопления. Встречались нитчатки на мелководных участках, среди водной растительности (водные объекты Шерловогорского месторождения), а также в виде спутанных нитей в метафитоне (карьеры Жипкошинского месторождения). В Шерловогорском рудном карьере нитчатые водоросли не обнаружены.

Обнаруженные виды макроводорослей широко встречаются и в естественных водоемах Забайкальского края. Так, *Cladophora fracta* (O.F. Müller ex Vahl) Kützing 1843 развивается преимущественно в водоемах со сформированной водной экосистемой, в то время как *Ulothrix tenerrima* (Kützing) Kützing 1843 более тяготеет к нарушенным участкам или молодым водоемам. Для представителей рода *Tribonema* характерно присутствие в водоемах и водотоках, контактирующих с почвой (Куклин, 2014).

**Зоопланктон.** В зоопланктоне отмечено 63 таксона рангом ниже рода, среди них Rotifera – 40 видов и подвидов, Cladocera – 13 видов и Copepoda – 10. Общее количество таксонов изменялось от 2-3 (Жипкошинский карьер и подпрудное озеро – р. Малая Кулинда) до 32 (Орловское хвостохранилище). В рудном карьере, хвостохранилище и прудах Шерловогорского месторождения беспозвоночные планктона не обнаружены.

В зоогеографическом отношении виды зоопланктона имеют широкое распространение (космополиты – 52%, голаркты – 35%, палеаркты – 15%). Такие виды, как *Brachionus quadridentatus* Hermann, 1783, *Euchlanis dilatata* Ehrenberg, 1832, *Lecane luna* (Müller, 1776), *Cephalodella gibba* Ehrenberg, 1830, *Trichocerca longiseta* (Schrank, 1802) населяют все биогеографические зоны; виды *Mytilina mucronata* (Müller, 1773), *Kellicottia longispina* Kellicott, 1879, *Daphnia galeata* G.O. Sars, 1864, *Alona guttata* G.O. Sars, 1862 представляют только Голарктическую зону, копеподы *Cyclops vicinus* Uljanin, 1875 и *Neurodiaptomus incongruens* (Poppe, 1888) – палеарктическую.

По биотопической приуроченности преобладают эврибионтные виды (35%), литоральные и фитофильные виды составляют соответственно 24 и 22%. К планктонным видам отнесено 16%, к бентическим – 3%. Среди эврибионтов встречались *C. gibba*, *L. luna*, *E. dilatata*, *Brachionus angularis* Gosse, 1851, *Keratella quadrata* (Müller, 1786), *Chydorus sphaericus* (O.F. Müller, 1785), *Coronatella rectangula* (G.O. Sars, 1862), *Eucyclops serrulatus* (Fischer, 1851). К представителям литорально-фитофильной фауны относятся коловратки родов *Euchlanis*, *Trichocerca*, *Mytilina*, *Notommata*, *Testudinella* и рачки семейства Chydoridae.

