

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский Институт Географии
Дальневосточного Отделения Российской Академии Наук

На правах рукописи

Лысенко Евгения Валерьевна

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭКОСИСТЕМ
МАЛЫХ ОЗЕР ВОСТОЧНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ

Специальность 25.00.36 – геоэкология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель
Кандидат биологических наук, доцент
Чернова Елена Николаевна

Владивосток

2018

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ТЕРМИНОВ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПРЕСНЫХ ВОДАХ И В ОРГАНИЗМЕ ГИДРОБИОНТОВ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)	11
1.1. Тяжелые металлы в окружающей среде – источники, пути поступления, токсичность.....	11
1.2. Факторы формирования химического состава водной среды.....	14
1.3. Тяжелые металлы в биотических компонентах водных геосистем.....	20
1.5. Миграция металлов в трофических цепях.....	25
2. РАЙОНЫ РАБОТ. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	28
2.1. Характеристика района работ.....	28
2.1.1. Происхождение и морфометрические характеристики озер восточного Сихотэ-Алиня	32
2.2. Материал исследования.....	35
2.3. Сбор, пробоподготовка и анализ образцов.....	37
3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КОМПОНЕНТОВ ЭКОСИСТЕМ ОЗЕР ВОСТОЧНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ.....	43
3.1. Элементный и ионный состав абиотических компонентов озерных экосистем.....	43
3.1.1. Макроэлементный состав вод.....	43
3.1.2. Растворенные и взвешенные микроэлементы.....	48
3.1.3. Содержание микроэлементов во взвеси	51
3.1.4. Содержание тяжелых металлов в донных отложениях	53
3.1.5. Геохимические особенности оз. Васьковского.....	56
3.1.6. Влияние осеннего перемешивания на химический состав воды озер ВСА.....	59
3.2. Микроэлементный состав биотических компонентов озерных экосистем	62
3.2.1. Планктон	62

3.2.2. Высшие водные растения.....	66
3.2.3. Моллюски	69
3.3. Закономерности переноса микроэлементов по трофической цепи «взвесь – планктон – моллюски».....	75
3.3.1. Свинец, железо, никель	76
3.2.2. Кадмий, цинк	79
3.3.3. Марганец, медь.....	82
ВЫВОДЫ.....	86
ЛИТЕРАТУРА.....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ	108

СПИСОК ТЕРМИНОВ

Биогенные элементы (вещества) – химические элементы, постоянно входящие в состав организмов и выполняющие жизненно необходимые биологические функции.

Биоиндикаторы – организмы, используемые для установления состояния окружающей среды.

Биологическая индикация воды (биоиндикация) – оценка качества воды по наличию водных организмов, являющихся индикаторами ее загрязненности.

Биомагнификация – накопление элемента по трофической цепи.

Водородный показатель (рН) – величина, характеризующая активность или концентрацию ионов водорода в растворах; численно равна отрицательному десятичному логарифму концентрации, выраженной в грамм ионах на литр.

Гидрохимический режим – изменение химического состава воды водного объекта во времени.

Главные ионы – ионы, определяющие химический тип вод: K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , F^- .

Евтрофирование (евтрофикация) вод – повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления в воде биогенных элементов.

Жесткость воды – свойство воды, обусловленное присутствием в ней ионов кальция и магния.

Коэффициент биоконцентрации (биоаккумуляции) – отношение содержания элемента в организме к таковой в осадках или водной среде.

Коэффициент вариации анализа проб и стандартов – показатель, отражающий разброс значений относительно среднего (отношение стандартного отклонения к среднему значению).

Коэффициент миграции – отношение содержание элемента в минеральном остатке воды к его содержанию в горных породах или почвах.

Коэффициент условного водообмена – отношение среднемноголетнего годового притока к среднемноголетнему объему стока.

Минерализация воды – суммарная концентрация анионов, катионов и недиссоциированных растворенных в воде неорганических веществ.

Предельно допустимая концентрация веществ в воде (ПДК) – концентрация веществ в воде, выше которой вода непригодна для одного или нескольких видов водопользования.

Трофическая (пищевая) цепь – цепь питания, взаимоотношения между организмами при переносе энергии пищи от ее источника - зеленого растения через ряд организмов, происходящие путем поедания одних организмов другими из более высоких трофических уровней.

Удельный водосбор – отношение площади водосбора к площади озера.

PEL (Probable Effect Level) – уровень вероятного негативного биологического эффекта.

TEL (Threshold Effect Level) – уровень (концентраций), ниже которого негативных биологических эффектов не наблюдается.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования Озера – важный компонент гидросферы. Крупные озера подробно изучаются в связи с тем, что они используются для судоходства, водоснабжения, рыболовства, орошения, получения минеральных солей и химических элементов. На Дальнем Востоке подробно исследовано единственное крупное озеро – Ханка (Апонасенко и др., 2000; Чудаева, 2002; Щур, Генкал, 2005; Щур и др., 2000).

Иначе обстоят дела с малыми озерами (с площадью акватории до 10 км²), которые изучены крайне фрагментарно, хотя исследования (Кремлева и др., 2012; Леонова и др., 2007; Моисеенко и др., 2006; Страховенко и др., 2010) показали, что такие озера быстрее реагируют на антропогенные изменения окружающей среды и, следовательно, более четко отражают такие изменения, а также – зональную и региональную специфику условий формирования их химического состава.

Закономерности изменения содержания макроионов и микроэлементов в малых озерах различных природно-климатических зон от тундры до засушливых степей детально исследованы для Европейской России (Моисеенко и др., 2006; Моисеенко, Гашкина, 2007). Достаточно полно изучены гидрохимические характеристики состава озер Сибири (Леонова и др., 2007; Страховенко и др., 2010). Оценке гидрохимических и микробиологических показателей озера лагунного типа побережья Татарского пролива (Дальний Восток России) посвящена работа Л.А. Гаретовой и Е.В. Каретниковой (2010). Биогеохимические особенности озер юга Дальнего Востока России изучены на примере припойменных озер нижнего Амура (Шамов и др., 1997; Шамов и др., 2011, Левшина и др., 2007). Особенности формирования химического состава вод малых озер восточной части Сихотэ-Алиня (ВСА) Приморского края, существующих в условиях муссонного климата, изучены фрагментарно. Эти объекты представляют теоретический интерес с точки зрения оценки влияния на малые озера региональных климатических и антропогенных факторов, и практический интерес вследствие существенной антропогенной нагрузки на

некоторые из озер, а также в связи с возможностью их рыбохозяйственного использования.

Вода – не только питьевой ресурс, также она является местообитанием большого количества живых организмов, в том числе промысловых, которые взаимодействуют с ней и приобретают черты, специфичные для данного водного объекта, в частности, микроэлементный состав. Анализ биологического материала водных объектов способствует пониманию того, сколько в системе имеется биологически доступных форм микроэлементов, передающихся по пищевым цепям.

Конечным звеном водных трофических цепей, начинающихся мелкими планктонными организмами и заканчивающихся рыбами, крупными млекопитающими, часто является человек. Поэтому перенос загрязнителей по трофическим цепям активно изучается специалистами (Cui et al., 2011, Tao et al., 2012a). Показано, что в большинстве трофических цепей происходит биомагнификация ртути (Моисеенко, Гашкина, 2016; Campbell et al., 2005; Cui et al., 2011; Dehn et al., 2006; Dietz et al., 2000; Qiu, 2015; Tao et al., 2012a), тогда как другие тяжелые металлы (ТМ) чаще по трофической цепи не накапливаются (Моисеенко, 2015; Cui et al., 2011; Monferrán et al., 2016; Rubio-Franchini, Rico-Martínez, 2011). Большую роль в накоплении металлов организмами играет удельная площадь поверхности контакта со средой – чем мельче организм, выше его удельная площадь поверхности, тем выше концентрации металлов (Бурдин, Золотухина, 1998; Шулькин, 2004; Joiris, Azokwu, 1999). Поскольку, как правило, потребители пищи больше своих жертв, то становится понятен и факт отсутствия накопления большинства элементов по трофической цепи. Однако, поскольку иногда рост концентрации элементов по трофической цепи имеет место (Altındağ, Yiğit, 2005), необходимо понять вызывающие его причины. Для этого необходимо изучить накопление металлов по трофической цепи с учетом геохимических условий водоемов.

Цель исследования:

Дать комплексную характеристику макро- и микроэлементного состава различных компонентов экосистем пресных и солоноватоводных озер восточного макросклона Сихотэ-Алиня, находящихся под влиянием моря и антропогенной нагрузки различной интенсивности.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

- 1) Изучить основные гидрохимические показатели пресных и солоноватоводных озер ВСА.
- 2) Изучить содержание тяжелых металлов (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, Cd) в воде в растворенной и взвешенной формах, во взвеси и донных отложениях.
- 3) Изучить содержание металлов в планктоне, высших водных растениях и моллюсках.
- 4) Проанализировать и выявить закономерности переноса микроэлементов по трофической цепи взвесь – планктон – моллюски-фильтраторы.

Научная новизна. Впервые для Приморского края проведены четырехлетние наблюдения за изменениями основных гидрохимических показателей и содержания ТМ в абиотических компонентах и биоте малых озер в летний период. А также проанализировано изменение содержания ТМ по пищевой цепи малых озер.

Практическая значимость Изучение малых озер Приморского края представляет практический интерес с точки зрения установления фоновых значений факторов среды в условиях глобальной изменчивости природных климатических и антропогенных факторов, в связи с использованием озер в качестве источника питьевых вод, рыбозаведения, рекреационного использования.

Защищаемые положения:

- 1) Малые озера ВСА – пресные и солоноватоводные – содержат низкие концентрации растворенных и взвешенных металлов, что связано с особенностями почв и горных пород водосборов.
- 2) По сравнению с остальными изученными озерами, в воде антропогенно-измененного оз. Васьковского повышенных концентраций растворенных

металлов не наблюдается, во взвеси повышены концентрации Zn и Pb. В биотической компоненте повышены концентрации Pb, Zn (планктон, моллюски) и Cd (моллюски).

3) Накопления ТМ по пищевой цепи взвесь – планктон – моллюски-фильтраторы из озер ВСА не происходит, благодаря низкому содержанию органического вещества и микроэлементов.

Апробация работы. Результаты и основные положения работы были представлены и обсуждены на следующих научных форумах: региональной школе-семинаре молодых ученых, аспирантов и студентов «Территориальные исследования: цели, результаты и перспективы» (г. Биробиджан, 2011); всероссийском симпозиуме с международным участием «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах» (Петрозаводск, 2012); международной научно-практической конференции «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде» (Семей, 2012); молодежной конференции с элементами научной школы «Географические и геоэкологические исследования на Дальнем Востоке» (Владивосток, 2012, 2014, 2016); биогеохимической школе «Биогеохимия и биохимия микроэлементов в условиях техногенеза биосферы» (Гродно, 2013); международной конференции «Устойчивое природопользование в прибрежно-морских зонах» (Владивосток, 2013); Чтениях памяти Владимира Яковлевича Леванидова (Владивосток, 2014); международной школе-семинаре молодых исследователей «Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах» (Тюмень, 2014); совещании географов Сибири и Дальнего Востока (Улан-Удэ, 2015).

Личный вклад. Все этапы работы были проведены лично автором или при его непосредственном участии: отбор и анализ проб воды, взвеси, донных отложений, планктона, высших водных растений, моллюсков, пробоподготовка к анализу, обсуждение полученных данных.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ, из них 4 в журналах из списка ВАК, в том числе 1 в научном издании, цитируемом в Web of Science, 12 тезисов докладов на всероссийских конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из списка терминов, введения, трех глав, выводов и списка литературы, включающего 185 наименований. Объем работы – 123 с., количество таблиц – 9, рисунков – 22, приложений – 12.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, к.б.н., старшему научному сотруднику лаборатории геохимии ТИГ ДВО РАН Е.Н. Черновой за помощь на всех этапах выполнения работы и анализа полученных результатов, за неоценимую поддержку на протяжении всего исследования.

Автор благодарит сотрудников САБЗ к.б.н. Е.В. Потиху и И.А. Нестерову за помощь в полевых работах, с.н.с. БПИ ДВО РАН Л.А. Медведеву за определение фитопланктона, за помощь в проведении анализов научных сотрудников лаборатории геохимии ТИГ ДВО РАН Т.Н. Луценко и С.Г. Юрченко; ведущих инженеров Г.А. Власову, Н.Н. Богданову, Т.Л. Примака, А.М. Плотникову, Д.С. Рыжакова, а также весь состав лаборатории геохимии за постоянную моральную поддержку и внимание, конструктивные замечания и советы в процессе исследования. Автор выражает благодарность В.О. Зуеву за написание программы для создания диаграмм, отражающих соотношение главных ионов.

1. ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПРЕСНЫХ ВОДАХ И В ОРГАНИЗМЕ ГИДРОБИОНТОВ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

1.1. Тяжелые металлы в окружающей среде – источники, пути поступления, токсичность

Микроэлементы представляют собой самую большую группу элементов химического состава природных вод, в нее входят практически все элементы Периодической системы Д.И. Менделеева, не включенные в четыре группы растворенных компонентов (главные ионы, растворенные газы, биогенные и органические вещества). Условно их можно разделить на пять подгрупп:

- 1) типичные катионы (Li^+ , Cs^+ , Be^{2+} , Sr^{2+} , Ba^+ и др.);
- 2) ионы тяжелых металлов (Cu^{2+} , Ag^+ , Au^{2+} , Pb^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} и др.);
- 3) амфотерные комплексообразователи (Cr, Mo, V, Mn);
- 4) типичные анионы (Br^- , I^- , F^- , B^{3-});
- 5) радиоактивные элементы (U, Ra, Th, и др.) (Никаноров, 2008).

Тяжелые металлы – это микроэлементы группы металлов с атомной массой превышающей 50, и плотностью выше 5 г/см^3 . Все они могут быть биологически активными и, попадая в результате антропогенной деятельности в природные среды в миграционно-активном состоянии, они начинают мигрировать, включаясь в той или иной степени в биологический круговорот, и при определенных биогеохимических условиях и концентрациях начинают оказывать токсическое воздействие на живые организмы (Никаноров, Жулидов, 1991).

В реки и озера транспорт металлов осуществляется множеством способов. Наиболее весомый из природных источников – выветривание горных пород. Сухие и влажные атмосферные выпадения служат источником как природным, так и антропогенным. Непосредственное антропогенное загрязнение водных объектов жидкими отходами (сельскохозяйственными, муниципальными, промышленными) является третьим главным источником металлов для рек и озер, но нельзя исключать высвобождение металлов из донных отложений (Латыпова и др., 2004; Моисеенко и др., 2011; Williams et al., 1974).

Человеческая деятельность привела к повышению содержания многих тяжелых металлов и металлоидов в водных объектах, относительно их природных, фоновых величин. Фоновый уровень (син.: природный фон, фоновая концентрация), характеризуется как показатели содержания веществ в воздухе или воде, отвечающие средним условиям, характерным для данной территории или акватории, которая определяется глобальными или макрорегиональными природными процессами (Котляков, Комарова, 2007).

Добытые из недр земли и обогащенные в технологических циклах многие элементы приобретают более высокую подвижность и токсичные свойства в водной среде, а водные объекты являются конечным коллектором антропогенного рассеяния элементов в окружающей среде. Т.И. Моисеенко (2009) приводит обобщенные данные о поступлении химических элементов в окружающую среду и озера за счет природных процессов, а также объемы антропогенного поступления в озера по оценкам различных авторов. Отмечает, что основные миграционные потоки загрязняющих веществ от промышленных производств и основные процессы обогащения водных объектов металлами – сточные воды, аэротехногенные потоки, диффузные стоки с водосбора. Автор разделяет влияние любого вида промышленности на территорию на три зоны:

1) импактную (формируется вблизи функционирующих производств за счет выбросов в атмосферу и осаждения частиц с повышенным содержанием металлов в составе пылевой эмиссии);

2) импактную буферную (формируется по мере удаления от источников сбросов стоков и воздушных выбросов с опасным содержанием элементов, концентрации элементов превышают фоновые за счет аэротехногенного распространения дымовых выбросов);

3) условно-фоновую (концентрация элементов загрязнения практически соответствует фоновым значениям, свойственным данному региону) (Моисеенко, (2009).

С дымовыми выбросами эмиссия металлов происходит как в составе пылевых частиц, так и аэрозолей. В первом случае металлы в составе

минеральных частиц (пыли) осаждаются вблизи источника выбросов и в дальнейшем могут смываться в природные водоемы. Как правило, радиус распространения металлов в составе пылевых частиц не превышает 20-30 км в зависимости от розы ветров. В составе аэрозолей металлы мигрируют на значительно более дальние расстояния. Это подтверждается их накоплением в донных отложениях озер условно-фоновых районов (Моисеенко, 2009).

Ряд авторов утверждает, что воды малых озер (при отсутствии непосредственных источников загрязнения) более четко отражают зональную, региональную и локальную специфику условий их формирования и те глобальные антропогенные процессы, которые происходят в последнее время в окружающей среде (Гашкина и др., 2015; Моисеенко и др., 2006; Моисеенко, Гашкина, 2007). Авторы на основании факторного анализа ранжировали факторы и процессы по степени их воздействия на химический состав вод: географическая зональность и сопряженная с ней антропогенная нагрузка; региональные особенности (морское влияние, гумификация, засоление); локальные факторы, как природные (заболоченность), так и антропогенные (техногенное закисление). По классификации Иванова (1948) к малым относятся озера с площадью акватории 1-10 км², к очень малым – с площадью 0,1-1 км².

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что степень токсичности металлов в столь сложных по составу объектах, каковыми являются поверхностные природные воды, определяется не общим их содержанием, а состоянием или формами нахождения. Наибольшей токсичностью обладают, как правило, свободные (гидратированные) ионы металлов (в кислой среде) и их гидроксокомплексы (в щелочной среде). Комплексообразование и адсорбция на взвеси существенно снижают вероятность нахождения металлов в природных поверхностных водах в виде свободных (гидратированных) ионов как наиболее токсичной формы, что важно с экотоксикологической точки зрения. Так как ионы одного металла редко встречаются в изоляции от других веществ, необходимо также учитывать их суммарную токсичность (Линник и др., 2012; Моисеенко, Гашкина, 2005; Муллинс, 1982).

1.2. Факторы формирования химического состава водной среды

Основные закономерности химического состава водной среды были изучены в 20-м столетии (Алекин, 1953; Скопинцев, 1950, 1975; Никаноров, Посохов, 1985). Основной массив данных по концентрациям ТМ в компонентах среды получен давно (Войткевич и др., 1977; Добровольский, 1998; Никаноров, Жулидов, 1991),

Биогеохимические исследования водных геосистем предусматривают изучение химического состава основных сопряженных сред (вода, взвесь, донные отложения (ДО), биообъекты), среди которых основной является вода. Главных путей поступления химических элементов в водные системы три: горное выветривание, сухие и влажные атмосферные осадки и человеческая деятельность. Исследование влияния этих путей поступления на химический состав водной среды затрудняет то, что естественные источники поступления металлов в водотоки и водоемы очень разнообразны и отследить их все крайне сложно, если не невозможно (Gaillardet et al., 2003).

Горные породы определяют условия и формы миграции элементов на водосборах и в водоемах, служа источниками наиболее растворимых элементов. В случае с силикатными породами – источником осадка, который, наоборот, обогащен нерастворимыми элементами (Gaillardet et al., 2003). Твердость пород и степень их насыщенности сильными основаниями определяет кислотность вод (Моисеенко, Гашкина, 2005; Zhou et al., 2008), а закисление вод вызывает процесс растворения многих ТМ из взвеси и ДО и перевод их в более подвижную растворенную форму (Даувальтер, Кашулин, 2015; Теплая, 2013).

В атмосфере элементы переносятся ветром в форме частиц почвы, продуктов извержений вулканов, морских солей, пепла лесных пожаров и биогенных аэрозолей. Вклад атмосферного переноса в формирование химического состава водных геосистем может быть значительным и зависит от количества и растворимости аэрозолей (Gaillardet et al., 2003).

Источником вторичного загрязнения водоема при определенных условиях могут служить донные отложения, которые способны накапливать и длительное

время сохранять ТМ (Долотов, Гапеева, 2009; Долотов и др., 2010). Эти условия можно разделить на четыре группы (Charman, 1996:102):

1) физическое нарушение структуры ДО и освобождение поровой воды, что ведет к перераспределению загрязняющих веществ из глубинных слоев ДО в поверхностные, где они могут перейти в водную массу;

2) взмучивание/рыхление осадков бентосными организмами, что также ведет к перераспределению загрязняющих веществ из глубинных слоев ДО в поверхностные, где они могут перейти в водную массу;

3) при изменении pH и Eh изменяются формы существования микроэлементов в ДО и происходит освобождение элементов посредством растворения (например, высвобождение адсорбированного фосфора и тяжелых металлов путем растворения Fe ($Fe^{3+} \Rightarrow Fe^{2+}$) в результате недостатка кислорода при аноксии придонных вод);

4) бактериальная модификация следовых элементов (Hg, As, Se, Pb) может освобождать загрязнители вследствие перехода органо-металлических комплексов в растворимые или летучие.

Химические элементы в воде мигрируют в виде двух основных форм – растворенной и взвешенной (Геохимия..., 1990). Растворенная форма представляет собой фильтрат, прошедший через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм. Такой фильтрат содержит как растворенную, так и, частично, коллоидную фракцию элементов. Взвешенная форма – это непостоянная механически перемещающаяся фаза, нестабильная по составу и объемам (элементы, включенные в минеральную взвесь и связанные с органическими частицами) (Гордеев, Лисицын, 1979).

Растворенные и взвешенные формы элементов переходят друг в друга при изменении условий среды, которые называют геохимическими барьерами. Различают механические, физико-химические и биологические барьеры (Черных, Сидоренко, 2003). Механические барьеры опосредованно влияют на поступление элементов в водную среду и обусловлены изменением скорости движения воды или воздуха в почвах, что, в свою очередь, связано с их структурой, плотностью

сложения, пористостью, гранулометрическим составом. Физико-химические выявляются в зависимости от главного фактора, обуславливающего аккумуляцию мигрирующих веществ, и подразделяются на: окислительный, восстановительный, сульфидный, карбонатный, кислотный, щелочной, адсорбционный, испарительный, термодинамический. Биологические обусловлены поглощением элементов организмами и гумусовыми веществами (Черных, Сидоренко, 2003).

Основным выражением взаимодействия воды с сопряженными средами являются концентрации химических элементов. Для дальнейшего изучения изменения химического состава сред необходимо наличие реперных концентраций элементов, которыми в геохимии являются средние мировые концентрации (Bruland, 1980, Виноградов, 1957). Некоторые данные в последние десятилетия уточнялись, например, в горных породах (Григорьев, 2003), во взвешенных наносах рек мира (Савенко, 2006). Особенно серьезному пересмотру в конце 20 столетия подверглись средние содержания растворенных элементов в поверхностных и океанских водах (Bruland, 1980; Gaillardet et al., 2003), благодаря повышению методической точности анализов (Шулькин, 2004). В таблице 1.1 приведены средние содержания некоторых элементов из этих работ.

Таблица 1.1

Средние содержания некоторых элементов в воде и сопредельных средах

Элемент	Реки мира ¹ , мкг/л	Реки мира ² , наносы, мкг/г	Осадочные горные породы ³ , мкг/г
Cd	0,08	3,2	0,8
Cu	1,48	98	31
Fe	66	51 000 ⁴	35 400
Mn	34	1 100 ⁴	830
Ni	0,801	76	37
Pb	0,079	89	12
Zn	0,60	343	43

Примечание к табл.1.1: ¹Gaillardet et al., 2003; ²Савенко, 2006; ³Григорьев, 2003; ⁴Гордеев, Лисицын, 1978.

На современном этапе изучения поверхностных вод происходит накопление данных о зональных особенностях химического состава водных объектов, локальных факторах его формирования, в том числе антропогенном (Кононова и др., 2016; Кремлева и др., 2012, 2013; Кремлева, Моисеенко, 2017; Моисеенко, Гашкина, 2005, 2007; Моисеенко и др., 2006).

Каждый водоем и водоток имеет свой набор физических и химических характеристик, определяемых климатическими, геоморфологическими и геохимическими условиями дренажного бассейна и водоносного горизонта, однако малые озера, по мнению некоторых исследователей, более четко отражают региональную специфику изменения химического состава воды (Моисеенко, Гашкина, 2005, 2007; Моисеенко и др., 2006).

Анализ влияния различных факторов на процессы формирования химического состава вод малых озер Восточно-Европейской равнины показал, что антропогенный фактор, накладываясь на природные процессы, оказывает существенное влияние на них, стимулируя процессы евтрофирования, закисления, а также обогащения вод токсичными микроэлементами даже в тех случаях, когда водные системы не подвергаются воздействию прямых стоков. Влияние водосборной площади на поступление биогенных элементов в водоемы показано в двух направлениях: задержки всех основных биогенных элементов (за исключением Si) при заболачивании территории водосборов и, наоборот, интенсификации их поступления с увеличением гумификации почв. Также стало известно, что имеется еще один регулирующий фактор – удельный водосбор: увеличение удельного водосбора снижает снабжение вод питательными веществами (Гашкина, 2011). В целом в водах озер Восточно-Европейской равнины более высокие коэффициенты миграции характерны для анионогенных элементов (Se, Re, As, Mo, Sb, U), чем для катионогенных (Cd, Ni, Cu, Zn, Pb, Cr), а высокие коэффициенты биоконцентрации – для Mo, As, U, Bi, Sb, Cd, Ag, Se, Re, которые, главным образом, обусловлены антропогенной нагрузкой на водосборы (Гашкина, 2011; Гашкина, Моисеенко, 2010).

Большое количество работ посвящено изучению проблемы антропогенного закисления вод озер, вызывающего растворение большого количества элементов, проявляющих токсичные свойства (Кононова и др., 2016; Кремлева, Моисеенко, 2017; Кремлева и др., 2013; Моисеенко и др., 2015; Моисеенко и др., 2017) как одной из наиболее актуальных современных проблем. В середине прошлого века использование ископаемого топлива привело к формированию кислотных атмосферных осадков и закислению вод. На закисление вод также оказывают влияние ландшафтные особенности водосбора (заболоченность территории, рельеф) и дренируемость подстилающих горных пород (Моисеенко, Гашкина, 2005).

Результаты работ Т.И. Моисеенко с коллегами (Гашкина, 2011; Гашкина, Моисеенко, 2010; Моисеенко, Гашкина, 2005, 2007; Моисеенко и др., 2006) по изучению озер Восточно-Европейской равнины показали, что географическая зональность определяет увеличение минерализации воды озер, а также закономерное нарастание содержания биогенных элементов в направлении с севера на юг. Кроме того, географическая зональность определяет специфику анионного состава, наиболее связанного с атмосферными поступлениями, (Моисеенко и др., 2006). Было показано, что антропогенные факторы в формировании химического состава вод сопутствуют зональным. Они влияют на развитие процессов евтрофирования и закисления вод, а также на обогащение вод такими микроэлементами, как Pb, Co, Cr.

Аналогичные исследования по определению химического состава озер проведены для 130 малых озер на территории Западной Сибири (Кремлева и др., 2012, 2013). Показано, что содержание общего органического углерода и pH коррелирует с содержанием главных катионов (Ca, Na, Mg, K). В целом большинство микроэлементов имеют наибольшие значения концентраций в зонах южной тайги и лесостепи, исключение составляют Fe и Al, концентрации которых выше всего в заболоченных водоемах тундровой и северо-таежной зон, отличающихся высокой цветностью и кислотностью. Доминирующими являются озера гидрокарбонатно-кальциевого типа (Кремлева, Хорошавин, 2016).

На Дальнем Востоке преимущественное внимание уделено изучению химического состава рек (Болдескул и др., 2014; Кожевникова и др., 2014; Чудаева, 2002; Шулькин, 2009; Шулькин, Никулина, 2014). В припойменных озерах нижнего Амура изучались донные отложения, химический состав которых генетически связан с химическим составом вод (Кот и др., 2007; Левшина и др., 2007; Шамов и др., 1999; Шамов и др., 2011). Показано, что содержание рассеянных металлов в донных отложениях низко в сравнении с незагрязненными территориями, а содержание в них органического вещества очень различно, что обусловлено их разным происхождением, различиями водного режима, минерализации и основного химического состава вод. Большая часть органического вещества этих озер имеет техногенную природу (Кот и др., 2007; Левшина и др., 2007; Шамов и др., 1999; Шамов и др., 2011).

Химический состав среды малых озер Приморского края и особенно Сихотэ-Алиня изучен слабо (Богатов, Богатова, 2009; Чернова и др., 2010, 2014). Крупнейшее озеро Дальнего Востока Ханка находится под наблюдением Росгидромета, также его химический состав подробно изучался В.А. Чудаевой (2002) в 1982-1988 гг. Озеро имеет повышенную мутность – от почти 100 до 200-250 мг/л, и испытывает сильный антропогенный пресс (загрязняется пестицидами групп дихлор дифенил трихлорэтана (ДДТ) и гексахлорциклогексана (ГХЦГ)). По уровню евтрофикации может быть отнесено к олиго-мезотрофным. Апонасенко с коллегами (2000) в 1991-1993 гг. изучали оптические и люминесцентные характеристики озера, по которым определялись мутность, химическое потребление кислорода (ХПК) и характеристики фитопланктона. Из-за ветрового взмучивания ДО, воды озера по количеству взвешенного вещества относятся к сильно загрязненным, по уровню ХПК в массе своей к чистым (Апонасенко и др., 2000). Характеристики планктона и донных отложений в оз. Ханка также изучались рядом исследователей (Барабанщиков, 2004; Грехнев и др., 2006; Щур, Генкал, 2005; Щур и др., 2000).

Таким образом, изучение химического состава поверхностных вод позволило выделить главные факторы его формирования, трансформации под

воздействием антропогенных и природных ландшафтно-геохимических условий. Получены средние содержания химических элементов в водных системах, позволяющие классифицировать их по геохимическому принципу. Тем не менее, химический состав большого количества мелких водных объектов, которые отражают геохимическую специфику региона и глобальные изменения в окружающей среде, остаются неизученными.

1.3. Тяжелые металлы в биотических компонентах водных геосистем

Огромное значение процессов жизнедеятельности организмов на формирование физических и химических условий среды – вероятно, важнейшее отличие озер и океана от рек (Gaillardet et al., 2003). Металлы, присутствуя в организмах в ничтожно малых количествах, выполняют важные функции, входя в состав биологически активных веществ. Значительные отклонения от соотношений концентраций металлов в организмах, выработанных в ходе эволюции, вызывают отрицательные последствия для живых организмов. Организмы концентрируют в своих органах элементы, необходимые им для жизни в количестве, превышающем в 10^3 - 10^6 раз их содержание в водной среде (DeForest et al., 2007). В целом можно говорить о том, что химический состав организмов изменяется пропорционально изменению химического состава водной среды. В отличие от воды, отражающей геоэкологическую ситуацию непосредственно в момент отбора проб, химический состав живых организмов, обитающих в воде, отражает интегральное, характерное для определенного промежутка времени, состояние этой среды (Христофорова, 1989).

Говоря о химическом составе биотических компонентов пресноводной геосистемы, как биоиндикаторов ее состояния, следует упомянуть первичных продуцентов – фитопланктон, а также массовые виды высших водных растений (ВВР). Из вторичных продуцентов в водных геосистемах большую роль в трансформации и переносе химических веществ через пищевую цепь играют зоопланктон (при наличии фитопланктона), мезо- и макрозообентос, рыбы. Все они имеют непосредственный контакт со средой через поверхность тела и

питание (Леонова, Бобров, 2010, 2012; Kehrig et al., 2009; Łuczyńska et al., 2018; Rajeshkumar, Li, 2018; Radwan et al., 1990).

В условиях динамично меняющихся факторов среды в природных циклах живые организмы способны к сохранению своей внутренней среды (в том числе и концентрации микроэлементов), согласно своим видовым потребностям (Depledge, Rainbow, 1990; Phillips, Rainbow, 1989; Rainbow, 1988; Viarengo, 1989). Однако, при выходе какого-либо фактора за пределы нормальных сезонных и других циклических колебаний, например, при наличии загрязнения микроэлементами, гомеостаз организмов нарушается и происходит срыв механизмов регуляции и накопление элементов до опасных концентраций (Wang et al., 1995; Wang, Fisher, 1996a, b, 1997).

Влияние химических элементов на функционирование живых организмов проявляется, как правило, только после их поглощения клетками. При этом можно выделить два основных пути транспорта элементов в организм: прямое поступление из окружающей среды через поверхность тела или органы дыхания (парентеральное поступление) и попадание в организм с пищей и последующей ассимиляцией (алиментарное поглощение). Первый путь характерен для первичных продуцентов – фитопланктона и фитобентоса, хотя зоопланктон и более крупные животные также поглощают часть металлов парентерально через поверхность тела или органы дыхания. Алиментарное поглощение характерно для гетеротрофов (Шулькин, 2004).

Планктон объединяет совокупность организмов, не способных к самостоятельному движению или с ограниченной подвижностью, и включает как растительные организмы – фитопланктон, так и животные – зоопланктон, хотя отделить фитопланктон от зоопланктона и от мелких частиц детрита (мертвого органического вещества) можно только весьма условно путем облавливания толщи воды планктонной сетью с ячейей определенного диаметра (Леонова, Бобров 2010). Часто уловы планктона определяют как сестон – вся совокупность частиц определенного размера (смесь планктона, органического детрита и территориальной взвеси), так как уверенно говорить о конкретной

принадлежности анализируемой пробы планктона к образцу, не содержащему значительной примеси терригенного материала, можно лишь после получения данных сканирования пробы на СЭМ (сканирующем электронном микроскопе), снабженном детектором для анализа химических элементов (Леонова, Бобров, 2012).

Так же, как и концентрация металлов в воде и взвеси, содержание элементов в планктоне характеризует состояние окружающей среды в сравнительно короткий отрезок времени, равный периоду жизненного цикла планктонных организмов, и применяется для обнаружения кратковременного загрязнения природных вод (Леонова, Бычинский, 1998). Тем не менее, содержание микроэлементов в клетках планктона – это параметр интегральной оценки уровня загрязнения водоема, так как организмы включают металлы в состав своих ферментных систем, связывают в прочные белковые комплексы, заключают в нерастворимые гранулы. В связи с этим они не способны так же быстро, как водная среда, менять свой химический состав. Хотя потребность различных видов водорослей, входящих в состав фитопланктона, по отдельным элементам питания различна, иногда избыток элемента в воде может ингибировать их развитие, а многие водоросли способны запасать элементы в количестве гораздо большем, чем необходимо для их нормального роста (Гашкина, Моисеенко, 2010). По мере погружения на дно малых озер органическое вещество планктона разрушается не полностью, что при определенных условиях способствует образованию значительных толщ озерных органогенных отложения – сапропелей (Леонова, Бычинский, 2012).

Таким образом, планктон – часть водной геосистемы, осуществляющая первичное поглощение и связывание растворенных химических элементов (в том числе металлов) в другие формы, органические, и их перенос по трофической цепи.

Изучение микроэлементного состава планктона (в основном, зоопланктона) производилось в оз. Байкал (Ветров, Кузнецова, 1997), озерах Сибири (Леонова,

2005; Леонова, Бобров, 2010, 2012), китайском озере Тайху (Тао et al., 2012b) (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Содержание тяжелых металлов в планктоне озер (мкг/г сух. массы)

Озеро	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Cd	Pb
оз. Колывановское ¹	84	0,48	0,02	5,2	109	0,43	5,3
оз. Кривое, Чаячье, Ракиты ¹	12-50	0,3-0,64	0,002-0,032	0,6-10	70-137	0,013-0,3	2,7-8,1
оз. Горькое-5 ¹	5,1	0,14	0,002	2,6	54	0,32	2,1
оз. Пясечно ²	11,3	0,22	0,13	-	822	0,2	6,5
оз. Байкал, открытое озеро (1983 г.) ³	11-52	0,09-0,14	0,008	4-130	24-680	-	2-56
Чивыркуйский залив (1988-1989 гг.) ³	99	0,30	0,040	-	470	-	22
оз. Тайху, фитопланктон ⁴	11,3-76	-	-	24,2 ±22,8	286 ±213	0,16-3,33	19,4 ±14,4
оз. Тайху, зоопланктон ⁴	6,96-57	-	-	1,28-20,8	163 ±146	1,27-3,05	-

Примечание к табл.1.2: ¹Леонова, 2005 (зоопланктон; оз. Колывановское – пресное, предгорная зона; озера Кривое, Чаячье, Ракиты – пресные, лесостепная зона; Горькое-5 – солоноватое, лесная зона); ²Radwan et al., 1990 (мезотрофное озеро), восточная Польша, общий планктон); ³Ветров, Кузнецова, 1997; ⁴Тао et al., 2012б; прочерк – нет данных.

Исследования микроэлементного состава фито- и зоопланктона пока немногочисленны и на их основании трудно сделать вывод о том, какие группы планктона накапливают элементы интенсивнее. Так, в фито- и зоопланктоне из оз. Тайху (Тао et al., 2012б) концентрации металлов сопоставимы. В сестоне, преимущественно фитопланктонном (d=1,2-70 мкм) из эстуарной, загрязненной металлами и евтрофицированной зоны зал. Гуанабара, Бразилия концентрации Cd, Pb, Cu в 8-200, 1,6-56 и 4,5-12 раз выше, чем в зоопланктоне (d=70-290 мкм) (Kehrig et al., 2009). В свою очередь, зоопланктон из оз. Пясечно (Польша)

(Radwan et al., 1990) отличался от фитопланктона более высокими концентрациями Cu, Cd и Pb и более низким содержанием Mn, при сопоставимых концентрациях Zn и Fe. В озерах северо-восточной зоны США в зоопланктоне, наоборот, содержались более высокие концентрации Hg, Zn, Cd и более низкие Pb и As, чем в фитопланктоне (Chen et al., 2000). Также Чен с коллегами обнаружили, что содержание металлов в зоопланктоне достоверно зависело от такового в пище, но не от такового в воде. Таким образом понятно, что соотношение металлов в фито- и зоопланктоне очень сильно зависит от многих факторов.

Значительная доля исследований содержания тяжелых металлов в компонентах геосистем пресных вод сосредоточена на ихтиофауне и малакофауне рек и водохранилищ (Чухлебова и др., 2011; Gundacker, 2000; Rajeshkumar, Li, 2018; Тао et. al., 2012б). Эти исследования имели целью использование рыб и моллюсков как индикаторов загрязнения среды металлами (Батоян, Сорокин, 1989, Богатов, Богатова, 2009; Зверькова, 2009; Chua et al., 2018; Łuczyńska et al., 2018), изучали их пригодность как объектов промысла (Явнов, 2000), физиологические, сезонные, половозрастные особенности накопления микроэлементов (Клишко и др., 2007; Ковековдова, Симоконь, 2010; Моисеенко и др., 2005). Рыбы удобны в качестве организмов-индикаторов благодаря большому размеру, устойчивости к сублетальным концентрациям различных веществ, способности интегрировать неблагоприятные воздействия и являются необходимым объектом исследования из-за употребления в пищу человеком. Показано, что тяжелые металлы в рыбах накапливаются преимущественно в печени, жабрах и мышечной ткани (Ковековдова, Симоконь, 2010; Моисеенко и др., 2005; Чухлебова и др., 2011; Chua et al., 2018).

Известно, что организмы, в том числе моллюски, в большей степени накапливают металлы, принимающие участие в процессах жизнедеятельности (Fe, Mn, Zn, Cu), чем токсичные металлы (Pb, Cd) (табл. 1.3) (Зверькова, 2009; Тао et al., 2012а). Тяжелые металлы влияют на фильтрационную активность моллюсков, вызывая изменения в серотонинергической и дофаминергической системах в центральной нервной системе и в естественных, и в лабораторных условиях

(Salánki, Hiripi, 1990). Моллюски-фильтраторы – неизбирательные сестонофаги, пища которых состоит из частиц органического детрита, бактерий, микроводорослей и простейших (Алимов, 1981). Минеральная взвесь отфильтровывается и на 60 % возвращается в среду в виде псевдофекалий, минуя пищеварительную систему моллюсков (Wang et al., 1995).

Как биоиндикаторы наиболее изучены пресноводные моллюски семейств *Unionidae* и *Cyrenidae* (табл. 1.3). Поскольку многие виды семейства *Unionidae* являются крупными, для биоиндикации в том числе изучался микроэлементный состав отдельных органов, но полученные разными исследователями данные сильно варьируют. В жабрах моллюсков из оз. Балатон в Венгрии (V.-Balogh, 1988) наибольшие концентрации Cu, Pb, Cd и Zn наблюдаются в жабрах, а в моллюсках этого же вида из р. Дунай (Gundacker, 2000), содержания металлов распределены равномерно по разным органам.

1.5. Миграция металлов в трофических цепях

На накопление металлов в водных организмах влияет ряд абиотических критериев: концентрации растворенных металлов, режим их поступления в среду, соотношение растворенной и взвешенной форм, минерализация, жесткость воды, количество органического вещества и пищи, скорость выведения (Reinfelder et al., 1998). В лабораторных условиях возможно оценить все многообразие факторов и учесть их вклад в накопление металлов организмами, что было сделано Дж. Рейнфилдером с коллегами (Reinfelder et al., 1998), но в природной среде сделать однозначные выводы о преобладающем источнике металлов для живых существ крайне затруднительно, так как они поступают не только из пищи, но и при фильтрации (преимущественно растворенная форма металлов, частично – взвешенная, легкоподвижная).

Таблица 1.3

Содержание тяжелых металлов в пресноводных двустворчатых моллюсках
(мкг/г сух. массы, мягкие ткани целиком)

Озера	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Cd	Pb
<i>Cyrenidae</i>							
оз. Тайху, <i>Corbicula sp.</i> ¹	~13	-	-	~0	~25	~0,5	~0,25
оз. Семинол, <i>C. fluminea</i> ²	~40	-	-	-	~220	-	-
<i>Unionidae</i>							
Оз. Васьковское, <i>Kunashiria coptzevi</i> ³	6,7-9,1	4300-8200	2600-8100	3,5-20	430-850	4,8-8,5	30-40
Оз. Японское, <i>K. coptzevi</i> ³	5,1-5,3	5400-7500	6500-7000	6,3-6,9	270-310	2,6-2,9	5,1-6,7
оз. Тайху, <i>Anodonta woodiana</i> ⁴	11 ±11	2,45 ±1,52	9,34 ±3,58	-	886 ±337	12 ±13	0,7 ±2,0
реки Вены, <i>Anodonta sp.</i> ⁵	0,9-12,7	-	-	-	71-862	0,13-1,30	0,12-21,3
реки Вены, <i>Unio pictorum</i> ⁵	2,5-9,2	-	-	-	132-430	0,15-0,90	0,29-4,68
Мальтанское оз., <i>A. anatina</i> ⁶	9,3±1,1	78 ±15,1	29,4 ±8,0	0,06 ±0,04	42±11	0,04 ±0,03	0,15 ±0,07
Мальтанское оз., <i>A. cygnea</i> ⁶	0,08 ±0,03	77 ±14,6	33,4 ±9,3	0,86 ±0,24	31±12	0,08 ±0,03	0,16 ±0,05
Мальтанское оз., <i>U. tumidus</i> ⁶	0,04 ±0,02	67 ±23,1	19,1 ±6,0	0,77 ±0,09	51 ±25	0,04 ±0,02	0,21 ±0,11

Примечание к табл. 1.3: ¹Тao et al., 2012a; ²Patrick et al., 2017; ³Богатов, Богатова, 2009; ⁴Liu et al., 2010 (влажный вес); ⁵Gundacker, 2000; ⁶Rzymiski et al., 2014; прочерк – нет данных.