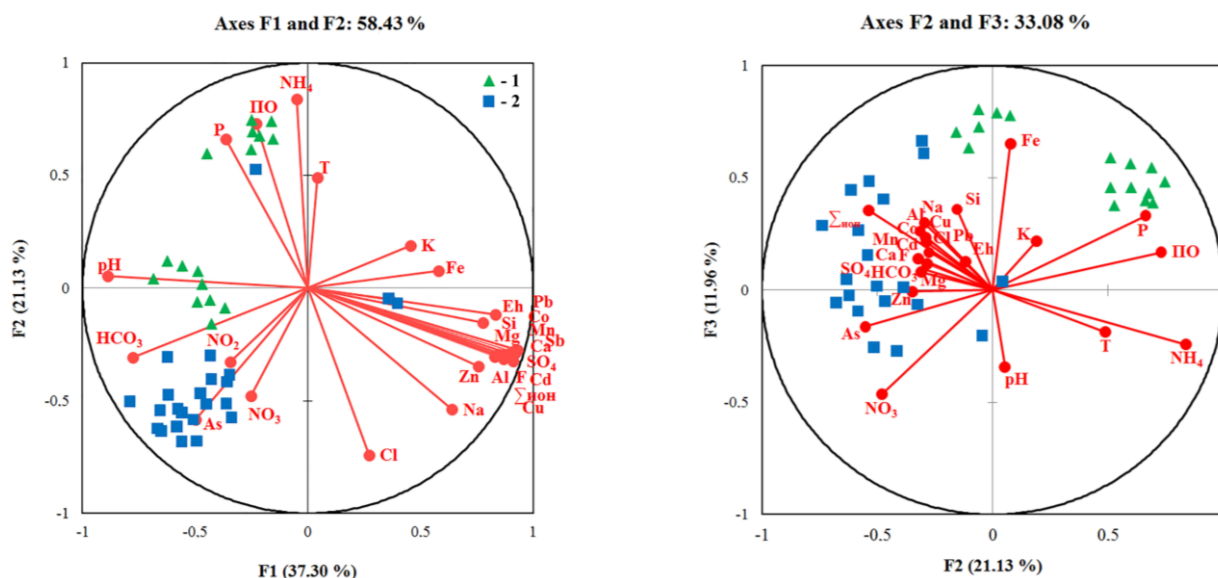
Количественные показатели зоопланктона варьировали в широких пределах. Общая численность изменялась от 5.89 до 601.44 тыс. экз./м<sup>3</sup>, общая биомасса – от 16.48 до 1447.28 мг/м<sup>3</sup>. Низкая плотность гидробионтов отмечалась в центральной части Орловского хвостохранилища, наибольшая – в водоеме ниже Орловского хвостохранилища (табл. 2).

Структура зоопланктонного сообщества в водоемах различалась. В Орловском хвостохранилище и в подпрудном водоеме (р. Малая Кулинда) доминировали Cyclopoida в стадии науплиусов и копеподитов. В хвостохранилище на долю копепод (*N. incongruens*, *E. serrulatus*, *C. vicinus*, *Diacyclops bicuspidatus* (Claus, 1857)) суммарно приходилось 58-88% всей численности и 94-98% всей биомассы зоопланктона. В речной запруде основу численности (90%) и биомассы (88%) формировал *Cyclops furcifer* Claus, 1857. В Спокойнинском хвостохранилище основу численности и биомассы формировали Crustacea (*C. vicinus* – 53% и 13% и *Daphnia curvirostris* Eylmann, 1887 – 22% и 85%). В зоопланктоне подпрудного озера (пос. Шерловая Гора) по численности преобладали веслоногие (*E. serrulatus* – 38%) и коловратки (*Polyarthra longiremis* (Carlin, 1943) – 35% и *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851) – 17%), по биомассе – Rotifera (69%) и Cladocera (20%). В водоеме, расположенном ниже Орловского хвостохранилища, при численном преобладании Rotifera (*B. angularis* – 76% и *K. quadrata* – 9%), основу биомассы формировали науплии Cyclopoida (49%). В водоемах

Шерловогорского ГОКа (карьерное озеро и озеро, расположенное под отвалами рудного карьера) по численности преобладали коловратки (*Hexarthra mira* (Hudson, 1871) – 79% в первом, и *Pompholyx complanata* Gosse, 1851 – 27%, *Keratella* sp. – 18%, *Notommata collaris* (Ehrenberg, 1832) – 9% во втором) и науплии веслоногих (12 и 45% соответственно), по биомассе – ювенильные стадии Copepoda (51 и 81% соответственно).