Известно, что ртуть однозначно накапливается по водной трофической цепи (Моисеенко, Гашкина, 2016; Campbell et al., 2005; Cui et al., 2011; Dehn et al., 2006; Dietz et al., 2000). По поводу накопления других микроэлементов, как биофильных, так и токсичных, существует немало противоречивых сведений (Моисеенко, 2015; Cui et al., 2011; Monferrán et al., 2016; Rubio-Franchini, Rico-Martínez, 2011). В частности, исследования водных организмов оз. Тайху и залива Дайя (Китай) показали, что значение коэффициента биоконцентрации Cu, Zn, Cr, Ni, Cd, Pb убывало при повышении уровня трофической цепи: фитопланктон, зоопланктон, зообентос, рыбы (Qiu, 2015; Tao et al., 2012a). В аргентинском озере Сан Роке (San Roque) отмечено отсутствие бионакопления по пищевой цепи планктон – шримс – рыба большого круга микроэлементов. Только Hg во влажный сезон и Zn в сухой сезон имели коэффициент биоконцентрации по трофической цепи выше единицы (Monferrán et al., 2012). В водах водохранилища Эль Ниагара (Мексика) в полевых и лабораторных условиях была установлена биомагнификация Pb по трофической цепи растительный зоопланктон – хищный зоопланктон (Rubio-Franchini, Rico-Martínez, 2011).

Одним из важных путей поступления металлов в водные организмы является контакт воды с поверхностью тела. Чем площадь поверхности тела выше, тем выше способность поглощать (усваивать) элементы. В трофической цепи, как правило, поедаемые объекты меньше по размерам, чем их потребители. Именно влиянием увеличения размера часто объясняется снижение концентраций металлов в организмах при увеличении трофического уровня (Сиротский и др., 2011; Joiris, Azokwu, 1999; Qiu, 2015; Tao et al., 2012a).

Таким образом, существует немало противоречивых сведений о накоплении или снижении содержания металлов по трофической цепи. Среди влияющих факторов, при этом, назван только размер организмов, в основном увеличивающийся с ростом трофического уровня и приводящий к разбавлению металлов, накопленных в пище.

2. РАЙОНЫ РАБОТ. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Характеристика района работ

Среди водных объектов восточного Сихотэ-Алиня выполнено изучение озер, располагающихся в нижней части речных долин в непосредственной близости от морского побережья в Тернейском и Дальнегорском районах Приморского края. Озера приведены в порядке их расположения с севера на юг: Японское, Благодати, Голубичное, Духовское, Мраморное, Круглое, Васьковское (рис. 2.1).

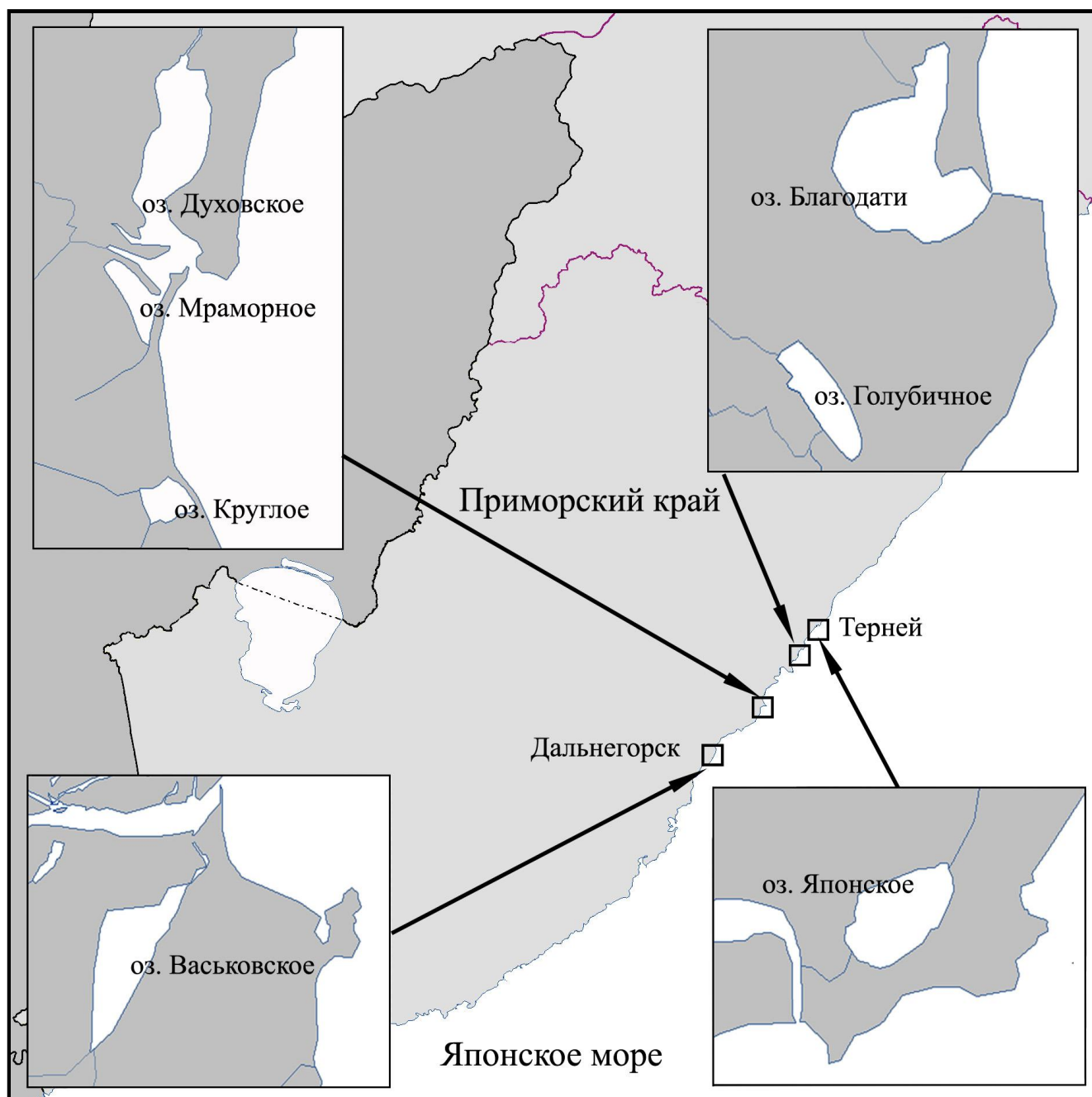


Рис. 2.1. Карта-схема района работ.

В силу географического положения естественные ландшафтно-геохимические процессы на восточном макросклоне хребта Сихотэ-Алинь формируются как результат взаимодействия континентальных и океанических факторов. Океанические факторы в основном формируют гидротермический режим и существенно влияют на химический состав геосистем, в том числе водных.

Климат Специфика климата в значительной степени определяется особенностями географического положения региона: низкие широты и близость холодных окраинных морей Тихого океана (Аржанова, Елпатьевский, 1990). С этим переносом связаны интенсивные туманы в первой половине лета, а с туманной влагой на сушу транспортируется больше морских солей, чем при обычной влажности (Громыко, 2005; Елпатьевский, 1993). Климат носит ярко выраженный муссонный характер, проявляющийся в резкой смене направления ветра зимой и летом. Муссонная циркуляция, обусловленная термическим контрастом между сушей и морем, определяет изменения гидротермического режима по сезонам. Годовая сумма температур вегетационного периода составляет около 2000-2500 °С, безморозный период – 105-120 дней, вегетационный период – около 150 дней, годовая сумма осадков – 700-800 мм. Основное количество осадков (78-85 %) выпадает в безморозное, влажное время года – с апреля по ноябрь (Громыко, 2005).

Рельеф Район исследований представляет собой эрозионно-денудационные среднегорья и низкогорья с абсолютными высотами 1000-1500 м над уровнем моря, с меридиональным или субмеридиональным простираем основных хребтов, причем к области низкогорья относится почти половина площади региона. Характерен рельеф преимущественно крутосклонный, сильно расчлененный с амплитудой относительных превышений в области низкогорья до 200-250 м уклонами в среднем 5-20 °. Для элювиальных отложений низкогорья и среднегорья характерен грубый гранулометрический состав, большей частью он представлены щербисто-суглинистой фацией мощностью до 1-3 м. Склонные

отложения представлены главным образом делювиальной, а также щебнисто-суглинистой фацией, реже осыпной и обвальной фациями. По гребням водоразделов, реже по склонам, встречаются выходы коренных пород (Короткий и др., 1967; Худяков и др., 1972).

Геология и почвы Основная часть восточного макросклона Сихотэ-Алиня сложена эффузивными, интрузивными и вулканогенно-осадочными образованиями верхнего мела и палеогена. Эффузивы представлены комплексами пород среднего и кислого состава (кварцевые порфириты и липариты, их лавы и туфы); интрузивные разности – гранитоидами палеогена, образующими крупные массивы среди пород эффузивного комплекса (Аржанова, Елпатьевский, 1990).

Почвы водосборов озер Благодати, Голубичное и Японское, расположенных на территории Сихотэ-Алинского Государственного Природного Биосферного Заповедника (САБЗ) – луговые глеевые, торфянисто- и торфяно-глеевые приустьевых частей долин рек. На пологих склонах это дерново-глеевые почвы на глинистом элювии. Почвы водосборов Духовских озер относятся, в основном, к горно-лесным бурым сильнокислым и кислым, лесным бурым глееватым и глеево-оподзоленным; в пойменных ландшафтах это задернованные слоисто-пойменные, задернованные иловато-глеевые, дерново-перегнойные и дерново-торфянисто-глеевые почвы (Иванов, 1976).

Почвы района пос. Рудная Пристань характеризуются морфологически слабодифференцированным профилем, без признаков оподзаливания, кислые, ненасыщенные, высокогумусные. Свойства профиля не полностью совпадают с типовыми для широколиственных лесов на юге Дальнего Востока бурыми лесными почвами. Исследования показали, что почвы региона совмещают результаты процессов, характерных для сравнительных теплых суббореальных условий буроземообразования и черты более «холодного» альфегумусового процесса (Пшеничников, Пшеничникова, 1978; Сурина и др., 1984; Таргульян, Грачева, 1983). Почвы значительно загрязнены тяжелыми металлами. Вблизи завода в 1997-1999 гг. содержание Pb в почвах составило от 0,128 до 6,2 мкг/г, а в почвах вдоль железной дороги – до 95 мкг/г (Шаров, 2005).

Речная сеть Густота речной сети Дальнего Востока составляет 0,4-0,5 км/км², гидрологическая сеть территории САБЗ отличается более высокой густотой – 0,9 км на 1 км². Подавляющее большинство рек короткие, горные, питающиеся за счет атмосферных осадков, в сухое время очень сильно мелеют, протоки полностью пересыхают (Громько, 2005). Условия формирования состава речного стока Сихотэ-Алиня заключаются в значительной расчлененности рельефа. Склоны водосборов перекрыты мощными рыхлыми отложениями (до 2 м), которые, как правило, дифференцированы на несколько горизонтов, значительно различающихся по водно-физическим свойствам. Режим стока в летнее время паводочный, в холодное – низкомеженный с минимумом стока в начале весны (Мандыч, 1979; Чудаева, 1981, 2002).

Растительность Восточный макросклон Сихотэ-Алиня расположен в средней подзоне смешанных хвойно-широколиственных лесов, территориально входит в пояс неморальных лесов низкогорья и среднегорья. Залесенность 70-80 %. Растительный покров представлен зональной формацией дубовых лесов, на верхнем пределе распространения (300-400 м над уровнем моря) контактирующими с поясом хвойно-широколиственных лесов. Пояс широколиственных лесов представляет собой монодоминантные леса, образованные дубом монгольским (*Quercus mongolica*) с незначительным участием берез, кленов, лип, осины, ясеня. Леса обычно одноярусные, низкорослые, средняя высота древостоя 16-18 м. Характерна высокая сомкнутость древесного полога до 0,6-0,8, на очень крутых каменистых склонах и водораздельных гребнях сомкнутость снижается до 0,2-0,5. Как правило, хорошо развит подлесок высотой 1-1,5 м с доминированием лещины, рододендрона, леспедеции, чубушника. Возраст подлеска 8-19 лет. Своеобразие лесов проявляется в присутствии многочисленных реликтов теплых и влажных палеогеновых и неогеновых лесов: бархата амурского, тиса остроконечного, диоморфанта, аралии, женьшеня и др. Широко распространены лианы: виноград амурский, лимонник китайский, актинидия, диоскорея, ломонос. Травяной покров представлен осоками, злаками, лесным разнотравьем и папоротниками.

Проективное покрытие меняется в широких пределах от 20-40 до 80-90 % (Колесников, 1969, Куренцова, 1968).

Охлаждающее влияние моря в широколиственных лесах проявляется в появлении видов, характерных для высотных поясов кедрово-еловых и лиственничных лесов – ели и лиственницы в древостое, брусники и багульника в травяном покрове (Аржанова, Елпатьевский, 1990).

2.1.1. Происхождение и морфометрические характеристики озер восточного Сихотэ-Алиня

Озера Благодати и Голубичное – лагунного типа (по обобщенной классификации озерных котловин, приводимой С.П. Китаевым (2007), на основе известных ранее классификаций – речного типа), находятся на территории Сихотэ-Алинского Биосферного Заповедника, озеро Японское – в его буферной зоне (рис. 2.1).

Озеро Японское – пресное, соединено стоковой протокой с рекой Серебрянкой, впадающей в одноименную бухту. На севере в озеро впадает единственный ручей.

Озеро Благодати – солоноватоводное, отделено от бухты Удобной узким перешейком, периодически открывающимся в море протокой. Северо-западная часть озера заболочена. В северную, кутовую часть озера впадает единственный относительно крупный ручей Озерный. Грунт литорали восточного берега от кутовой, более северной части, по мере продвижения к югу меняется с песчано-илистого на каменистый. Практически вся восточная часть литоральной зоны занята полосой водной растительности, в том числе *Schoenoplectus tabernaemontani*, *Potamogeton* sp., *Myriophyllum spicatum*.

Озеро Голубичное – пресное, отделено от оз. Благодати перевалом Голубичным, стока не имеет. Грунт литорали с северной и юго-восточной стороны – каменисто-песчаный, с зарослями *S. tabernaemontani*. Западная часть озера заболочена.

Озера Духовское, Мраморное и Круглое – меромектические, лагунного типа, находятся в Тернейском районе южнее территории САБЗ, используются для рекреационных целей.

Озеро Духовское – солоноватоводное, сильно вытянутое с севера на юг и юго-восток, соединяется протокой с бухтой Озера. Максимальная глубина озера – около 4,5 м (Разработка..., 1990). В северную, наиболее заболоченную часть озера, впадает крупный ручей Третий Распадок. В южную часть озера впадает река Кедровка. Грунт литорали северо-западного и западного берега – илисто-песчаный, по мере продвижения на юг сменяется более каменистым.

Озеро Мраморное – солоноватоводное, отделено от оз. Духовского перешейком, соединено с ним постоянной протокой в устьевой части. Наибольшие глубины, как и у оз. Духовского, находятся в центральной и южной частях акватории и составляют около 4 м. Грунт у северного берега – песчанистый ил с сильным запахом сероводорода, в 2011 г. – с зарослями рдестов (*Potamogeton* sp.) и урути (*M. spicatum*). Эта часть озера располагается в 30 м от грунтового участка дороги Владивосток – Терней и захламлена автомобильными крышками.

Озеро Круглое – небольшое, пресное, но придонный слой воды солоноватый, отделено от бухты Озера широкой песчаной косой, соединяется с морем стоковой протокой. Максимальная глубина 7,8 м. В период осеннего перемешивания на глубинах более 5 м у дна наблюдается повышенная соленость (Разработка..., 1990). Грунт литорали галечный и разнотыпный-песчаный, на севере – с редкой растительностью (*S. tabernaemontani*, *Potamogeton* sp.).

Озеро Васьковское находится в Дальнегорском районе Приморского края. Происхождение озерной котловины – тектоническое. Озеро вытянуто с юга на север, пресное, является памятником природы районного значения и используется как источник питьевой воды для поселка Рудная Пристань. В южную часть озера впадает ручей, на севере находится стоковая протока, соединяющаяся с рекой Рудной в ее устьевой зоне.

В районе пос. Рудная Пристань находится свинцово-плавильный завод ПО «Дальполиметалл» (в настоящее время не действующий), в течение XX века загрязняющий атмосферными выбросами поселок. Благодаря направлению преобладающих ветров и особенностям местного атмосферного переноса непосредственное поступление техногенных аэрозолей на площадь водосбора затруднено (Аржанова, Елпатьевский, 1990).

Данные по площади акваторий и бассейнов изучаемых озер приводятся в таблице 2.1 (Государственный...). Самым маленьким является оз. Круглое (0,27 км²), примерно в пять раз больше акватория самого большого из шести озер - Благодати (1,47 км²). Еще значительнее озера варьируют по площади водосборов: от 2,9 км² у оз. Мраморного до 180 км² – у оз. Благодати. Площадь болот в водосборных бассейнах озер оценена по топографическим картам (1:25000), вариации значений составили от 0,29 до 5,54 км². Наибольшие глубины оз. Духовского составляют 4,5 м, Мраморного – 4,8 м, Круглого – 7,8 м (Отчет..., 1990).

Сотрудниками ТИНРО и НПО ДальНИИГиМ были рассчитаны коэффициенты условного водообмена (отношение среднемноголетнего годового притока к среднемноголетнему объему стока): оз. Духовское – 16,5, Мраморное – 0,46, Круглое – 3,06. Таким образом, наибольший коэффициент водообмена имеет оз. Духовское, оно является (несмотря на возможные аномальные периоды смены водной массы за счет приливов со стороны моря) наиболее устойчивым к евтрофированию. Самое неблагоприятное, с точки зрения водообмена и устойчивости к евтрофированию – оз. Мраморное, где смена всей водной массы наблюдается раз в два года (Отчет..., 1990).

Как показано в таблице 2.1, заболоченность водосборов озер разная – от минимальной 2,8-3,4 % (Круглое, Васьковское, Духовское) до максимальной 60 % (Голубичное).

Морфометрические характеристики озер ВСА

Озера	Площадь акватории, км ²	Площадь водосбора, км ²	Удельный водосбор	Площадь болот, км ²	Заболоченность водосбора, %
Васьковское	0,36	15,8	43,9	0,53	3,4
Круглое	0,27	10,3	38,1	0,29	2,8
Голубичное	0,45	6,1	13,6	3,67	60,2
Японское	0,25	7,06	28,2	0,5	7,0
Мраморное	0,37	2,9	7,8	1,07	37,2
Духовское	1,47	180	122,4	4,40	2,4
Благодати	2,04	26,2	12,8	5,54	21,1

2.2. Материал исследования

Полевые исследования проводились во второй половине июля в 2011-2014 гг. В середине июля 2013 г. был паводок, и количество осадков, выпавших в исследованных районах с мая по июнь в 2-3 раза превышало таковое в остальные года исследований (рис. 2.2). В результате паводка, подтопления и размыва дорог к месту исследования, пробоотбор 2013 г. был смещен на начало августа. Кроме того, в связи с необходимостью определения химического состава озер в период осеннего охлаждения (Моисеенко, Гашкина, 2005), в октябре 2013 г. был осуществлен еще один отбор проб воды.

В качестве материала исследования были взяты образцы воды, взвеси, донных отложений, планктона, двустворчатых моллюсков и высших водных растений.

Выбранный вид двустворчатых моллюсков *Kunashiria coptzevi* Zatravkin et Bogatov 1987 (сем. *Unionidae*) является массовым видом для озер Васьковское, Голубичное и Японское. Вид использовался ранее как объект для биомониторинга тяжелых металлов в оз. Васьковском, что позволяет судить об изменении содержания металлов в его тканях на протяжении нескольких лет (Богатов, Богатова, 2009, Чернова и др., 2010).

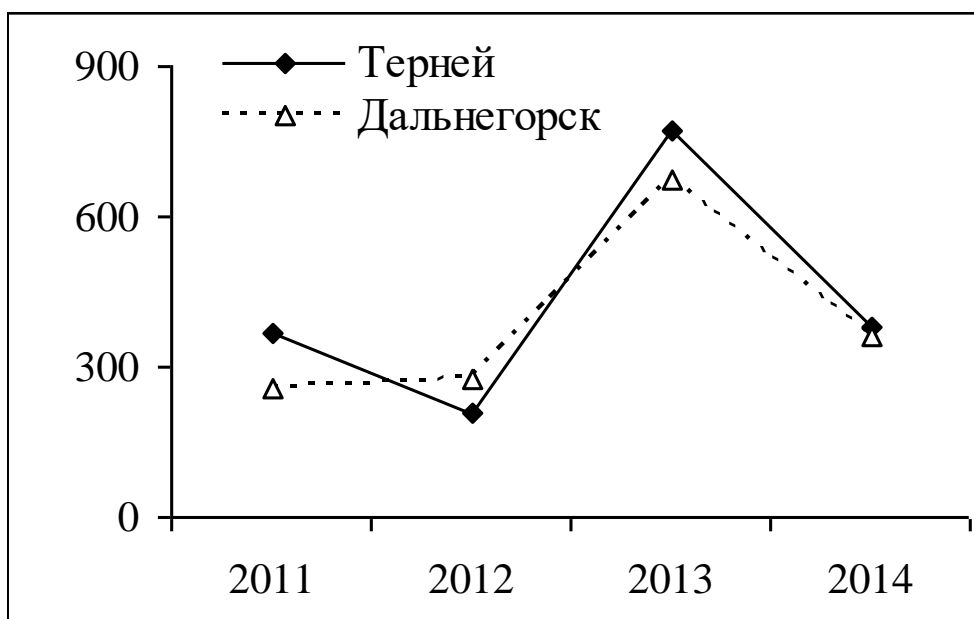


Рис. 2.2. Количество осадков (мм) за 3 месяца (с начала мая до конца июля), включая время отбора в районах исследования в 2011-2014 гг. (Расписание...).

Моллюски рода *Kunashiria* обитают в пресноводных озерах, прудах, старичных озерах, каналах оросительной системы, глубоких протоках в медленном течении на заиленном или песчаном грунте. Род менее требователен, чем некоторые другие, к температурному режиму воды, а, следовательно, и к количеству растворенного кислорода, так что их можно встретить и на хорошо прогреваемых песчаных отмелях, и в местах выхода холодных грунтовых вод (Саенко и др., 2009). Е.М. Саенко с коллегами (2009) моллюски были отмечены в бассейне р. Аввакумовка (Приморский край) вместе с двустворчатыми моллюсками рода *Corbicula*, в зоне действия солоноватых вод.

Вид *Corbicula japonica* Prime 1867 (сем. *Cyrenidae*) является массовым видом для озер Духовское и Круглое. Моллюск представляет собой ценный промысловый вид, используемый в пищевых и лечебных целях, распространение его в реках Дальнего Востока и возможности промысла изучает ТИПРО-Центр (Явнов, 2000). Исследования экологии корбикулы японской в р. Раздольной показали, что моллюск обитает в иле или в смешанно-илисто-песчано-гравийном грунте и зарывается на глубину до 45 см, наибольшие скопления обнаружены на горизонте до 25 см от поверхности грунта. Обитают моллюски при солености от

3-4 % до 20 %, активно перемещаясь в зависимости от изменения погодных условий (Явнов, 2000).

Камыш табернемонтана (*Schoenoplectus tabernaemontani* (C.C. Gmel.) Palla 1888) – многолетнее корневищное травянистое растение семейства *Cyperaceae* (Осоковые), встречается у берегов зарастающих водоемов на влажных почвах, переносит затопление до 1 м. Широко распространен по Дальнему Востоку России (Сосудистые..., 1988).

Семейство Рдестовые (*Potamogetonaceae*) включает виды, распространенные по всей России водные растения с плавающими или возвышающимися над водой соцветиями. Рдесты – пресноводные растения, лишь некоторые (в т.ч. *P. pectinatus*) способны развиваться в приморских лагунах и солоноватых озерах. Некоторые виды могут развиваться как в стоячих, так и в быстротекущих водоемах (Жизнь растений..., 1982).

2.3. Сбор, пробоподготовка и анализ образцов

Пробы воды были отобраны во второй половине июля в 2011, 2012 и 2014 гг., в августе и октябре 2013 г. с берега (2011, 2013 гг.) либо с резиновой лодки (2012, 2014 гг.). Пробы воды были отобраны в пластиковые канистры из подповерхностного (0,2-0,3 м) горизонта вдоль восточного песчаного берега с севера на юг озер Благодати и Васьковского, в северной и юго-восточной части озера Голубичного, у северо-западного берега и западного берега оз. Духовского, в озерах Мраморное и Круглое, а также в 2012 и 2014 гг. были отобраны пробы в срединной части озер.

В день отбора пробы воды фильтровались с помощью ручного вакуумного насоса через предварительно взвешенный мембранный фильтр (Millipore Durapore) 0,45 мкм. Величина pH и общая щелочность (HCO_3^-) определялись в нефильтрованных пробах по стандартной методике (ГОСТ Р 52963-2008) на pH-метре CG843P, Schott титрованием до pH 4,5. Фильтраты хранили в холодильнике в пластиковой посуде с добавлением HNO_3 до pH 1-2 – для определения металлов, и без подкисления – для определения главных ионов и растворенного органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$).

В лаборатории геохимии ТИГ ДВО РАН выполняли анализ на содержание анионов SO_4^{2-} , Cl^- на жидкостном хроматографе Shimadzu LC-10AVP (оператор - А.Г. Болдескул), катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ на атомно-абсорбционном спектрофотометре (ААС) Shimadzu 6800 (оператор – Г.А. Власова). Микроэлементы концентрировали в 100 раз жидкостной экстракцией в системе диэтилдитиокарбаминат-Na – хлороформ (Chelation/Solvent..., 1975) (аналитик – Н.Н. Богданова), определяли на ААС Shimadzu 6800 в пламенном и беспламенном (Cd, Pb) вариантах (оператор – Г.А. Власова). Степень извлечения растворенных ионных форм металлов после концентрирования неоднократно проверялась экспериментальным путем метода «введено-найдено» и составляла 85-95 %.

Величину минерализации определяли суммированием главных катионов и анионов в мг/л. Проверку результатов определения макросостава проводили методом сравнения сумм катионов и анионов в мг-экв/л. Разница эквивалентов масс катионов и анионов составляла 5-15 % для пресных и 7-18 % для солоноватоводных водоемов.

Содержание углерода растворенного органического вещества (РОВ) определяли методом термокаталитического окисления с ИК-регистрацией (анализатор ТОС-VCPN, Shimadzu) (Аналитики – В.С. Рыжаков, Т.Н. Луценко). Для каждой пробы выполнялась трехкратная автоматическая инъекция. Коэффициент вариации анализа проб и стандартов не превышал 2 %. Пробы солоноватоводных озер в ходе анализа (Духовское, Благодатное, Мраморное) разбавлялись бидистиллированной водой так, чтобы соленость вод не превышала 3 ‰. Электронные спектры поглощения фильтратов были записаны в интервале длин волн 200-600 нм на спектрофотометре Shimadzu UV-2450 PC в кварцевой кювете толщиной 1 см относительно бидистиллированной воды. Для определения углерода взвешенного органического вещества (ВОВ) пробы воды были отфильтрованы под вакуумом через стекловолоконные фильтры Whatman GF/F с диаметром пор 0,7 мкм, предварительно прокаленные при температуре 450 °C в течение 2 часов. Концентрацию углерода ВОВ определяли методом

каталитического сжигания (TOC-V_{CPN}, Shimadzu) с использованием модуля для анализа твердых образцов SSM-5000A (аналитик – В.С. Рыжаков).

В фильтрах определяли содержание биогенных веществ: силикатов (DSi), суммы нитритов и нитратов (DIN), фосфатов и общего растворенного фосфора, после окисления персульфатом. Кроме этого, аликвота нефилтрованной пробы также подвергалась кипячению с персульфатом, давая таким образом возможность оценить содержание взвешенных форм фосфора (P_{взв}). Концентрация биогенных элементов (Si, N, P) определяли спектрофотометрически (спектрофотометр ЮНИКО 1201) по общепринятым методикам: фосфаты – с молибденовокислым аммонием и аскорбиновой кислотой, нитриты и нитраты – с сульфаниламидом и нафтилэтилендиамином и восстановлением нитратов до нитритов на кадмированной медной проволоке, силикаты – с молибдатом аммония с щавелевой и аскорбиновой кислотами (Методы..., 1979; Руководство..., 1977; Унифицированные..., 1978) (аналитик – Т.Л. Примак).

Донные отложения отбирались в титановый цилиндр с глубины 0,5-1 м, высушивались до постоянного веса и расситовывались на три фракции: более 1 мм (не анализировалась), 1-0,1 мм, менее 0,1 мм. Валовое содержание в песчаной (1-0,1 мм) и алевропелитовой (менее 0,1 мм) фракции определялось озолением навески смесью фтористоводородной и хлорной кислот на плитке в вытяжном шкафу (аналитик – Н.Н. Богданова), с последующим перерастворением осадка в 2 % растворе соляной кислоты (марки ОСЧ) и определением атомно-абсорбционным методом на приборе ААС Shimadzu 6800 (оператор – Г.А. Власова).

Суммарный сестон (микрофито- и зоопланктон) отбирали из озер с весельной лодки в течение 5 минут в 2011 г. планктонной капроновой сетью Апштейна с ячейей 0,02 мм, в 2012-2013 гг. – с ячейей 0,1 мм. В 2014 г. сестон собирали двумя сетками: с ячейей 0,1 мм (крупный фито- и зоопланктон) и с ячейей 0,02 мм (мелкие микроводоросли) в 6 повторностях в оз. Благодати и в 3 повторностях в озерах Голубичное и Васьковское. Для определения плотности сестона в 2014 г. воду пропускали через планктонные сети, используя

пластиковое ведро объемом 12 л. Через фитопланктонную сеть (0,02 мм) пропускали 600 л воды, а через крупную зоопланктонную (0,1 мм) – 1200 л.

Сконцентрированный планктон и взвешенное вещество (из 1 л воды) отфильтровывали с помощью ручного вакуумного насоса SM 16673 через полимерный мембранный фильтр (Durapore) 0,45 мкм. Фильтры высушивали до постоянного веса, взвешивали до и после фильтрации для определения массы взвеси и сестона (2-98 мг/пробу).

Двустворчатых моллюсков (10 кунаширий и 15-25 корбикул) отбирали с помощью трубки и маски с глубины 1,5-2 м, очищали от обрастаний, выдерживали 48 часов в чистой воде с места сбора, отделяли мягкие ткани от раковины, высушивали. Ткани каждой особи кунаширий (длина раковины 60-80 мм) анализировали как отдельную пробу, мелкие корбикулы (длина раковины 25-35 мм) объединяли в 5 проб по 3-5 экземпляров.

Высшие водные растения объединялись в пробу из нескольких экземпляров (1-2 для камышей, 5-10 для рдестов). Рдесты анализировали целиком (стебли с листьями и корни), камыш делили на корневища и зеленые побеги и анализировали отдельно.

Фильтры с планктоном и взвесью озоляли в муфельной печи при температуре 450 °С и разлагали смесью HF+HClO₄. Высушенные и измельченные ткани моллюсков и высшие водные растения озоляли концентрированной HNO₃ марки ОСЧ в микроволновой печи MARS 5. Содержание металлов в пробах определяли атомно-абсорбционным методом на приборе Shimadzu 6800 в пламенном (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cd) и беспламенном (Pb – во всех пробах, Cd – в воде, взвеси и планктоне) вариантах.

Корректность определения концентраций металлов в образцах контролировалась холостыми опытами и регулярным анализом стандартных образцов донных осадков BCSS-1, моллюсков NBS Oyster 1566a, разлагавшихся, как и соответствующие пробы (табл. 2.2). При определении концентрации Pb и Cd во взвеси и планктоне, Pb в моллюсках и высших водных растениях методом беспламенной атомизации проводили дополнительный контроль методом

стандартных добавок, воспроизводимость которых была не хуже 80-85 %. Пределы обнаружения элементов и ошибки измерения приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.2

Сравнение полученных концентраций металлов в стандартных образцах с паспортными данными (мкг/г)

ТМ	BCSS-1		RM 8704		NBS 1566a	
	Паспорт.	Фактич.	Паспорт.	Фактич.	Паспорт.	Фактич.
Cu	18,5±2,7	17,4	-	-	66,3±4,3	61±10,3
Fe	4,70±0,14%	3,53%	3,97±0,10%	3,59±0,02%	539±15	525±5,72
Ni	55,3±3,6	н.о.	42,9±3,7	44,8±0,95	2,25±0,44	3,03±0,08
Mn	229±15	216	544±21	466±5,8	12,3±1,5	14,2±0,69
Zn	119±12	86	408±15	358±3,7	830±57	829±52
Cd	0,25±0,04	0,31	2,94±0,29	2,40±0,02	4,15±0,38	3,58
Pb	22,7±3,4	20,5	150±17	141±0,53	0,371±0,014	0,224

Примечание к табл. 2.2: ТМ – тяжелый металл; Паспорт. – паспортные данные; Фактич. – фактически полученные концентрации металлов; прочерк – нет данных; н.о. – не обнаружено.

Среднегодовые значения концентраций металлов и стандартное отклонение определяли с помощью пакета программ Excel. Проверку достоверности различий между концентрациями металлов в зависимых выборках компонентов трофической цепи озер (взвесь – планктон и планктон – моллюски) проводили с помощью непараметрического критерия Вилкоксона в программе Statistica 6.0.

Количество отобранных проб из 7 озер составляет: 47 проб воды, 56 проб взвеси, 48 проб планктона, 210 проб высших водных растений, 78 проб моллюсков (и около 1800 элементоопределений).

Пределы обнаружения элементов и ошибка измерения

Эл-т	Чувствительность по методике	Фактические минимальные значения	Относительное стандартное отклонение
N-NO ₂ ⁻	0,7 мкг N/л	0,2 мкг N/л	5 %
N-NO ₃ ⁻	10 мкг NO ₃ ⁻ /л	0,6 мкг N/л	5 %
P-PO ₄ ³⁻	5 мкг P/л	0,6 мкг N/л	2 %
Si ⁴⁺	0,05 мкмоль/л	1 мкг N/л	10 %
N-NH ₄ ⁺	0,05 мг NH ₄ ⁺ /л	2 мкг NH ₄ ⁺ /л	~15 %

Примечание к таблице 2.3: Эл-т – элемент.

3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КОМПОНЕНТОВ ЭКОСИСТЕМ ОЗЕР ВОСТОЧНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ

3.1. Элементный и ионный состав абиотических компонентов озерных экосистем

3.1.1. Макроэлементный состав вод

По классификации А.В. Щербакова (Никаноров, 2008) исследованные озера можно разделить на пресные (оз. Голубичное, Круглое, Японское, Васьковское), с минерализацией 0,01-0,13 г/л и солоноватоводные (оз. Благодати, Духовское, Мраморное) с минерализацией 0,25-18,0 г/л. Воды первой группы озер имели нейтральную реакцию среды (рН=6,05-7,05), второй – от нейтральной до щелочной (рН=6,66-8,65) (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Водородный показатель и минерализация (Σ , г/л) озер ВСА

Озера	Годы	рН	Σ , г/л	n
Васьковское	2011-2014	6,64±0,03 (6,13-7,05)	0,03±0,01 (0,01-0,03)	10
Голубичное	2011-2014	6,65±0,36 (6,05-7,03)	0,03±0,01 (0,02-0,04)	6
Японское	2012-2013	6,42-7,00 6,69±0,29	0,02-0,03 0,03±0,01	3
Круглое	2012-2013	6,56±0,10 (6,42-6,64)	0,09±0,03 (0,06-0,13)	3
Мраморное	2012-2013	6,84±0,20 (6,66-7,05)	2,58±1,35 (1,13-3,81)	3
Духовское	2012-2013	7,37±0,70 (6,66-8,06)	1,07±0,71 (0,25-1,50)	4
Благодати	2011-2014	8,08±0,38 (7,60-8,65)	9,62±5,89 (1,00-18,00)	7

Примечание к табл. 3.1: Среднее значение плюс-минус стандартное отклонение (в скобках – минимальное и максимальное значения); n – количество проб.

По классификации О.А. Алекина (Никаноров, 2008) воды пресных озер Васьковское и Круглое, в зависимости от водного режима, принадлежали хлоридному, либо гидрокарбонатному классу, группа натрия. Воды озер Японское

и Голубичное относились к гидрокарбонатному классу, группа натрия. Озера Голубичное и Круглое принадлежали типу I ($\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), а Васьковское и Японское – типу II ($\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$). Воды солоноватоводных озер Мраморное, Духовское и Благодати принадлежали к хлоридному классу, группе натрия, тип III, с преобладанием ионов Cl^- над Na^+ (табл. 1 – Приложение).

Таким образом, макрокомпонентный химический состав вод исследованных пресных озер восточного Сихотэ-Алиня (ВСА) является преимущественно хлоридно- или гидрокарбонатно-натриевым. Это отличает данные озера от водоемов, расположенных на европейской территории РФ, для которых более характерен гидрокарбонатно-кальциевый состав (Моисеенко и др., 2006). Одной из причин этого является бедность исходного литогенного субстрата геосистем восточного склона Сихотэ-Алиня кальцием (Елпатьевский, 1993), что обуславливает низкие его концентрации в пресных водах региона, в частности в исследованной группе озер – 1,55-3,37 мг/л (табл. 1 – Приложение). Причиной повышенной концентрации хлорид-ионов, сульфат-ионов и натрия даже в пресных озерах является перенос морских аэрозолей с близлежащих морских акваторий. В стратифицированном оз. Круглом проникновение морских вод в нижние горизонты происходит за счет дренирования вод через песчаную перемычку, а также при действующей протоке во время прилива. Так как соленая вода тяжелее пресной, придонная линза солоноватоводных вод сохраняется в озере длительное время (Разработка..., 1990). Это ведет к повышению концентраций хлорид-ионов, сульфат-ионов и ионов натрия, причем не только в придонных солёных слоях воды, но и в пресных поверхностных в период осеннего перемешивания (табл. 7 – Приложение).

Химический состав солоноватоводных озер формируется за счет вклада морских вод, которые постоянно (Духовское, Мраморное) или периодически (Благодати) обогащают озера макроионами морского происхождения (Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+). В озерах Духовское, Мраморное, также, как и в Круглом, установлена термическая и гидрохимическая стратификация вод (Разработка..., 1990).

Содержание углерода РОВ в воде исследованных озер варьировало от 1,9 до 8,6 мг/л, углерода ВОВ – от 0,3 до 3,7 мг/л (рис. 3.1, табл. 2 – Приложение) (Лысенко, 2011; Луценко и др., 2012, 2014, 2015). В озерах Голубичное и Благодати содержание углерода РОВ было самым высоким (4,1-8,2 мг/л), по сравнению с другими озерами, что связано с высокой степенью заболоченности их водосбора (21 и 60 %, соответственно). Оз. Японское находится в промежуточном положении: содержание углерода – 5,5-8,6 мг/л для РОВ, 0,61-1,2 для ВОВ, при 7,0 % заболоченности водосбора.

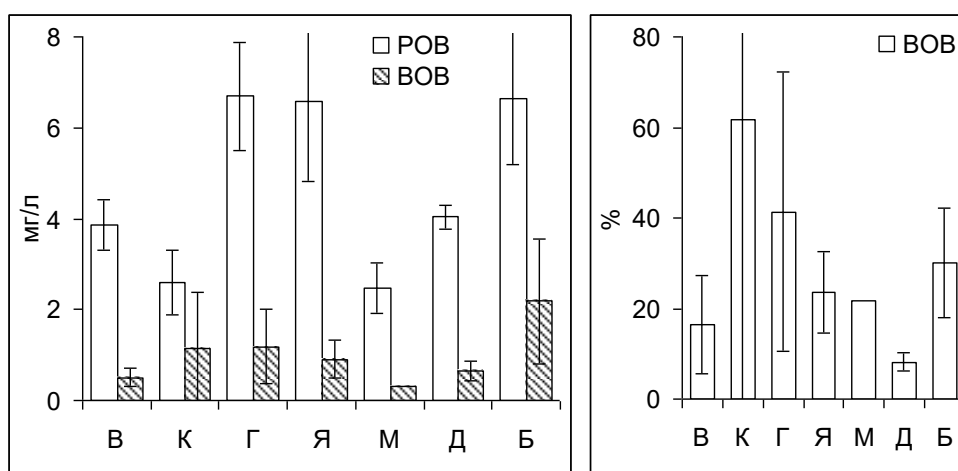


Рис. 3.1. Содержание углерода растворенного и взвешенного вещества в воде озер ВСА в 2011-2014 гг. (РОВ и ВОВ, соответственно, столбики – средние значения, отрезки – стандартное отклонение).

Примечание к рис. 3.1: В – Васьковское, Г – Голубичное, Я – Японское, Д – Духовское, М – Мраморное, К – Круглое, Б – Благодати.

В особом положении находится озеро Мраморное: при достаточно высоком вкладе болот в его водосборный бассейн (до 37 %), содержание углерода РОВ составляло всего 1,9-3,0 мг/л. Причиной может быть слабый водообмен (низкая величина удельного водосбора – 7,8), что обуславливает пониженное поступление аллохтонного РОВ. Кроме того, сероводородный запах, черный цвет донных осадков и наблюдаемое снижение концентрации кислорода в придонном слое воды в оз. Мраморном (Разработка..., 1990) свидетельствуют об анаэробных условиях разложения органических веществ, сульфат-редукции и осаждении

сульфидного железа. Возможно, что в этих условиях происходит соосаждение и выведение из раствора некоторых фракций РОВ. Характерные признаки процесса сульфат-редукции были отмечены и в литоральной зоне протоки, соединяющей озеро Благодати с морем, а также в вершинной, кутовой части озера Духовское.

В июльский паводок 2013 г произошло разбавление вод озер за счет атмосферных осадков, что привело к снижению содержаний большинства главных ионов, особенно заметное в солоноватоводных озерах (рис. 3.2). Повышенное количество главных ионов в оз. Благодати в 2014 г. связано с тем, что в момент отбора проб протока была открыта и морские воды поступали в озеро – впервые за четыре года исследований, что значительно повлияло на макроэлементный состав.

Подобного существенного влияния паводка на макроэлементный состав пресных озер не наблюдалось (рис. 3.3).

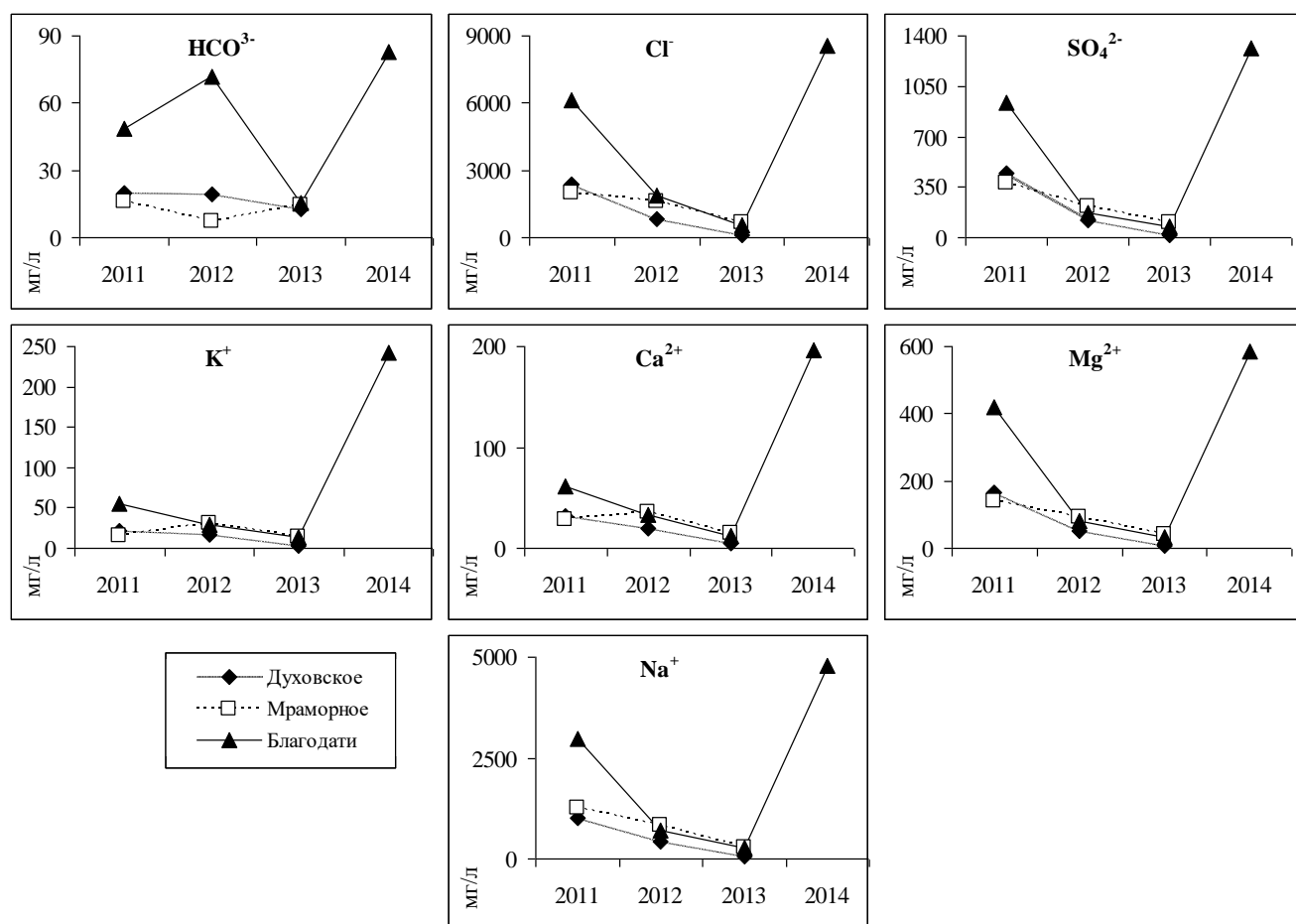


Рис. 3.2. Изменение содержания макроионов (мг/л) в солоноватоводных озерах ВСА в разные годы исследований

Оз. Круглое выделяется необычным изменением ионного состава в 2013 г., отличным как от пресных озер, так и от солоноватоводных, так как пресным является только поверхностный слой (Разработка...1990). Осадки, вероятно, вызвали перемешивание поверхностного слоя и более глубоких соленых масс (рис. 3.2-3.3), что привело к осолонению поверхностного слоя воды после паводка.