В кислых и слабокислых водах (pH = 3-6) Шерловогорского месторождения, как и в Беловском отстойнике (Романов и др., 2011), беспозвоночные не встречались. В Австрийском озере при pH = 5-6 обнаружен только один вид коловратки – *Cephalodella* sp. (Moser, Weisse, 2011). В зоопланктоне карьерных озер США и Германии (pH = 2.3-3.9; Deneke, 2000; Wollmann et al., 2000) отмечено обитание 5-11 видов зоопланктона. Исследованиями J.J. Leppänen (2018) показано, что вид-убиквист *Ch. sphaericus* характеризуется повышенной стрессоустойчивостью и является наиболее устойчивым к воздействию шахтных вод и может достигать высокой плотности в кислых водах. Однако в наших исследованиях этот вид, хотя и встречался чаще других организмов, не являлся структурообразующим компонентом зоопланктона (доля по численности составляла не более 2%). Диапазон pH, при котором встречался *Ch. sphaericus*, соответствовал 7.5-8.3. В слабощелочных водоемах (pH = 7.5-7.8) Шерловогорского и Орловского ГОКов видовое богатство гидробионтов выше по сравнению с другими обследованными водоемами. Видовая структура зоопланктона указанных водоемов имеет сходные черты с техногенными водоемами Забайкалья (Афониная, Афонин, 2015, 2017, Афониная, Итигилова, 2012), Польши (Goździewska et al., 2021), Австрии (Moser, Weisse, 2011), что выражается в доминировании в зооценозе ювенильных стадий Cyclopoidea и Rotifera.

*Факторы среды, определяющие развитие фито- и зоопланктона.* Для выявления ведущих факторов, определяющих изменение структурных показателей водорослей и беспозвоночных планктона, проведен факторный анализ методом главных компонент. Анализ переменных позволил выделить три главные компоненты, определяющие 70.39% дисперсии фактических данных. Остальные вносили незначительный вклад в общую дисперсию и для дальнейшего анализа не включались (рис. 2).



**Рис. 2.** Расположение физико-химических показателей и основных характеристик фито- (2) и зоопланктона (1) техногенных вод рудных месторождений в пространстве трех компонент. *Условные обозначения:* обозначения абиотических параметров представлены в таблице 1.

Первая компонента (F1), на долю которой приходилось 37.30% общей дисперсии, характеризовалась положительной связью с содержанием сульфатов, магния, кальция, Eh, концентрацией металлов и суммой ионов и отрицательной – с pH и концентрацией гидрокарбонатов. Согласно анализу, положительные факторные нагрузки определялись количественными

показателями Cryptophyta, отрицательные – числом видов, численностью и биомассой Cyanobacteria, Bacillariophyta, Chrysophyta, Charophyta, Chlorophyta, Euglenophyta, Dynophyta и Rotifera. Вторая компонента ( $F_2 = 21.13\%$ ) характеризуется положительной связью с содержанием органического вещества (аммонийный азот, общий фосфор, перманганатная окисляемость – в порядке убывания факторной нагрузки), определяя количественные показатели ракообразных. Третья компонента ( $F_3 = 11.96$ ) тесно связана с концентрацией Fe, которая влияет на численность всего зоопланктона и коловраток.

Согласно полученным данным, в техногенных водоемах наибольшую чувствительность к повышенному содержанию микроэлементов проявили криптофитовые водоросли, а в природных озерах (Габышев, Габышева, 2020; Шаров, 2020) более требовательными к концентрации химических элементов являются диатомеи и зеленые водоросли. Наши результаты подтверждают (Kalın et al., 2001; Moser and Weisse 2011; Ferrari et al. 2015; Pocięcha et al., 2018; Goździejewska et al., 2021), что гидрохимические параметры (рН, высокая концентрация сульфатов, гидрокарбонатов, металлов, биогенных элементов) потенциально могут влиять на разнообразие и количественное развитие коловраток и ракообразных.