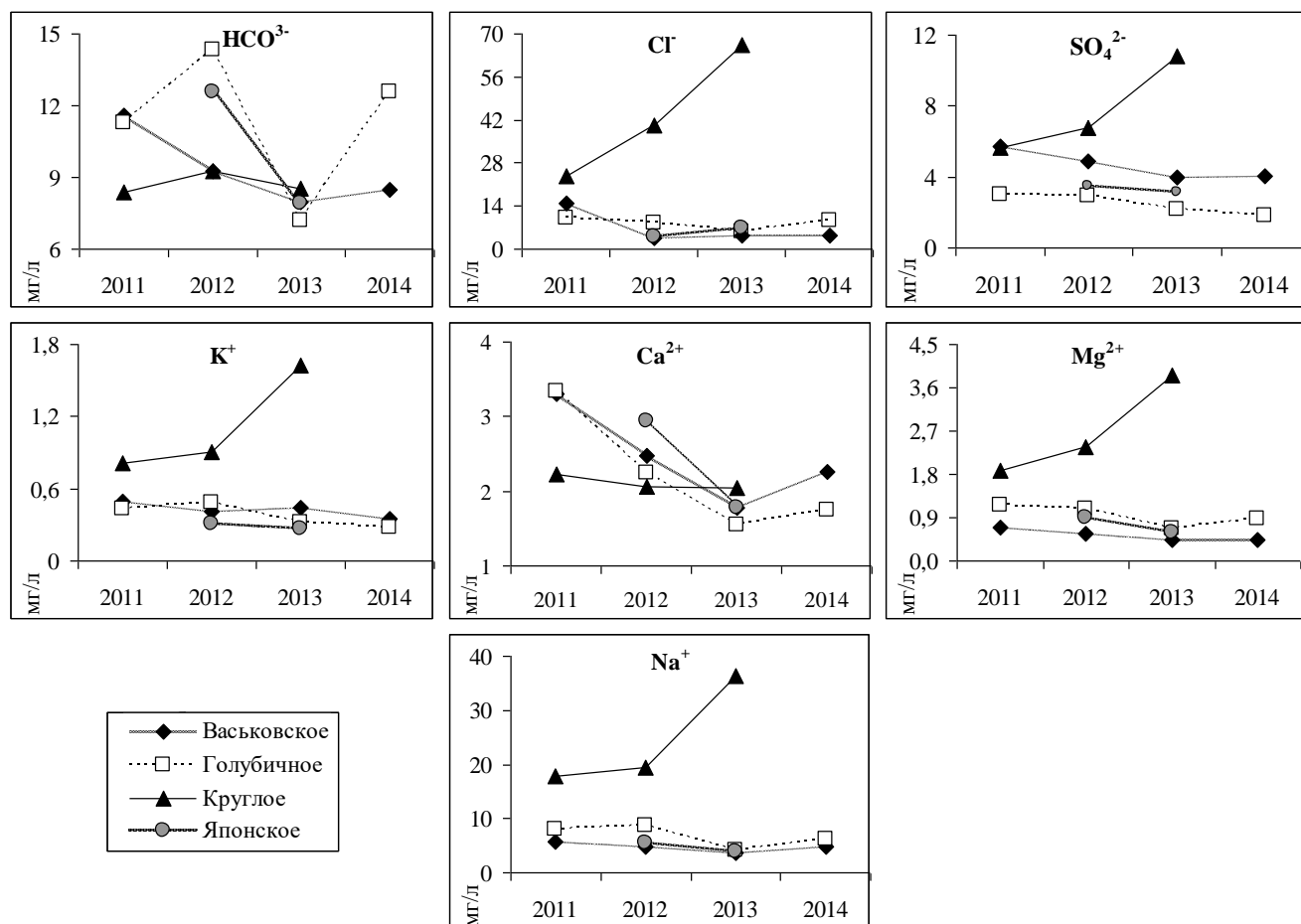


Рис. 3.3. Изменение содержание макроионов (мг/л) в пресных озерах ВСА в разные годы исследований

Таким образом, исследованные озера восточного Сихотэ-Алиня (ВСА) делятся на пресные (оз. Голубичное, Японское, Васьковское, Круглое) и солоноватоводные (оз. Благодати, Духовское, Мраморное), с рН среды от нейтральной до щелочной. Макрокомпонентный химический состав вод является преимущественно хлоридно- или гидрокарбонатно-натриевым. Содержание углерода РОВ и ВОВ в большинстве озер связано с заболоченностью водосбора.

Паводок 2013 г. привел к снижению большинства ионов в солонатоводных озерах и практически не отразился на их концентрациях в пресных.

3.1.2. Растворенные и взвешенные микроэлементы

Содержание растворенных форм всех металлов, кроме Fe и Mn, в озерах восточного Сихотэ-Алиня было в основном ниже 1 мкг/л: Cu – 0,09-0,72 мкг/л, Ni – 0,1-0,88 мкг/л, Cd – 0,001-0,068 мкг/л, Pb – 0,001-0,21 мкг/л (рис. 3.4-3.5, табл. 3-4 – Приложение). Содержание Zn несколько больше – 0,27-4,44 мкг/л. Содержание растворенных Fe и Mn сильно колебалось за годы исследований: концентрации Mn – 0,38-37,1 мкг/л, концентрация Fe в озерах с заболоченным водосбором Голубичное и Благодати колебалась в пределах от 5,49 до 500 мкг/л, в других озерах Fe находилось в диапазоне 14,1–121 мкг/л (Лысенко, 2012, 2014; Лысенко, Чернова, 2012, 2014, 2015; Чернова и др., 2014а, 2014б, 2015).

В целом, полученные нами концентрации металлов в водах малых озер восточного Сихотэ-Алиня – Cu, Ni и Cd – находятся в диапазоне уровней содержания, определенном для поверхностных водотоков этого района ранее (табл. 3 – Приложение: Шулькин и др., 2009). Концентрации Fe и Mn в основном тоже сопоставимы с речными, кроме озер с заболоченным водосбором (Благодати, Голубичное). Концентрации Zn в озерах оказались несколько ниже или равны, а Pb – выше или равны речным. Сумма концентраций растворенной и взвешенной форм всех металлов не превышает наиболее жестких рыбохозяйственных предельно допустимых концентраций (ПДК_{p/x}).

В наиболее антропогенно-измененном оз. Васьковском повышенных концентраций растворенных металлов не наблюдается. Сумма обеих форм Pb в воде (в мкг/л) не превышает предельно допустимых концентраций в рыбохозяйственных водоемах, а также в питьевой воде (СанПиН 2.1.4.1074-01).

Относительно средней концентрации растворенных металлов в реках мира (Gaillardet et al., 2003) содержание Cu, Cd, Mn и Ni было ниже таковых, Pb, Zn и Fe – в диапазоне или выше.

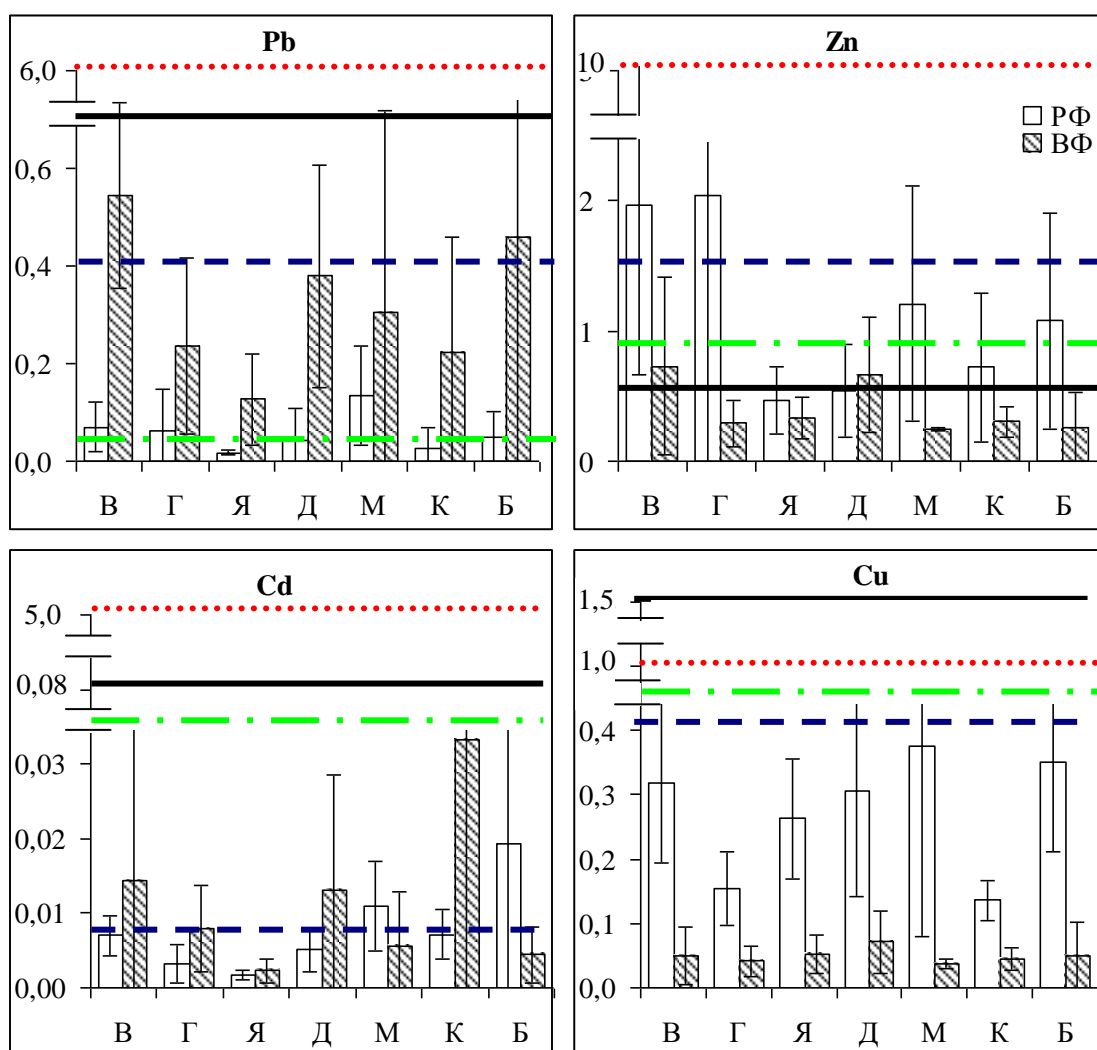


Рис. 3.4. Содержание растворенной (PФ) и взвешенной (ВФ) форм Pb, Cu, Cd и Zn в озерах ВСА (мкг/л, средние значения и стандартное отклонение)

Примечание к рис. 3.4: В – Васьковское, Г – Голубичное, Я – Японское, Д – Духовское, М – Мраморное, К – Круглое, Б – Благодати; — средняя концентрация растворенных металлов в реках мира (Gaillardet et al., 2003), - . - средняя концентрация растворенных металлов реках ВСА (Шулькин и др., 2009), ПДК_{р/х} (сумма растворенных и взвешенных форм – (СанПиН 2.1.4.1074-01)), — — — средняя концентрация растворенных металлов в озерах Восточно-Европейской равнины (Моисеенко, Гашкина, 2007).

Низкие концентрации макро- и микроэлементов в поверхностных водных объектах, в том числе, в озерах ВСА, связаны с формированием этих вод за счет атмосферных осадков, которые незначительно трансформируются, проходя через

почвенно-биотический блок ландшафтов и грубообломочный слой продуктов выветривания плотных коренных пород – устойчивых к выветриванию эффузивных вулканических пород (Елпатьевский, 1993).

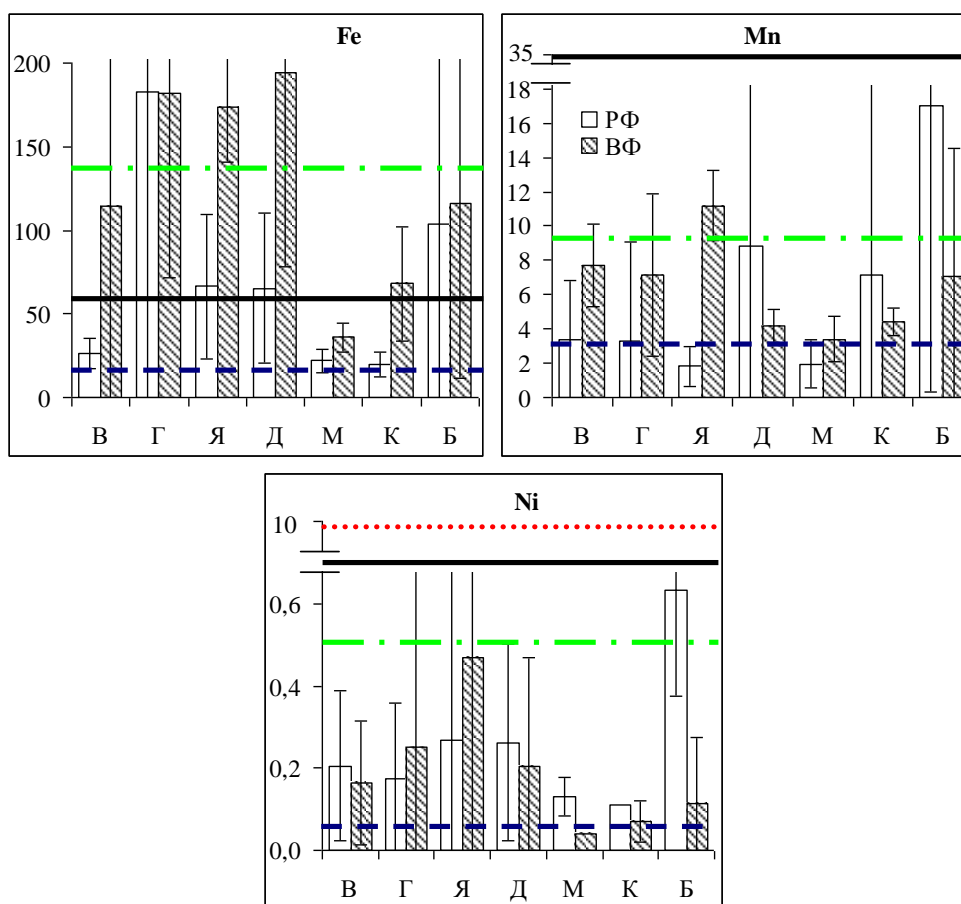


Рис. 3.5 Содержание растворенной и взвешенной форм Fe, Mn и Ni в озерах ВСА (мкг/л, средние значения и стандартное отклонение)

Примечание к рис. 3.5: обозначения как на рис. 3.4.

Таким образом, в целом концентрации металлов в водах малых озер восточного Сихотэ-Алиня – Cu, Ni и Cd – находятся в диапазоне уровней содержания, определенном для поверхностных водотоков этого района, концентрации Fe и Mn из озер с заболоченным водосбором выше таковых, концентрации Zn несколько ниже или равны, а Pb – выше или равны речным. Сумма концентраций растворенной и взвешенной форм всех металлов не превышает наиболее жестких рыбохозяйственных предельно допустимых концентраций.

3.1.3. Содержание микроэлементов во взвеси

Удельная концентрация металлов во взвеси (син. – взвешенное вещество (ВВ)) генетически связана с горными породами водосбора, степенью их нарушенности в связи с добычей полезных ископаемых. Концентрации металлов во взвеси озер (рис. 3.6-3.7, табл. 5 – Приложение) восточного Сихотэ-Алиня составляли (в порядке увеличения концентраций, мкг/г сух. массы) 0,222-7,37 – Cd, 2,36-60 – Cu, 2,06-364 – Pb, 6,88-501 – Ni, 16,8-539 – Zn; содержание Mn и Fe – 261-8707 и 11309-152694, соответственно. Пресные озера заметно отличались от солоноватоводных повышенным содержанием почти всех металлов, кроме Cu и Mn, кроме того, взвесь из оз. Васьковского отличалась повышенным содержанием Pb и Zn. Это свидетельствует о продолжающемся антропогенном влиянии на акваторию и водосбор озера.

Известно, что в паводок происходит мобилизация растворенных и взвешенных металлов из почв и вынос их в водные объекты. Если паводок достаточно длительный, то вымывания элементов из почв уже не происходит и в водный объект продолжают поступать чистые дождевые воды (Шулькин, Никулина, 2015). После схода воды в паводок 2013 г. повышенного содержания металлов во взвеси, в том числе Fe и Mn, в озерах не наблюдается, даже в таковых с повышенным вкладом болотных вод (Благодати и Голубичное) (табл. 8 – Приложение), в остальных озерах имеют место отдельные изменения концентрации металлов во взвеси, как в сторону увеличения после паводка, так и уменьшения.

Если сравнивать содержание металлов во взвеси изученных озер и рек восточного Сихотэ-Алиня (Чудаева, Чудаев, 2011), средние концентрации Cu в озерной взвеси ниже, Cd и Pb – выше, а Ni и Zn приблизительно равны речным.

По сравнению с реками мира (Гордеев, Лисицын, 1978; Савенко, 2006) содержание большинства ТМ во взвеси озер ниже, кроме Pb, Cd и Mn, концентрации которых равны или несколько больше средних концентраций во взвеси рек мира; исключение составляет Pb во взвеси озера Васьковское, концентрация которого значительно выше, чем среднее содержание в реках мира.

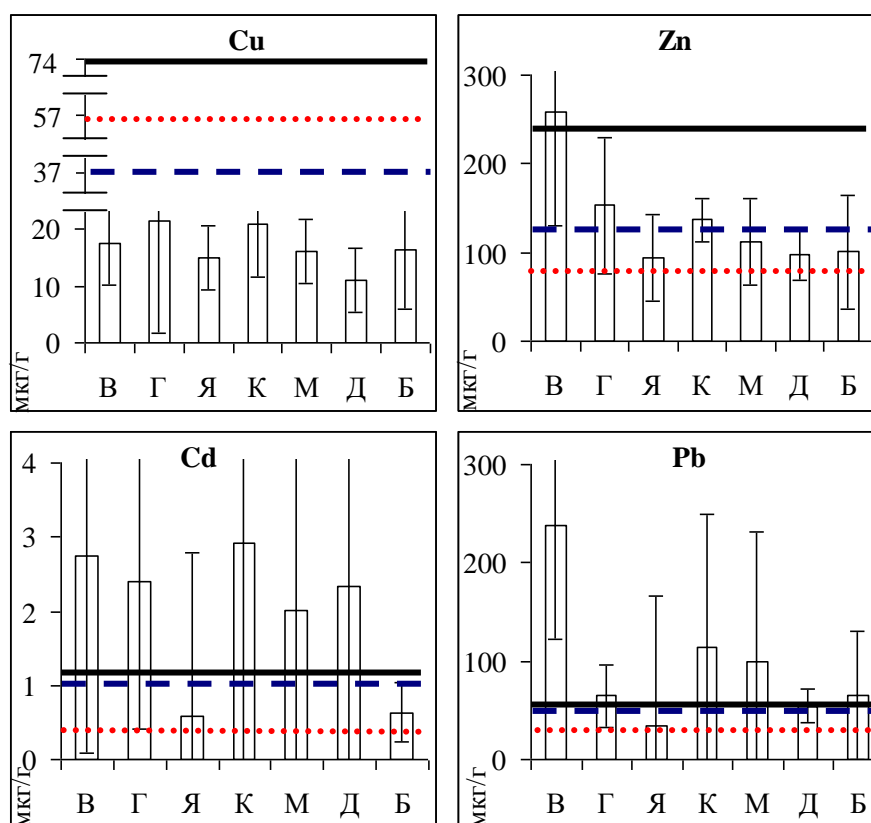


Рис. 3.6. Содержание Pb, Cu, Cd и Zn во взвеси озер ВСА (мкг/г).

Примечание к рис. 3.6: В – Васьковское, Г – Голубичное, Я – Японское, Д – Духовское, М – Мраморное, К – Круглое, Б – Благодати; — среднее в реках мира (Савенко, 2006, среднее геометрическое), - - среднее в реках ВСА (Чудаева, Чудаев, 2011), среднее в осадочных горных породах (Григорьев, 2003).

По сравнению со средним содержанием (К) микроэлементов в осадочных породах (Григорьев, 2003), ВВ озер содержит в целом сопоставимые концентрации железа ($K = 3,54\%$); обогащено Zn в 2-3 раза ($K=43$ мкг/г), и только взвесь из оз. Васьковского - в 6 раз. ВВ обогащено марганцем в 1-4 раз ($K=0,083\%$), свинцом в 3-10 раз (в 20 раз в оз. Васьковском – $K = 12$ мкг/г), кадмием – в 2,5-3 раз (и обеднена в озерах Японское и Благодати – $K=0,8$ мкг/г). Содержание меди во ВВ озер ВСА в 1,5-3 раза ниже, чем средние содержания микроэлементов в осадочных породах ($K = 31$ мкг/г), а концентрации никеля во ВВ зависят от озера: в Васьковском, Голубичном и Японском наблюдается обогащение ВВ (1,5-4 раза), в остальных озерах – обеднение (1-2,6 раз, $K = 37$ мкг/г) (рис. 3.7). Это подтверждает вывод о повышенном фоновом уровне содержания Pb, Cd, Zn и Mn

в горных породах водосборного бассейна озер, в связи с их принадлежностью к участку ВСА с повышенной минерализацией (Чудаева, 2002).

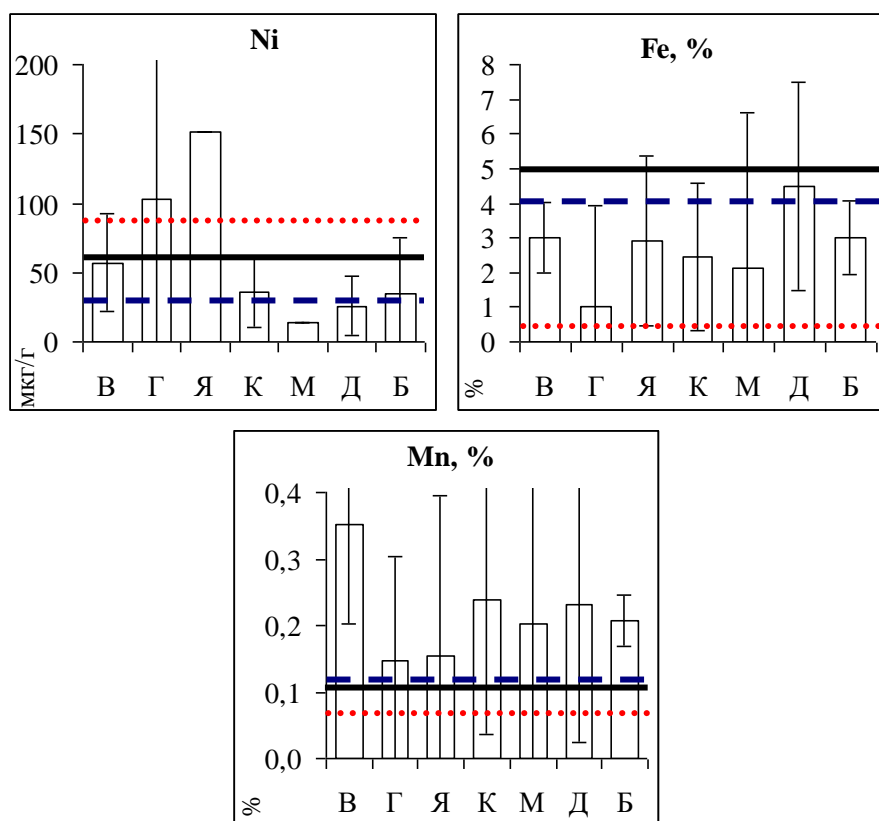


Рис. 3.7. Содержание Ni (мкг/г), Fe и Mn (%) во взвеси озер ВСА

Примечание к рис. 3.7: обозначения как на рис. 3.6.

Таким образом, пресные озера заметно отличались от солоноватоводных повышенным содержанием во взвеси почти всех металлов, кроме Cu и Mn, кроме того, взвесь из оз. Васьковского отличалась повышенным содержанием Pb и Zn. Это свидетельствует о продолжающемся антропогенном влиянии на акваторию и водосбор озера. После схода воды в паводок 2013 г. повышенного содержания металлов во взвеси не наблюдалось. Содержание Cu во взвеси озер ВСА ниже, Cd и Pb – выше, а Ni и Zn приблизительно равны таковым в реках этого же района.

3.1.4. Содержание тяжелых металлов в донных отложениях

Практически все исследованные донные осадки были отобраны из литоральной зоны озер, с глубины 1 м, представляющей собой зону транспорта твердых частиц в наиболее глубокие части, где происходит их захоронение. В связи с этим в осадках преобладает более тяжелая песчаная фракция (0,1-1 мм –

рис. 3.8). Исключение составляет оз. Круглое, с преобладающей крупной фракцией (87 %), и оз. Духовское, где на алевропелитовую и песчаную фракции приходится 35 и 39 % материала соответственно (Лысенко, 2013).

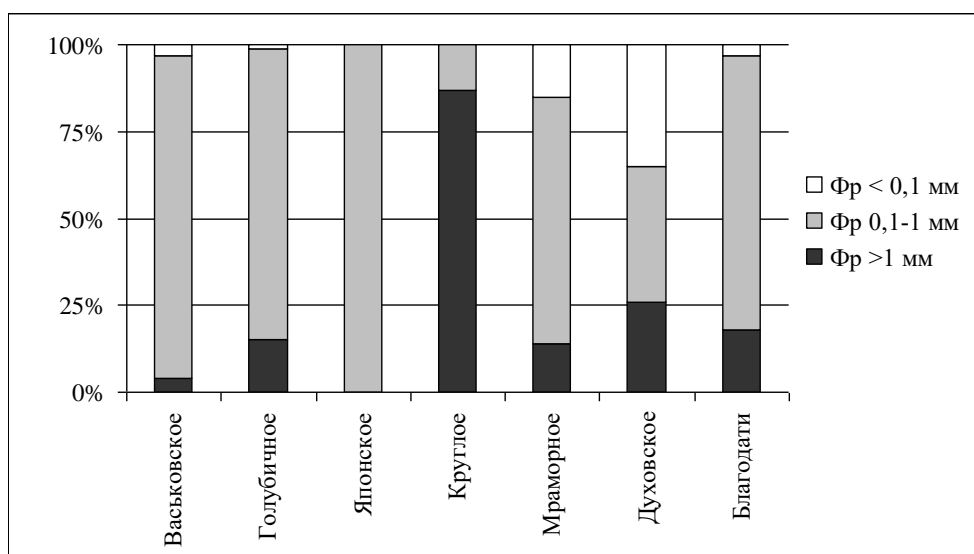


Рис. 3.8. Процентное соотношение фракций ДО в исследованных озерах в 2011 г.

Примечание к рис. 3.8: Фр – фракция ДО (размер в мм).

Тонкая алевропелитовая фракция накапливает более высокие концентрации металлов, за счет увеличения удельной площади их поверхности. Более легкие и обогащенные металлами алевропелитовые частицы в наибольшей степени будут оказывать влияние на микроэлементный состав живых организмов, т.к. они с током воды попадают в жаберный аппарат водных беспозвоночных, прилипают к поверхности водных растений и усваиваются ими в процессе растворения в связи с подкислением-подщелачиванием среды в разные фазы фотосинтеза. Исходя из гранулометрического состава ДО озер (рис. 3.8), можно утверждать, что влияние микроэлементного состава алевропелитов на химический состав высших водных растений, кроме оз. Духовского, будет незначительным из-за небольшого их вклада в общую массу грунта в местах обитания последних.

Итак, алевропелиты озер богаче микроэлементами (табл. 6 – Приложение), чем пески, что согласуется с более высокой способностью этой фракции к адсорбции ионов металлов. Содержание металлов в алевропелитовой фракции в

целом повторяет таковое в песках (табл. 6 – Приложение), но имеет свои особенности в связи с тем, что состав этих фракций формируется из разных источников – не только обломков горных пород, но и взвешенных органических и неорганических частиц автохтонного и аллохтонного происхождения. Однако есть и исключение – донные осадки озер Мраморное и Духовское отличаются от других исследованных озер сопоставимыми концентрациями микроэлементов в песках и алевропелитах, вероятно, в связи с низкой степенью трансформации химического состава горных пород, слагающих водосбор и отсутствием других существенных источников металлов в водосборном бассейне.

Различия между концентрациями металлов в ДО озер – заповедных и не заповедных, пресных и соленых составляли не более чем 2-3 раза (табл. 6 – Приложение).

Наиболее высокие концентрации металлов наблюдаются в тонкой фракции ДО озер Васьковское (Zn, Cu, Pb, Mn), Мраморное (Zn, Cu), Круглое (Cu), Голубичное (Cd, Mn), Благодати (Cd, Mn). Однако только концентрация Pb в алевропелитах оз. Васьковского превышала уровни вероятного негативного биологического эффекта (PEL – (Interim..., 1995)). Кроме того, содержание Cu, Zn и Cd в алевропелитах и Pb в песках этого озера достигали величин концентраций, ниже которых негативных биологических эффектов не наблюдается (TEL – (Interim..., 1995)). В осадках озер Круглое и Мраморное также отмечается превышение концентраций Cu и Pb, Zn и Pb, соответственно, над TEL. Причем, если в осадках оз. Круглого такой эффект наблюдается только для алевропелитов, которые составляют сотые доли процента в массе осадка в районе обитания живых организмов (на литорали), то для оз. Мраморного повышенные концентрации Pb наблюдаются как в алевропелитах, так и в песках. С учетом невысокого вклада алевропелитов в общую массу осадка только содержание свинца способно оказывать негативное влияние на живые организмы озер.

Сравнение химического состава алевропелитов с таковым взвеси, показало, что, относительно последней, мелкая фракция донных осадков обеднена большинством металлов в 2-10 раз: Ni, Mn, Zn, Cd и Pb; частично – Cu

(Голубичное, Японское, Мраморное, Благодати), и только содержание Fe в алевропелитах и взвеси большинства озер сопоставимо (взвесь Голубичного и Благодати незначительно обогащена железом по отношению к осадкам этих озер – в 2-3 раза) (табл. 6 – Приложение).

Сравнение химического состава ДО озер со средними содержаниями химических элементов в осадочных горных породах (Григорьев, 2003) показало, что содержание металлов в песках исследованных озер в основном сопоставимы или ниже средних содержаний в горных породах (табл. 6 – Приложение). В донных отложениях оз. Японского и Васьковского несколько выше содержание Mn, во всех озерах, кроме Благодати и Голубичного, содержание Zn выше таковых в горных породах. Содержание Pb в обеих фракциях донных отложений озер ВСА выше такового в горных породах, что свидетельствует о проявлении на этой территории влияния Тихоокеанского рудного пояса.

Таким образом, так как доля тонкой алевропелитовой фракции, накапливающей наибольшие концентрации микроэлементов, в донных отложениях исследованных озер была невелика (1-35 %), можно утверждать, что ее влияние на микроэлементный состав биоты будет незначительное. Различия между концентрациями металлов в ДО озер заповедных и не заповедных, пресных и соленых составляли не более чем 2-3 раза, и только концентрация Pb в алевропелитах оз. Васьковского превышала уровни вероятного негативного биологического эффекта.

3.1.5. Геохимические особенности оз. Васьковского

Акватория оз. Васьковского расположена на территории Дальнегорского района, специализирующегося на добыче и переработке полиметаллических и боросиликатных руд. Озеро находится в зоне возможного влияния аэротехногенных выбросов закрытого в 2009 г. свинцовоплавильного завода в пос. Рудная Пристань. Преобладающий атмосферный перенос не способствовал загрязнению озера, однако ветры других направлений, а также атмосферные осадки, в течение длительного времени (с 1932 г.) приносили на водосбор оз. Васьковского определенное количество антропогенных аэрозолей, загрязненных

свинцом, а также цинком и кадмием. В результате, донные отложения, водная растительность и моллюски озера накапливали повышенные концентрации Pb, Zn и Cd (Чернова и др., 2014), причем Pb в донных осадках присутствовал в количествах, превышающих величины, при которых не наблюдаются биологические эффекты (Чернова и др., 2014; Interim..., 1995).

Уровень концентрации растворенных и взвешенных металлов в воде оз. Васьковского в целом не отличается от таковых в других исследованных озерах (рис. 3.4-3.7). Это свидетельствует о продолжающемся антропогенном влиянии на акваторию и водосбор озера, вероятно, за счет разноса загрязнителей, накопившихся в почвах нижнего течения р. Рудная и вторичного загрязнения из ДО, так как содержание металлов в ручье, питающем озеро в юго-западной его части, было низко как в растворенной, так и во взвешенной формах (табл. 3, 4 - Приложение). Тем не менее, суммарное количество этих металлов в растворенной и взвешенной формах в воде из оз. Васьковского составляло 1,09-6,74 мкг/л для Zn и 0,23-0,97 мкг/л для Pb, что суммарно существенно ниже предельно-допустимых концентраций этих металлов для питьевых вод (5 и 0,03 мг/л, соответственно – (СанПиН 2.1.4.1074-01)).

Наблюдение за содержанием металлов в разных горизонтах водного столба оз. Васьковского в 2012 г. показало, что количество взвеси, растворенных и взвешенных металлов (Fe, Mn) на горизонтах 5 и 8 м было выше, чем в поверхностном слое, а содержание растворенного кислорода и растворенного органического углерода снижалось (рис. 3.9-3.10). В то же время, по макроионам (Ca, Na), другим растворенным металлам (Zn, Pb, Cu) стратификация воды в оз. Васьковском практически отсутствовала.

Известно, что для озер с глубиной более 3 м характерна термическая стратификация, т.е. отсутствует полное перемешивание слоев. Последствием стратификации является неоднородность химического состава воды разных горизонтов. Наиболее ярко это проявляется не в различиях концентраций главных ионов, а растворенных газов, биогенов и микроэлементов (Горбунов, 2007), что характерно и для оз. Васьковского.

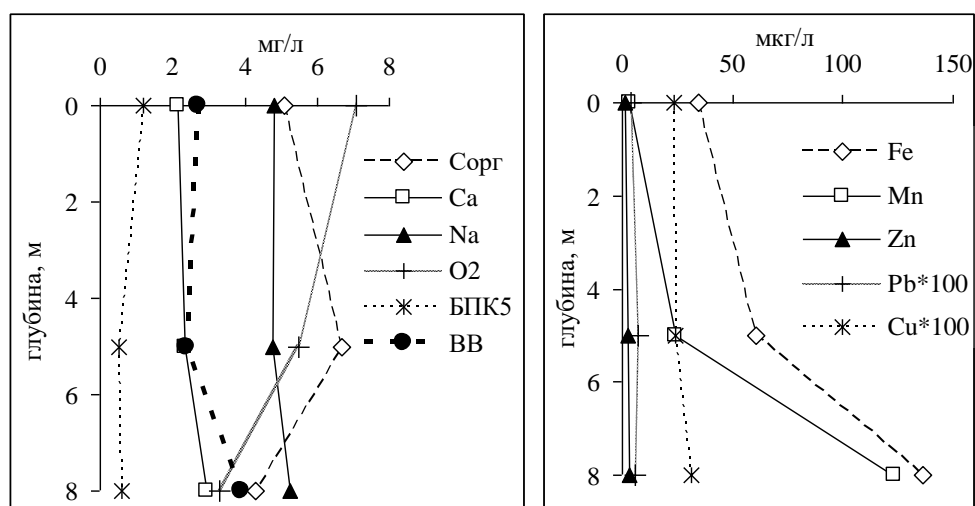


Рис. 3.9. Изменение макро- и микроэлементного (растворенного) состава вод оз. Васьковского с глубиной в июле 2012 г.

Примечание к рис. 3.9: $C_{орг}$ – углерод растворенного органического вещества; O_2 – растворенный кислород; БПК₅ – 5-суточное биохимическое потребление кислорода; ВВ – взвешенное вещество (мг/л); Fe, Mn, Zn (мкг/л), (Pb*100, Cu*100 – 100-кратные концентрации растворенных Pb и Cu (мкг/л).

Вероятно, хороший кислородный режим, по крайней мере, в поверхностном слое, способствует окислению органического вещества, переводу растворенных соединений тяжелых металлов во взвешенное состояние, а высокая скорость седиментации взвешенных частиц, о чем свидетельствует малое количество взвешенных веществ – 2,4-3,9 мг/л, благоприятствует освобождению вод озера от микроэлементов. При этом в придонном слое из-за недостатка кислорода могут создаваться восстановительные условия, что объясняет повышение содержания растворенных форм некоторых металлов (Fe, Mn) с глубиной. Макроионы также освобождаются в процессе окисления органического вещества, однако их концентрации в растворе на порядки выше, поэтому их изменения с глубиной не столь заметны.

Таким образом, в наиболее антропогенно измененном оз. Васьковском, используемом как источник питьевой воды для пос. Рудная Пристань и испытывавшем фоновое аэротехногенное загрязнение от горнорудных производств Дальнегорского района, не наблюдается повышенного содержания

растворенного Pb, хотя концентрации этого металла во взвеси в нем повышены, по сравнению с другими исследованными озерами. Однако, сумма обеих форм элемента не превышает предельно допустимые концентрации свинца в питьевой воде.

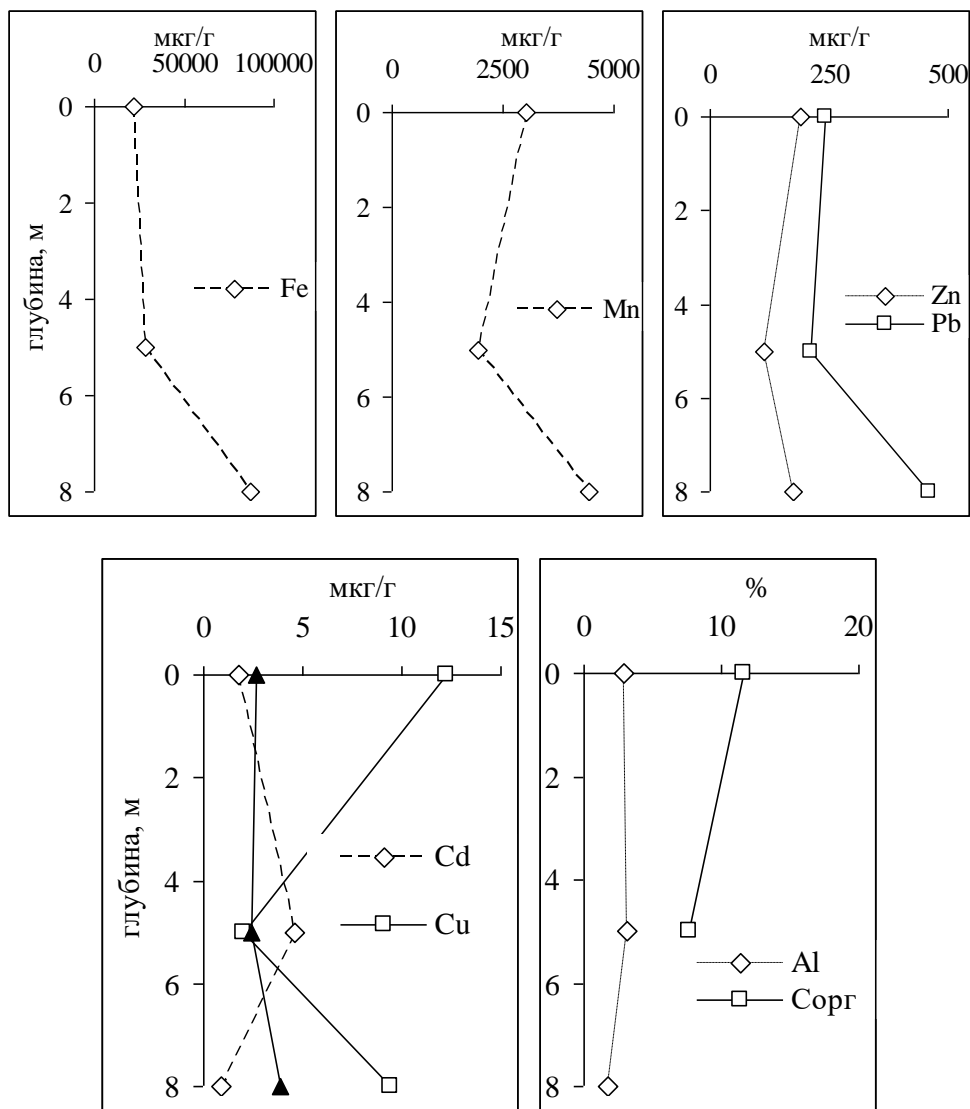


Рис. 3.10. Изменение содержания металлов (мкг/г, Al – %) и органического вещества (%) во взвеси оз. Васьковского с глубиной в июле 2012 г.

3.1.6. Влияние осеннего перемешивания на химический состав воды озер ВСА

Отбор воды для химического анализа воды озер нужно проводить в период осеннего охлаждения, когда вегетационные процессы незначительны, устанавливается гомотермия и отсутствует стратификация (Моисеенко и др.,

2006). Чтобы проанализировать химический состав вод малых озер ВСА в период осеннего охлаждения, в 2013 г. было сделано два отбора проб воды: в августе и в сентябре.

Проведенный нами осенью отбор показал, что химический состав воды малых озер ВСА в этот период от летнего отличается незначительно (табл. 6, табл. 7 – Приложение). Хотя именно в этот период оз. Круглое, благодаря перемешиванию придонного и поверхностного слоев стало солоноватоводным, что сходится с данными, указанными ранее (Разработка, 1990). Также выше, чем в другие годы, была соленость в оз. Духовском – 17,1 г/л, тогда как ранее она не превышала 5,9 г/л, возможно, это причина усиленного поступления морских вод на акваторию озера, что подтверждают повышенный до морского водородный показатель (табл. 3.2) и снизившиеся концентрации растворенных металлов (табл. 8 – Приложение).

Анализ содержания взвешенных металлов и удельной концентрации металлов во взвеси не выявил закономерности их изменения в период осеннего охлаждения (табл. 8 – Приложение). В озерах Васьковское, Голубичное и Духовское снизилось содержание Рb, в Японском и Круглом – выросло. В целом, изменчивость концентраций тяжелых металлов в период осеннего перемешивания сопоставима с межгодовой изменчивостью. Одна из причин – низкая трофность исследуемых озер (до 10 мкг/л $P_{\text{общ}}$ – олиготрофные озера (Hutchinson, 1967), табл. 3.3). Исключение составляют два озера в октябре: Японское (16,3 мкгР/л) и Благодати (32,6 мкгР/л), которые можно отнести к мезотрофным озерам. Повышение трофности оз. Благодати, вероятно, связано с длительным закрытием протоки и отсутствием поступления морских вод. Считается, что фосфор, неорганический азот и кремний становятся лимитирующими, когда их концентрации ниже 10, 300 и 500 мкг/л, соответственно (Hutchinson, 1967), таким образом все исследованные озера (кроме Благодати и Японского в октябре) лимитированы по фосфору и азоту (содержание аниона NO_3^- во всех пробах было ниже предела обнаружения).