### Выводы

Техногенные водоемы рудных месторождений Юго-Восточного Забайкалья значительно различаются по морфометрическим, физико-химическим и гидробиологическим показателям. Отличительной особенностью водоемов является широкий диапазон значений рН среды и суммы ионов воды. По химическому составу воды преимущественно сульфатные и гидрокарбонатно-сульфатные, с разным соотношением магния и кальция. Гидробиологическая часть настоящего исследования позволила определить видовой состав, количественные показатели и комплекс доминирующих видов альгофлоры и зоопланктона. Анализ влияния экологических факторов на уровень развития водорослей и беспозвоночных планктона показал, что наибольшее влияние на них оказывают гидрохимические факторы, определяющие общую минерализацию воды, микро- и макрокомпонентный состав, органическое вещество и рН.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках темы Госзадания фундаментальных научных исследований ИПРЭК СО РАН (№ госрегистрации 121032200070-2, «Геоэкология водных экосистем Забайкалья в условиях современного климата и техногенеза, основные подходы к рациональному использованию вод и их биологических ресурсов»).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афонина Е.Ю., Афонин А.В. 2015. Фауна рыб и планктонных беспозвоночных некоторых притоков верхнего течения реки Онон (Забайкальский край) // Амурский зоологический журнал. Т. VII. № 1. С. 3-13.
- Афонина Е.Ю., Афонин А.В. 2017. Оценка состояния гидробиоценозов малых водотоков бассейна р. Аргунь // Теоретическая и прикладная экология. № 3. С. 57-65.
- Афонина Е.Ю., Итигилова М.Ц. 2012. Качественный состав коловраток и низших ракообразных бассейна р. Шилка // Записки ЗО РГО. № 131. С. 40-51.
- Балушкина Е.В., Винберг Г.Г. 1979. Зависимость между длиной и массой тела планктонных ракообразных // Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озёр / Ред. Г.Г. Винберг. Л.: Наука. С. 58-79.
- Водоросли. Справочник. 1989 / Ред. С.П. Вассер, Н.В. Кондратьева, Н.П. Масюк. Киев: Наукова думка. 608 с.
- Габышев В.А., Габышева О.И. 2020. К изучению влияния тяжелых металлов на развитие фитопланктона озер г. Якутска и окрестностей // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. Т. 25. № 4. С. 81-91.
- Грищенко Н.С. 1999. Классификация антропогенных водоемов по уровню технического обустройства (технизированности). М.: Мелиорация и водное хозяйство. 61 с.
- Замана Л.В., Абрамова В.А., Хвостова Т.Е., Чечель Л.П. 2020. Соединения азота в водах зоны техногенеза рудных месторождений Восточного Забайкалья // Горный журнал. № 3. С. 31-35.
- Замана Л.В., Чечель Л.П. 2015. Гидрогеохимические особенности зоны техногенеза полиметаллических месторождений Юго-Восточного Забайкалья // Успехи современного естествознания. № 1. С. 33-38.
- Киселев И.А. 1969. Планктон морей и континентальных водоемов. Л.: Наука. Т. 1. 658 с.
- Копырина Л.И. 2016. Структура и видовой состав водорослей техногенных водоемов (бассейн р. Анабар, Северо-Западная Якутия) // Современные проблемы науки и образования. № 4. С. 207-213.
- Куклин А.П. 2014. Макроскопические водоросли в водоемах Сохондинского заповедника и охранный зоне //