Таблица 3.2

Водородный показатель, количество взвешенного вещества (ВВ), углерода растворенного ($C_{РОВ}$) и взвешенного ($C_{ВОВ}$) и соленость (Σ) поверхностных вод озер ВСА летом и в период осеннего перемешивания 2013 г.

Озеро	Дата	pH	ВВ, мг/л	$C_{РОВ}$, мг/л	$C_{ВОВ}$, мг/л	$C_{ВОВ}$, %	Σ , г/л
Васьковское	08.2013	6,13	2,25	4,0	0,43	19,1	0,02
	10.2013	6,30	2,67	4,0	0,50	18,8	0,03
Голубичное	08.2013	5,87	3,09	6,8	0,60	19,6	0,02
	10.2013	6,30	3,46	7,7	0,71	20,7	0,03
Японское	08.2013	6,00	3,57	8,6	0,61	17,1	0,02
	10.2013	6,20	2,45	5,8	0,56	23,0	0,03
Круглое	08.2013	6,42	2,17	3,4	0,26	11,9	0,13
	10.2013	7,30	3,48	2,3	0,39	11,3	6,24
Духовское	08.2013	6,44	7,29	4,3	0,49	6,71	0,25
	10.2013	8,05	4,00	3,8	0,25	6,18	17,1
Благодати	08.2013	6,62	4,10	7,7	0,92	22,5	1,00
	10.2013	7,23	4,82	8,4	3,18	66	2,16

Таблица 3.3

Количество азота аммонийного, общего и неорганического фосфора и кремния в озерах ВСА летом и в период осеннего перемешивания 2013 г.

Озеро	Дата	NH_4^+ , мг/л	$P_{общ}$, мкгР/л	PO_4^{3-} , мкгР/л	Si, мг/л
Васьковское	08.2013	0,089	5,19	1,90	4,51
	10.2013	0,015	8,52	1,11	4,74
Голубичное	08.2013	0,148	4,82	1,90	2,81
	10.2013	0,122	8,89	0,74	2,76
Японское	08.2013	0,154	4,82	1,10	4,55
	10.2013	0,090	16,3	3,33	4,60
Круглое	08.2013	0,121	3,33	0,70	3,86
	10.2013	н.о.	4,82	0,74	1,93
Духовское	08.2013	0,080	7,78	1,10	4,92
	10.2013	н.о.	5,19	0,74	1,61
Благодати	08.2013	0,165	8,15	2,22	4,83
	10.2013	н.о.	32,6	8,52	5,70

Примечание к табл.3.3: н.о. – не обнаружено.

Таким образом, отбор, проведенный в период осеннего перемешивания, показал, что химический состав воды исследованных озер в этот период от

летнего отличается незначительно. Одна из причин – низкая трофность озер ВСА. Исключение – оз. Круглое, которое благодаря перемешиванию придонного и поверхностного слоев из пресного стало солоноватоводным.

3.2. Микроэлементный состав биотических компонентов озерных экосистем

Для живых организмов наиболее легкой формой для усвоения считается растворенная форма микроэлементов (Reinfielder et al., 1998). Значительная часть металлов, мигрирующих во взвеси, в реках восточного Сихотэ-Алиня находится в подвижной форме, которая может извлекаться в раствор при изменении параметров среды (Чудаева, 2002), благодаря чему эта часть металлов может встраиваться в содержимое клеток фитопланктона и макрофитов, так как при фотосинтезе и дыхании на границе вода-растение, вода-жабры беспозвоночных изменяется рН среды, следовательно, формы существования элементов (Wang et al., 1995). Поэтому содержание взвешенных форм металлов, наряду с растворенными должно учитываться при изучении их вклада в аккумуляцию живыми организмами. Для животных вклад в общее содержание микроэлементов вносит пища (Wang et al., 1995; Wang, Fisher, 1996a, b, 1997).

Усваивая микроэлементы из воды организмы способствуют их переводу в менее доступные формы, которые на значительное время удаляются из толщи воды, очищая ее. Организмы накапливают металлы из водной среды в количествах, пропорционально обогащению среды этими микроэлементами, благодаря чему используются в геоэкологическом мониторинге (DeForest et al., 2007).

3.2.1. Планктон

Анализ видового состава фитопланктона, проведенный Л.А. Медведевой, показал, что фитопланктон озер восточного Сихотэ-Алиня представляет собой, в основном, комплекс диатомовых водорослей (Medvedeva, 2001). В период наших работ биомасса микрофитопланктона в верхнем метровом слое воды озер восточного Сихотэ-Алиня в основном преобладала над зоопланктоном (табл. 3.4). Только в июле 2012 г. проба планктона из озера Васьковского была представлена

белой массой ветвистоусых ракообразных. Другие данные о зоопланктоне этого озера в литературе отсутствуют. Про зоопланктон в Духовских озерах известно, что он беден в качественном отношении (коловратки, веслоногие), но биомасса его достигает 0,3-3,5 г/м³ (Разработка..., 1990). В зоопланктоне заповедных озер по численности доминируют науплии веслоногих ракообразных и циклопы (оз. Голубичное), науплии веслоногих ракообразных и коловратки (оз. Благодати) (Барабанщиков, Колпаков, 2005).

Поскольку в результате сбора планктона посредством планктонной сети в нее попадают не только сами планктонные организмы, но и детрит, которые невозможно разделить на фильтре, то эту смесь часто называют сестоном.

Исследование количественного распределения фито- и зоопланктона в 2014 г. показало, что биомасса мелкого фитопланктонного сестона (20-100 мкм) в озерах больше, чем крупного, преимущественно зоопланктонного (100 и > мкм). В солоноватоводном оз. Благодати масса мелкого сестона практически в 4 раза больше, крупного – в 9 и более раз больше, чем в пресных озерах (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Количество взвеси и сестона (мг/л) в воде озер ВСА в июле 2014 г.

Озера	Взвесь >0,45 мкм	Сестон 20-100 мкм	Сестон >100 мкм	n/n ¹
Благодати	10,07±3,83	0,193±0,025	0,091±0,014	2/6
Голубичное	3,22±0,46	0,058±0,045	0,001±0,002	1/3
Васьковское	2,20±0,06	0,054±0,046	0,011±0,011	1/3

Примечание к табл. 3.4: n - число проб взвеси, n₁ – число проб сестона.

Наиболее надежная информация по концентрированию металлов мелким и крупным сестоном получилась по оз. Благодати (число повторностей n=6). Уменьшение числа повторностей до 3-х в озерах Васьковское и Голубичное, при общем более низком содержании сестона, привело к выбраковке anomalно высоких результатов, полученных при его содержании на фильтре менее 0,0008 г. Оставшиеся данные позволили отметить, что наименьшие концентрации ТМ как в

мелком, так и в крупном сестоне наблюдались в оз. Благодати, (табл. 9 – Приложение).

В течение четырех лет исследований содержание металлов (мкг/г сухой массы) в сестоне озер восточного Сихотэ-Алиня достаточно сильно варьировало (табл. 10 – Приложение). Различия в содержании микроэлементов возможны как из-за преобладания тех или иных элементов в фито- или зоопланктоне в целом (табл. 9 – Приложение), но также из-за межгодовых изменений видового состава, плотности и соотношения организмов планктона и детрита, существенно зависящих от погодных условий (Леонова, Бобров, 2010), из-за кратковременных изменений водной среды, которые отразились на химическом составе планктонных организмов, но не были захвачены при отборе проб воды. Также значение имеет масса сестона на фильтре, так как слишком низкие значения массы повышают вероятность ошибки определения.

В целом можно отметить, что содержание металлов в сестоне озер ВСА изменялось достаточно сильно – до 2 порядков величин (в мкг/г): Cu – 1,53-159, Ni – 0,87-325, Zn – 35,6-1233, Cd – 0,03-33,5, Pb – 11,2-333, Fe и Mn (%) – 0,42-5,41 и 0,030-0,403, соответственно (табл. 10 – Приложение). Из-за высокой межгодовой изменчивости сложно делать выводы о содержании металлов в сестоне разных озер, но некоторые закономерности достаточно однозначны. Так, содержание Pb и Zn в сестоне из оз. Васьковского, как и во взвеси, превышает таковое в остальных озерах в 2-9 и 2-5 раз, соответственно. Не ясна причина высоких концентраций Cd в крупном сестоне из оз. Круглого (20,5 мкг/г), возможно, такое содержание металла – последствия рекреационной антропогенной нагрузки, однако это требует дальнейших исследований.

Концентрации металлов в сестоне для всех исследованных озер восточного Сихотэ-Алиня в целом выше (Fe, Ni, Pb, Cd) либо находятся в пределах концентраций (Fe, Mn, Cu) для планктона озер, приводимых другими исследователями (Radwan et al., 1990; Леонова, 2005). Исключение составляют содержание Zn в планктоне оз. Пяечно – в 3 раза больше, и содержание Cu в планктоне оз. Колыванского – в 3,5 раз больше, чем в сестоне озер восточного

Сихотэ-Алиня (табл. 10 – Приложение). Очевидно, повышенные концентрации микроэлементов в этих озерах, так же, как и Pb и Zn в сестоне из оз. Васьковского, отражают региональные особенности геохимии водных объектов.

Сравнение содержания металлов в сестоне озер восточного Сихотэ-Алиня и среде их обитания за 2011-2014 гг. показало, что достоверная линейная корреляционная связь наблюдается в отдельных случаях и в большинстве из них появляется при наличии аномально высоких значений концентрации металлов (при $n=27$ критическое значение коэффициента корреляции при 5 % уровне значимости $r=0,38$ – (Лакин, 1990)) (рис. 3.11). Ряд исследований показал, что при фоновых концентрациях металлов в среде отсутствует связь между содержанием микроэлементов в среде и организмах. Зависимости между содержанием металлов в живом объекте и в его среде начинают появляться при превышении уровня фоновых значений (DeForest et al., 2007; Чернова, Шулькин, 2018).

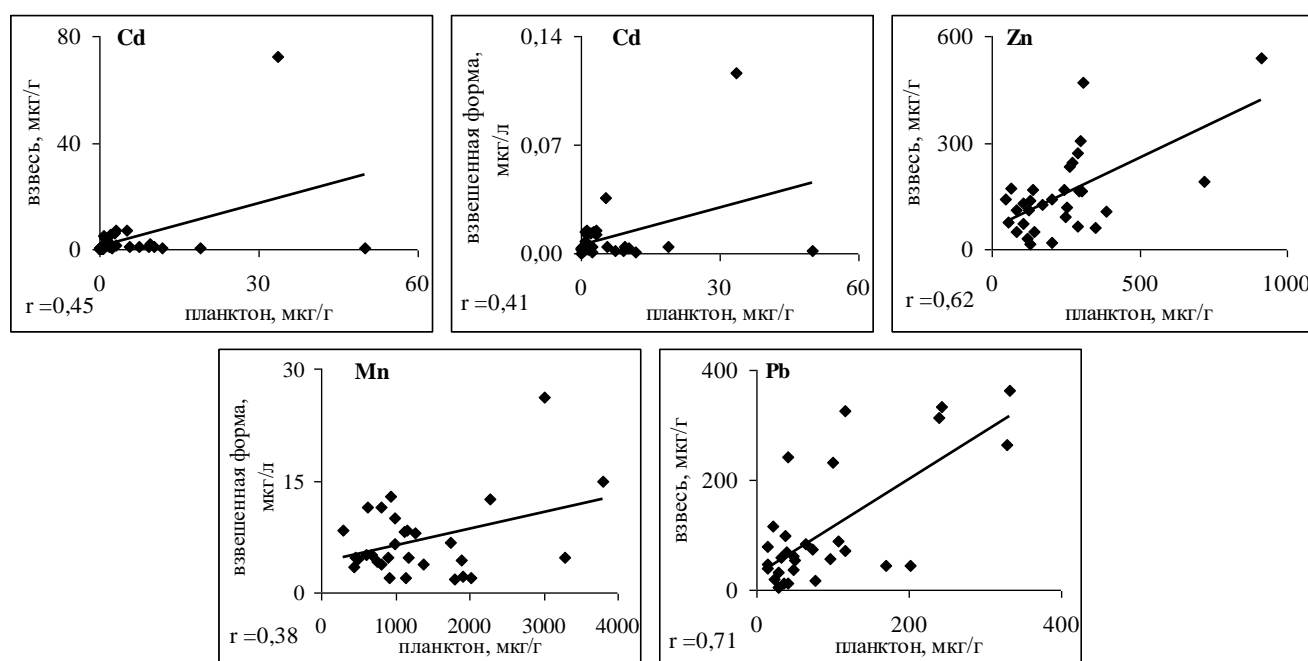


Рис 3.11. Зависимости между содержанием металлов в планктоне и компонентах среды озер ВСА

Примечание к рис. 3.11: r – коэффициент линейной корреляции; $n=27$, $r_{\text{крит}} = 0,38$, $p=0,05$.

В исследованных нами озерах достоверная связь на 99 % уровне значимости наблюдалась для Zn и Pb между их содержанием во взвеси и в планктоне ($r=0,62$ и $r=0,71$, соответственно – рис. 3.11). Возникновение корреляции связано с повышенным содержанием этих металлов в компонентах оз. Васьковского, выходящими за пределы фоновых уровней концентраций для этого района. Связь содержания Cd в планктоне и взвеси, в планктоне и во взвешенной форме ($r=0,45$ и $r=0,41$, соответственно) достоверна на 95 % уровне значимости за счет наличия аномально высокого содержания металла в оз. Круглом. Связь содержания Mn в планктоне и Mn во взвешенной форме ($r=0,38$) находится на границе 95 % уровня значимости, возможно, проявляется потому, что во взвеси некоторых озер повышено содержание марганца, относительно кларка содержания элемента в осадочных породах (рис. 3.7).

Таким образом, отсутствие связи между накоплением металлов сестомом и их содержанием в растворенной форме, свидетельствует о том, что наблюдаемые концентрации элементов в озерах восточного Сихотэ-Алиня, кроме оз. Васьковского, не ведут к их аккумуляции в живом веществе, так как находятся в зоне фоновых значений для региона. Отдельные зависимости между содержанием металлов во взвеси, либо взвешенной форме и планктоне возникли в связи с наличием в выборках, кроме фоновых значений, повышенных концентраций элементов (Pb, Zn, Cd, Mn).

3.2.2. Высшие водные растения

Химический состав высших водных растений формируется за счет нескольких источников: растворенной и взвешенной форм металлов (погруженные растения, фотосинтезирующая часть), посредством адсорбции из атмосферы (полупогруженные растения, фотосинтезирующая часть), за счет поглощения поровых вод грунтов – корневая часть (Fritioff, Greger, 2006). Кроме того, транслокация металлов из корней в листья и обратно у утративших проводящие ткани погруженных водных растений затруднена (Fritioff, Greger, 2006). В результате химический состав рдестов (*Potamogeton spp.* - погруженные, гидрофиты) в среднем отличался от такового камыша (*S. tabernaemontani* -

полупогруженные, гелофиты) повышенными концентрациями всех металлов как в корнях, так и в фотосинтезирующей части (табл. 11 – Приложение). Корневища камыша и рдестов, в свою очередь, были обогащены относительно их фотосинтезирующей части практически всеми металлами, кроме Cu и Mn, что связано с контактом этой части растений с поровыми водами и грунтом, конечным звеном в цепи захоронения микроэлементов.

По содержанию ТМ в среде и растениях изученные озера можно разделить на 2 группы – фон и антропогенную (Лысенко, Чернова, 2013). В первую входят озера САБЗ – Японское, Благодати и Голубичное, во вторую – Духовские озера и оз. Васьковское. При сравнении концентраций ТМ в рдестах из разных озер видно, что концентрации Ni, Cd, Pb повышены в самом маленьком (площадь зеркала 0,27 км²), но активно используемом для «дикого» туризма оз. Круглом. Рдесты из оз. Васьковского отличаются повышенным, относительно остальных озер, содержанием меди (и повышенным относительно фоновых озер содержанием свинца), а рдесты из группы антропогенно-измененных озер содержат повышенные, относительно фоновых, концентрации Pb, Cd, Zn.

Таким образом, в макрофитах озер, подверженных антропогенному влиянию (рдесты и корневища камыша) повышено содержание Pb (в 1,7-16 раз – рис. 3.12). В оз. Васьковском это связано с добычей и переработкой в Дальнегорском районе свинцово-цинковых руд, и захоронением Pb в донных отложениях (алевропелит – 155±11,1, песок – 38,0±12,2 мкг/г – табл. 6 – Приложение). Повышенные концентрации остальных ТМ в растениях антропогенно-измененных озер не более чем в 2 раза отличаются от таковых, приведенных для озер заповедника, что говорит в целом о невысокой антропогенной нагрузке на озерные геосистемы.

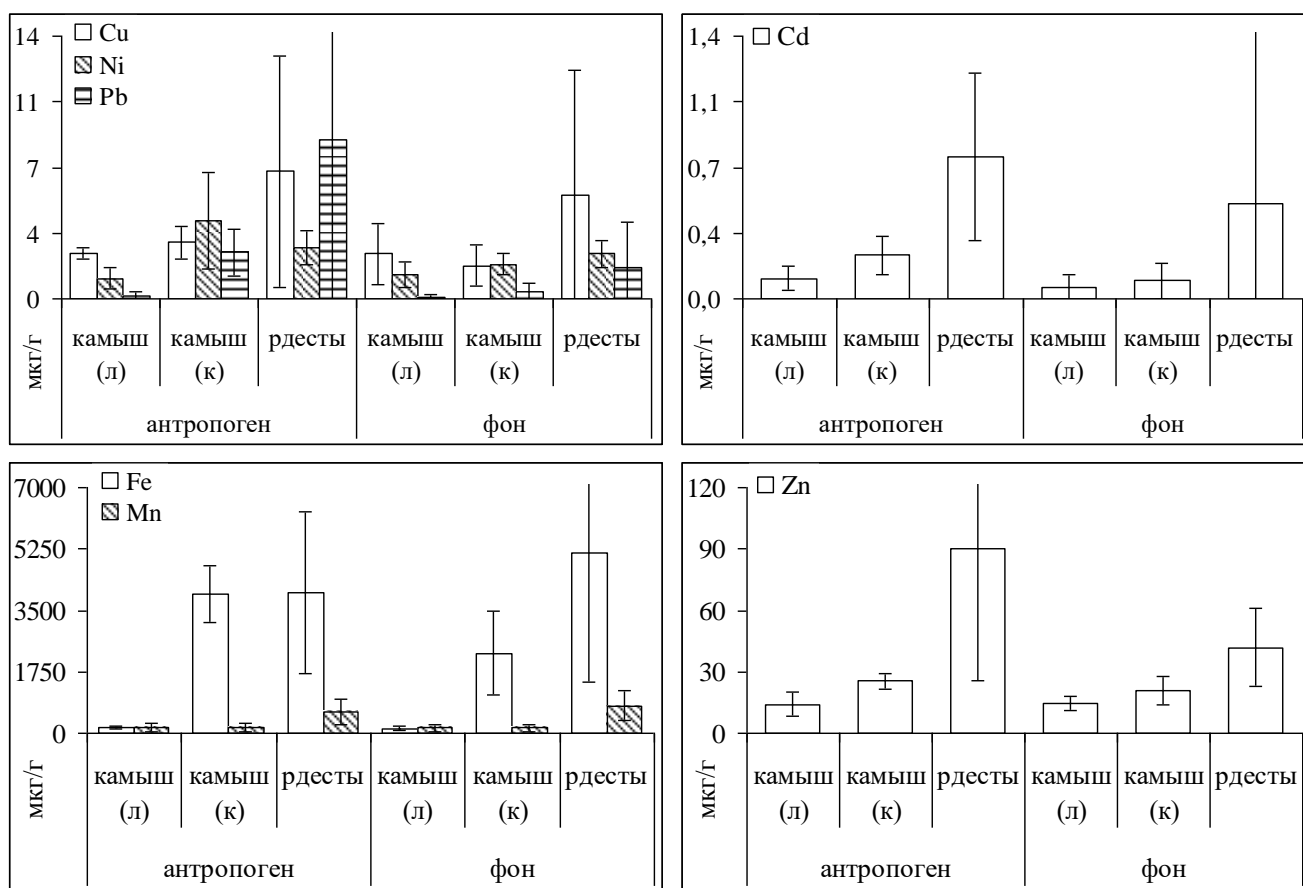


Рис. 3.12. Содержание ТМ в высших водных растениях из антропогенно-измененных (антропоген) и фоновых (фон) озер ВСА.

Примечание к рис. 3.12: л – листья, к – корневища.

Сравнение с рдестами из двух фоновых пресных озер для лесостепной зоны Алтайского края – Чаячьего и Ракиты (Леонова, 2005) показало, что в фоновых озерах восточного Сихотэ-Алиня в целом содержание металлов в рдестах сопоставимо, за исключением Fe, Zn и Cd, средние концентрации которых в озерах ВСА выше в 1,8-18, 2,1-8,8 и 5,7-8,5 раз, соответственно. Также в рдестах из озер ВСА несколько выше содержание Fe и Zn, ниже – Ni и Pb, но в целом концентрации металлов подтверждают сходство микроэлементного состава близкородственных растений из разных ландшафтно-геохимических условий.

Озера, исследуемые нами, имеют разный уровень минерализации, от 0,01-0,13 (оз. Голубичное, Японское, Васьковское, Круглое) до 0,25-18 г/л (оз. Мраморное, Благодати, Духовское – табл. 3.1), за счет взаимодействия с морскими водами. Известно, что при увеличении концентрации солей, в

частности кальция и магния, наблюдаются более низкие общие концентрации некоторых металлов в биоте (Kinkade, Erdman, 1975). Значимых отличий в содержании ТМ в водных растениях пресных и солоноватоводных озер восточного Сихотэ-Алиня, не обнаружено. Очевидно, в условиях нейтральной (озера пресные маломинерализованные) и щелочной (озера солоноватоводные) реакции среды, низких концентраций металлов в воде, минерализация в пределах до 20 г/л не оказывает значительного влияния на аккумуляцию ТМ высшими водными растениями.