- Сборник трудов Сохондинского заповедника исследования в охранной зоне. Чита: Экспресс-издательство. С. 31-43.
- Романов Р.Е., Ермолаева Н.Е., Бортникова С.Б. 2011. Оценка влияния тяжёлых металлов на планктон в техногенном водоеме // Химия в интересах устойчивого развития. № 19. С. 350-312.
- Садчиков А.П. 2003. Методы изучения пресноводного фитопланктона. М.: Университет и школа. 157 с.
- Солодухина М.А., Помазкова Н.В. 2014. Ландшафты Шерловогорского рудного района Забайкальского края // Успехи современного естествознания. № 9. С. 70-78.
- Удачин В.Н., Аминов П.Г., Дерягин В.В. 2008. Химический состав техногенных вод в карьерных озерах Башкортостана // Башкирский химический журнал. Т. 15. № 4. С. 64-69.
- Удачин В.Н., Аминов П.Г., Лонцакова Г.Ф., Дерягин В.В. 2009. Распределение физико-химических параметров в карьерных озерах Блявинского и Яман-Касинского колчеданных месторождений (Южный Урал) // Вестник ОГУ. № 5. С. 167-172.
- Чечель Л.П. 2020. Формирование гидрогеохимических полей вольфрамтовых месторождений Восточного Забайкалья под влиянием природных и антропогенных факторов. Дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. Чита: ИПРЭК СО РАН. 180 с.
- Чечель Л.П., Замана Л.В. 2009. Основные геохимические типы дренажных вод вольфрамтовых месторождений Юго-Восточного Забайкалья // Вестник ТГУ. № 329. С. 271-277.
- Шаров А.Н. 2020. Фитопланктон холодноводных озерных экосистем под влиянием природных и антропогенных факторов. Дисс. ... докт. биол. наук. СПб.: НИЦЭБ РАН. 368 с.
- Шипунов А.Б., Балдин Е.М., Волкова П.А., Коробейников А.И., Назарова С.А., Петров С.В., Суфиянов В.Г. 2014. Наглядная статистика, используем R! М.: ДМК Пресс. 298 с.
- Эпова Е.С., Еремин О.В. 2018. Сравнительный анализ процессов выщелачивания кварц-топаз-вольфрамитовых рудоносных пород и олово-полиметаллических сульфидных руд Шерловогорского месторождения // Материалы третьей Всероссийской научной конференции с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». Чита, 20-25 августа 2018 года. Улан-Удэ Ж изд-во БНЦ СО РАН. С. 391-393.
- Эпова Е.С., Русаль О.С., Еремин О.В. 2018. Редкоземельные элементы в зоне гипергенеза Шерловогорского олово-полиметаллического месторождения (Забайкальский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Т. 329. №. 8. С. 88-95.
- Beulker C., Lessmann D., Nixdorf B. 2003. Aspects of Phytoplankton Succession and Spatial Distribution in an Acidic Mining Lake (Plessa 117, Germany) // Acta Oecologica. Vol. 24. Pp. 25-31.
- Bielańska-Grajner I., Gładysz A. 2010. Planktonic Rotifers in Mining Lakes in the Silesian Upland: Relationship to Environmental Parameters // Limnologia. Vol. 40. Pp. 67-72.
- Blanchette M.L., Lund M.A. 2016. Pit Lakes are a Global Legacy of Mining: An Integrated Approach to Achieving Sustainable Ecosystems and Value for Communities // Current Opinion in Environmental Sustainability. Vol. 23. Pp. 28-34.
- Deneke R. 2000. Review of Rotifers and Crustaceans in Highly Acidic Environments of pH Values  $\leq 3$  // Hydrobiologia. Vol. 433. Pp. 167-172.
- El-Bassat R.A., Taylor W.D. 2007. The zooplankton community of Lake Abo Zaabal, a newly-formed mining lake in Cairo, Egypt // African Journal of Aquatic Science. Vol. 32(2). Pp. 1-8.
- Ferrari C.R., de Azevedo H., Wisniewski M.J.S., Rodgher S., Roque C.V., Nascimento M.R.L. 2015. An Overview of an Acidic Uranium Mine Pit Lake (Caldas, Brazil): Composition of the Zooplankton Community and Limnochemical Aspects // Mine Water Environment. Vol. 34. Pp. 343-351.
- Gammons C.H., Harris L.N., Castro J.M., Cott P.A., Hanna B.W. 2009. Creating Lakes from Open Pit Mines: Processes and Considerations – with Emphasis on Northern Environments // Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2826. 106 p. [Электронный ресурс [http://digitalcommons.mtech.edu/geol\\_engr/2](http://digitalcommons.mtech.edu/geol_engr/2) (дата обращения 13.04.2022)]
- Goździewicz A.M., Koszałka J., Tandyrak R., Grochowska J., Parszuto K. 2021. Functional Responses of Zooplankton Communities to Depth, Trophic Status, and Ion Content in Mine Pit Lakes // Hydrobiologia. Vol. 848. P. 2699-2719.
- Guiry M.D., Guiry G.M. 2022. AlgaeBase [Электронный ресурс <http://www.algaebase.org> (дата обращения 20.11.2021)].
- Kalin M., Cao C., Smith M.P., Olaveson M.M. 2001. Development of the Phytoplankton Community in a Pit-Lake in Relation to Water Quality Changes // Water Research. Vol. 35 (13). Pp. 3215-3225.
- Kumar R.N., McCullough C.D., Lund M. A. 2009. Water Resources in Australian Mine Pit Lakes // Mining Technology. Vol. 118. Pp. 205-211.
- Leppänen J.J. 2018. An Overview of Cladoceran Studies Conducted in Mine Water Impacted Lakes // International Aquatic Research. Vol. 10. P. 207-221.
- Lessmann D., Fyson A., Nixdorf B. 2000. Phytoplankton of the Extremely Acidic Mining Lakes of Lusatia (Germany)

- with  $\text{pH} \leq 3$  // *Hydrobiologia*. Vol. 433. Pp. 123-128.
- Moser M., Weisse T. 2011. The Most Acidified Austrian Lake in Comparison to a Neutralized Mining Lake // *Limnologia*. Vol. 41. P. 303-315.
- Nixdorf B., Fyson A., Krumbeck H. 2001. Review: Plant Life in Extremely Acidic Waters // *Environmental and Experimental Botany*. Vol. 46. Pp. 203-211.
- Nixdorf B., Krumbeck H., Jander J., Beulker C. 2003. Comparison of bacterial and phytoplankton productivity in extremely acidic mining lakes and eutrophic hard water lakes // *Acta Oecologica*. Vol. 24. Pp. 281-288.
- Paulsson O., Widerlund A. 2021. Algal Nutrient Limitation and Metal Uptake Experiment in the Åkerberg Pit Lake, Northern Sweden // *Applied Geochemistry*. Vol. 125. P. 104829.
- Pociecha A., Bielańska-Grajner I., Szarek-Gwiazda E., Wilk-Woźniak E., Kuciel H., Walusiak E. 2018. Rotifer Diversity in the Acidic Pyrite Mine Pit Lakes in the Sudety Mountains (Poland) // *Mine Water Environment*. Vol. 37. Pp. 518-527.
- Ramanchuk A.I., Makarevich T.A., Khomitch S., Machowski R., Rzetala M.A., Rzetala M. 2021. Methodological Approaches to Phytomediation of Productive Processes in Chalk Quarry Reservoirs of BELARUS // *Ecological Indicators*. Vol. 129. P. 107995.
- Röncke H., Schultze M., Neumann V., Nitsche C., Tittel J. 2010. Changes of the Plankton Community Composition during Chemical Neutralization of the Bockwitz Pit Lake // *Limnologia*. Vol. 40. P. 191-198.
- Ruttner-Kolisko A. 1977. Suggestions for Biomass Calculation of Plankton Rotifers // *Archiv für Hydrobiologie Beihefte: Ergebnisse der Limnologie*. Bd. 8. Pp. 71-76.
- Seckbach J., Chapman D.J., Garbary D.J., Oren A., Reisser W. 2007. Algae and Cyanobacteria under Environmental Extremes: Final Comments // *Algae and Cyanobacteria in Extreme Environments. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology* / Ed. J. Seckbach. Vol. 11. Dordrecht: Springer. Pp. 783-786.
- She Z., Pan X., Wang J., Shao R., Wang G., Wang S., Yue Z. 2021. Vertical Environmental Gradient Drives Prokaryotic Microbial Community Assembly and Species Coexistence in a Stratified Acid Mine Drainage Lake // *Water Research*. Vol. 206. P. 117739.
- Skrzypczak A.R., Napiórkowska-Krzebietke A. 2020. Identification of Hydrochemical and Hydrobiological Properties of Mine Waters for Use in Aquaculture // *Aquaculture Reports*. Vol. 18. P. 100460.
- Weithoff G., Moser M., Kamjunke N., Gaedke U., Weisse T. 2010. Lake Morphometry and Wind Exposure May Shape the Plankton Community Structure in Acidic Mining Lakes // *Limnologia*. Vol. 40. Pp. 161-166.
- Wollmann K., Deneke R., Nixdorf B., Packroff G. 2000. Dynamics of Planktonic Food Webs in Three Mining Lakes Across a pH Gradient (pH 2-4) // *Hydrobiologia*. Vol. 433. Pp. 3-14.
- WoRMS: World Register of Marine Species. 2022 [Электронный ресурс <http://www.marinespecies.org> (дата обращения 13.04.2022)].