3.2.3. Моллюски

Исследованные два вида двустворчатых моллюсков относятся к семействам Unionidae (*Kunashiria coptzevi*) и Cyrenidae (*Corbicula japonica*), наиболее часто используемые для биомониторинга металлов в водной среде (Соловых и др., 2009; Cassini et al., 1986; Ciparis et al., 2012; Graney et al., 1983; Patrick et al., 2017; Rzymiski et al., 2014; V.-Balogh., 1985, 1988).

Кунаширии обитают в пресноводных озерах Японское Голубичное, Васьковское. Корбикулы обитают в солоноватоводных озерах Духовское, Круглое. Межвидовое сравнение накопления металлов корбикулами и кунашириями показал, что корбикулы содержат больше Cu, чем кунаширии. Наибольшая разница в концентрациях обнаружена для Mn – его концентрации в кунашириях примерно в 300 раз выше, чем в корбикулах, для остальных металлов же видовые отличия концентраций составляют 2-12 раз (рис. 3.13, табл. 12 – Приложение). Аналогичные результаты получены нами на моллюсках этих же семейств, обитающих совместно в пресных озерах и реках дельты Меконга: моллюски семейства *Unionidae* (родов *Scabies*, *Ensidens*, *Hyriopsis*) накапливают более высокие концентрации марганца, корбикулы *Corbicula sp.* – меди (Богатов и др., 2018).

В кунашириях из заповедных озер концентрации Pb, Cd и Zn в 2-5 раза ниже, чем в моллюсках из оз. Васьковского, что отражает продолжающееся влияние многолетнего загрязнения на это озеро и его обитателей.

Озеро Круглое отличается повышенными концентрациями Cd в корбикулах – в 8 раз выше, чем в остальных озерах (13,3 и 0,88-3,51 мкг/г, соответственно), что соответствует повышенному содержанию этого элемента в сестоне этого озера и, вероятно, является свидетельством локального загрязнения, либо локальных особенностей горных пород водосбора. Озеро используется только для рекреационных целей короткий период летом – июль и август.

Сравнение концентраций металлов в моллюсках из озер ВСА с близкородственными видами из озер других регионов показало, что содержание металлов (Ni, Zn, Cd, Pb) в корбикулах озер ВСА выше, чем в корбикулах из китайского оз. Тайху (Тао et al., 2012a), только содержание Cu сопоставимо.

Сравнение с более ранними исследованиями микроэлементного состава кунаширий (Богатов, Богатова, 2009) из озер Васьковское и Японское, проведенных в 1985-1986, 1999 и 2003 гг., показало, что в целом содержание металлов в моллюсках оз. Васьковского не изменилось (табл. 12 – Приложения). Незначительно снизилось содержание меди и кадмия (в 1,4 раза), свинца – в 2,3 раза, остальные металлы в годы проведенных нами исследований находятся в диапазонах концентраций, приведенных В.В. Богатовым и Л.В. Богатовой (2009). Моллюски из оз. Японского также в целом содержат сопоставимые концентрации металлов, по сравнению с данными более ранних исследований (Mn, Ni, Cd, Pb) (Богатов, Богатова, 2009). Это указывает на стабильную экологическую обстановку в водосборном бассейне озера.

Большая часть моллюсков семейства Unionidae - крупные речные и озерные виды, которые целиком использовать для биомониторинга не совсем удобно. Поэтому первые исследователи микроэлементного состава этого семейства использовали отдельные органы моллюсков (Pynnöen, Holwerda, Zandee, 1987; Salánki, V.-Balogh, 1989; V.-Balogh, 1988). Показано, что, как и у всех других двустворчатых моллюсков наиболее высокие концентрации металлов обнаруживаются в гепатопанкреасе и жабрах, как органах усвоения из пищи и непосредственного контакта со средой, соответственно. Наиболее низкие

концентрации металлов наблюдались в мышечной ткани моллюсков (Gundacker, 2000).

Приоритетность источника поступления элемента для моллюсков можно изучить, рассматривая его накопление пищеварительной железой и жабрами. Для этого в 2011 г. были исследованы органы кунаширии из озер Голубичное и Васьковское – чистого фонового и испытывающего антропогенное загрязнение.

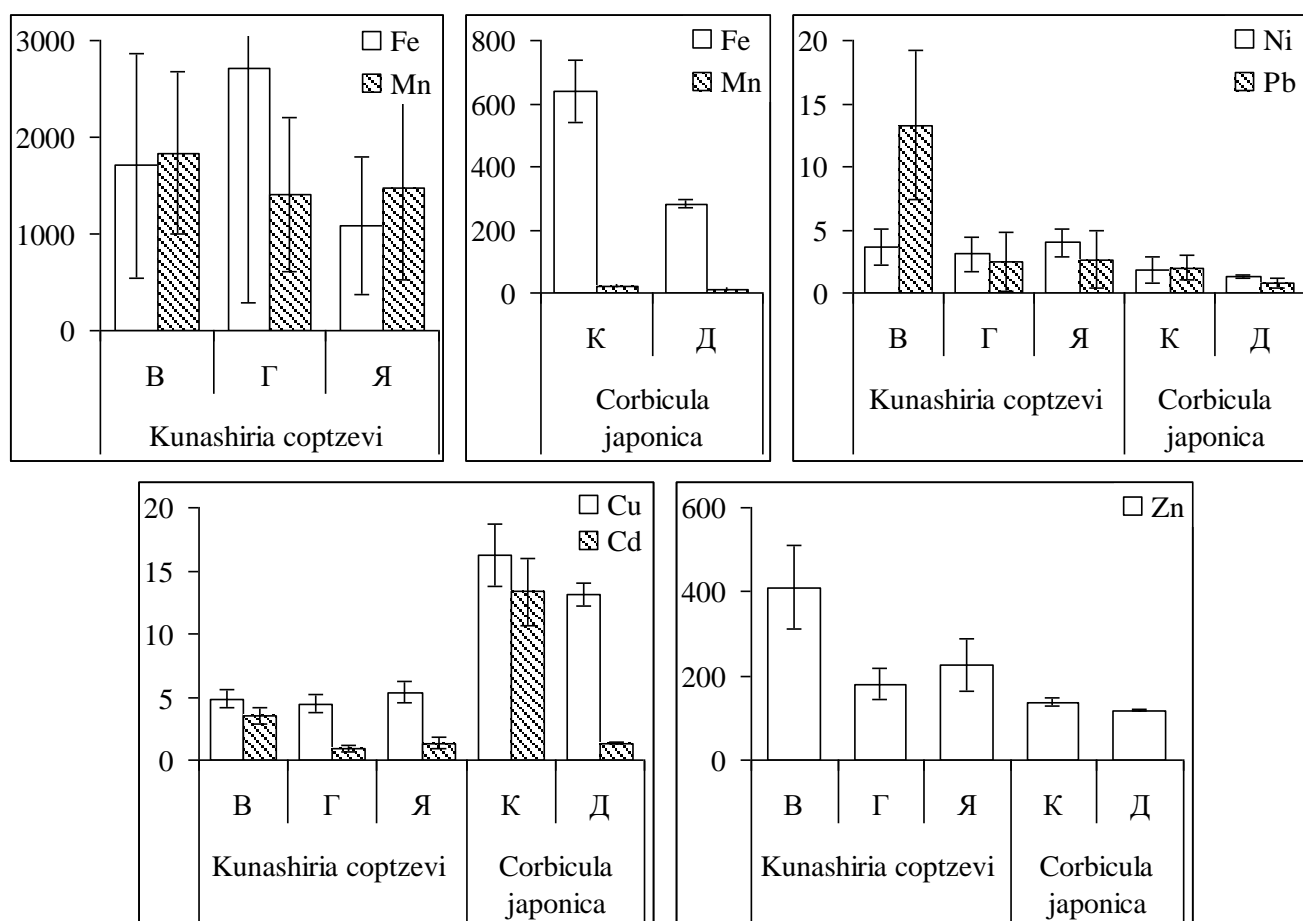


Рис. 3.13. Микроэлементный состав моллюсков *Kunashiria coptzevi* и *Corbicula japonica* из озер ВСА в 2011-2013 г.

Примечание к рис. 3.13: Д – Духовское, К – Круглое, В – Васьковское, Г – Голубичное, Я – Японское.

Преобладание концентрации Рb в жабрах, по сравнению с гепатопанкреасом, в кунашириях из обоих озер свидетельствует о том, что основной источник Рb для кунаширий – растворенные и взвешенные формы элемента, контактирующие с поверхностью жабр (рис. 3.14). В беззубках

(Anodonta) из р. Дунай (промышленный район Вены, Австрия) с более низким уровнем свинца во взвеси (29 ± 19 мкг/г, соответственно), наблюдается аналогичная тенденция распределения элемента в жабрах и гепатопанкреасе (Gundacker, 2000) как при более низких (1,1 и 0,1 мкг/г, соответственно), так и при сопоставимых (21,3 и 1,1 мкг/г, соответственно) с исследованными нами концентрациях Pb в соответствующих органах кунаширий (22 и 17 мкг/г – рис. 3.14).

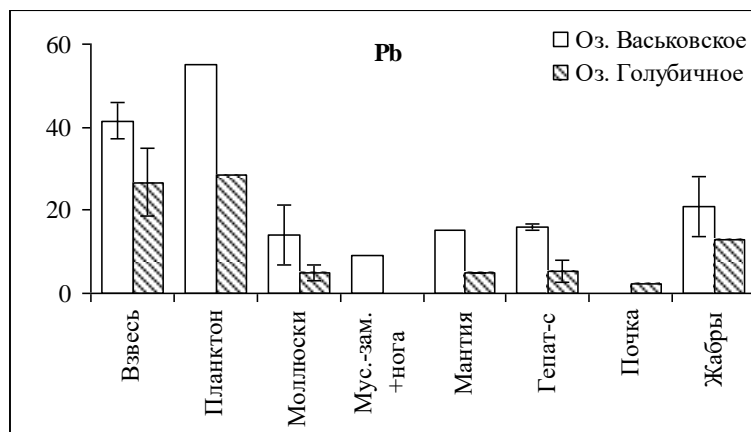


Рис. 3.14. Содержание Pb (мкг/г) во взвеси, планктоне, мягких тканях целых кунаширий и отдельных органах в исследованных озерах в 2011 г.

Наибольшие концентрации Zn также содержатся в жабрах кунаширий – в 1,5-3 раза выше, чем в гепатопанкреасе (в озерах Голубичное и Васьковское, соответственно) (рис. 3.15). Аналогичное распределение металла по органам наблюдается у дунайских беззубок (Gundacker, 2000), уровень содержания металла в воде и взвеси которых выше (в ≈ 3 раза) и сопоставимы, соответственно, по сравнению с таковыми из оз. Васьковского. Очевидно, как и свинец, цинк поступает в организм моллюсков преимущественно через жабры, поскольку практически нет разницы между содержанием металла в гепатопанкреасе моллюсков из загрязненного и фонового озер. Однако, есть сведения о поступлении с пищей от 20 до 60 % цинка в организм морских двустворчатых моллюсков. Авторы отмечают, что существуют гигантские различия в степени биомагнификации Zn и Cd из пищи двустворчатых моллюсков, определенные в лабораторных опытах (Wang, Rainbow, 2008). В то же время, в жабрах кунаширий

из оз. Васьковского содержится существенно больше цинка, по сравнению с таковыми из оз. Голубичного, что соответствует повышенному уровню растворенного элемента в воде этого озера в год исследования (2011 г) – 1,10 и 0,55 мкг/л, соответственно (рис. 3.15).

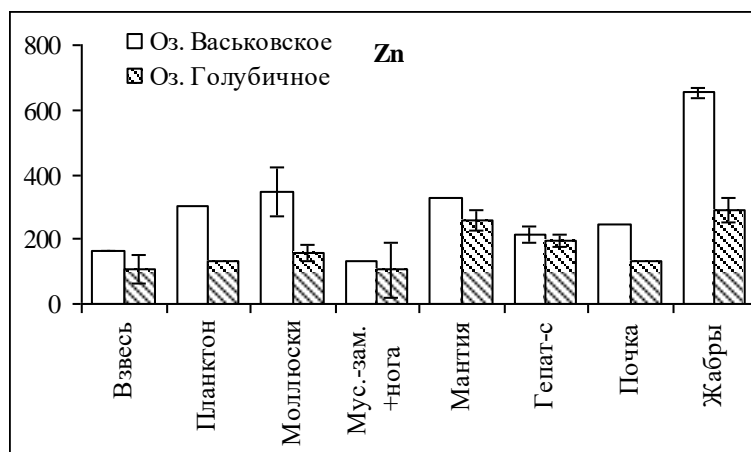


Рис. 3.15. Содержание Zn (мкг/г) во взвеси, планктоне, мягких тканях целых кунаширий и отдельных органах в исследованных озерах в 2011 г.

В органах кунаширий из оз. Васьковского Cd в несколько большем количестве находится в гепатопанкреасе, чем в жабрах. В органах моллюсков из оз. Голубичного содержание Cd в жабрах и гепатопанкреасе сопоставимо (рис. 3.16). Таким образом, поглощение кадмия моллюсками происходит как из воды, непосредственно жабрами, так и из пищи, о чем свидетельствуют сопоставимые концентрации элемента в гепатопанкреасе и жабрах беззубок из озер ВСА и из Дуная, в органах и среде которых данного элемента существенно меньше (Gundacker, 2000). Более значительное накопление Cd в мягких тканях целиком и отдельных органах наблюдается в моллюсках из оз. Васьковского, по сравнению с таковыми из оз. Голубичного. По данным (Wang, Rainbow, 2008) с пищей в организм морских двустворчатых моллюсков поступает от 10 до 50 % кадмия.

Содержание Cu по органам кунаширий показало, что в гепатопанкреасе моллюсков из оз. Васьковского его в 1,6 раз больше, чем в таковых из оз. Голубичного; в жабрах и мышцах моллюсков из озер Васьковское и Голубичное концентрации этого элемента сопоставимы и в 2-3 раза ниже, чем в гепатопанкреасе (рис. 3.17). Очевидно, основным источником поступления меди

для моллюсков является пища. Повышенные содержания меди во взвеси оз. Васьковского, относительно Голубичного, приводят к соответствующему увеличению содержания данного элемента в планктоне. Однако, избыточная часть элемента, накопленная в планктоне и во взвеси, и попавшая в гепатопанкреас моллюсков с пищей практически не приводит к пропорциональному росту элемента в их целых мягких тканях, хотя тенденция увеличения содержания элемента в кунашириях из оз. Васьковского, по сравнению с таковыми из оз. Голубичного, сохраняется. В дунайских беззубках при более высоких содержаниях меди в воде ($2,5 \pm 2,6$ мкг/л) и взвеси (62 ± 63 мкг/г) также сохраняется тенденция накопления более высоких концентраций элемента в гепатопанкреасе (в среднем 7,7 мкг/г), чем в жабрах (5,5 мкг/г) в 1,5-2 раза (Gundacker, 2000).

Таким образом, удалось прояснить видовые отличия накопления металлов (корбикулы содержат больше Си, чем кунаширии). Показано, что многолетнее загрязнение оз. Васьковского продолжает влиять на биоту этого озера, что проявляется в содержаниях в моллюсках Pb, Cd и Zn – в 2-5 раз выше, чем в моллюсках из заповедных озер. Преобладание концентрации Pb и Zn в жабрах, по сравнению с гепатопанкреасом, в кунашириях из озер Васьковское и Голубичное свидетельствует о том, что основной источник этих металлов для кунаширий – растворенные и взвешенные формы элемента, контактирующие с поверхностью жабр.

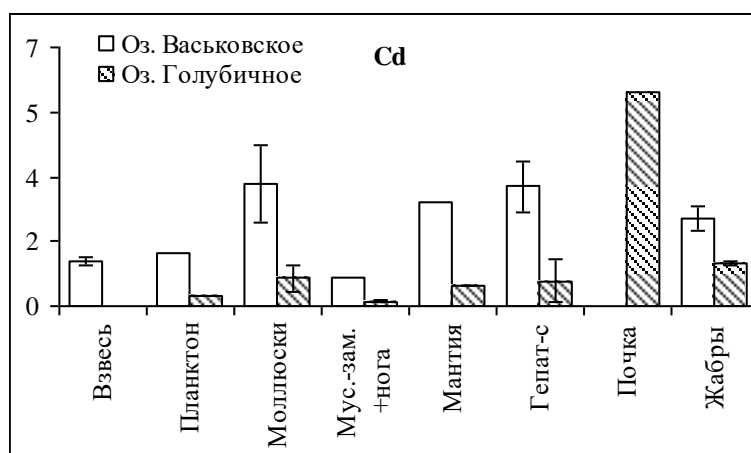


Рис. 3.16. Содержание Cd (мкг/г) во взвеси, планктоне, мягких тканях целых кунаширий и отдельных органах в исследованных озерах в 2011 г.

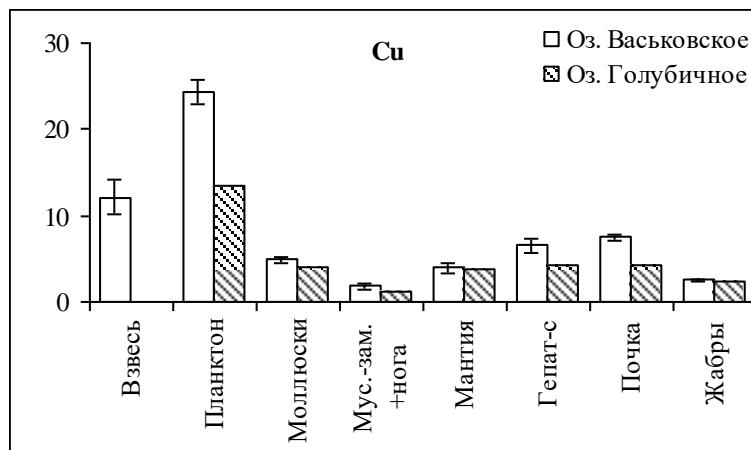


Рис. 3.17. Содержание Cu (мкг/г) во взвеси, планктоне, мягких тканях целых моллюсков и отдельных органах в исследованных озерах в 2011 г.

3.3. Закономерности переноса микроэлементов по трофической цепи «взвесь – планктон – моллюски»

Как уже было отмечено в литературном обзоре, изучение накопления ТМ по трофической цепи представляет особую важность в связи с отсутствием однозначно установленных тенденций: известно, что ртуть накапливается по трофической цепи, а другие ТМ чаще всего нет (Моисеенко, Гашкина, 2016; Campbell et al., 2005; Cui et al., 2011; Dehn et al., 2006; Dietz et al., 2000). Но иногда эта тенденция нарушается (Altındağ, Yiğit, 2005; Monferrán et al., 2012). Единственной причиной отсутствия тенденции накопления ТМ по трофической цепи авторы называют уменьшение удельной площади поверхности (Бурдин, Золотухина, 1998; Шулькин, 2004; Joiris, Azokwu, 1999): чем она ниже, тем меньше площадь контакта организма со средой. В случае накопления элементов авторы это просто отмечают, как факт (Gundacker, 2000; Monferrán et al., 2012; Rubio-Franchini, Rico-Martínez, 2011).

Анализ закономерностей переноса микроэлементов по трофической цепи планктон – моллюски-фильтраторы исследованных озер ВСА позволил разделить тяжелые металлы на три группы, в зависимости от их поведения с увеличением трофического уровня: Pb, Fe и Ni достоверно снижаются по пищевой цепи (табл. 3.5 – различия достоверны при $p < 0,05$), содержание Cd и Zn не изменяется с

увеличением трофического уровня, а характер изменения концентраций Mn и Cu зависит от биологического вида моллюсков (Лысенко, 2016; Лысенко, Чернова, 2014, 2016; Чернова, Лысенко, 2016, 2018). Рассмотрим эти три группы подробнее, сравнив данные по содержанию элементов в сопоставимых по размеру, но разных по вкладу органического материала, компонентах среды озер ВСА – взвешенном веществе и планктоне, а также трофической цепи фитопланктон – моллюски. Компоненты среды озер обмениваются друг с другом растворенными и легкоподвижными формами элементов взвеси при изменении динамического равновесия в среде.

Таблица 3.5

Уровень значимости (p) различий согласно непараметрическому критерию Вилкоксона при сравнении концентраций металлов в двух выборках (взвесь – планктон и планктон – моллюски) из озер ВСА

Выборка	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Cd	Pb
Взв-Пл	0,58 (10)	0,017* (17)	0,027* (17)	0,69 (15)	0,07 (16)	0,03* (14)	0,21 (16)
Пл-Мол	0,02* (9)	0,003* (11)	0,33 (11)	0,001* (10)	0,196 (13)	0,046* (13)	0,001* (13)

Примечание к таблице 3.5: Взв-Пл – взвесь – планктон; Взв-Мол – взвесь – моллюски; в скобках – количество пар значений, * – различия достоверны.

3.3.1. Свинец, железо, никель

В трофической цепи фитопланктон – моллюски из озер ВСА для Pb, Fe и Ni наблюдается достоверное (табл. 3.5) снижение содержания концентраций (в 7-24, 4-5,4 и 2-31 раз, соответственно, для пресных озер, и в 23-66, 3-10, 12-70 раз – для солоноватоводных). Поглощение элементов поверхностью жабр за счет фильтрационной активности дополняется для моллюсков новым источником металлов – из пищи. Как было показано в обзоре литературы, моллюски – неизбирательные фильтраторы, питающиеся взвешенным органическим

веществом разного размера и происхождения (бактерии, детрит, микроводоросли), в то время как неорганическую часть взвеси они сортируют и в виде пеллет-псевдофекалий удаляют из организма (Алимов, 1981; Wang, 1995). В пищеварительную систему попадает не более 40 % минеральной взвеси (Wang, 1995).

Металлы, концентрации которых снижаются по трофической цепи в приморских озерах, содержатся в воде преимущественно во взвешенной форме (Fe, Pb), либо их количество сопоставимо с количеством растворенных элементов (Ni). Вероятно, в связи с удалением большей части взвешенных металлов с псевдофекалиями, отмечается снижение их концентраций по трофической цепи. Что не противоречит гипотезе о влиянии размера на накопление металлов по трофической цепи.

Тенденция снижения концентраций металлов по трофической цепи сохраняется в оз. Васьковском, которое значительно больше других озер загрязнено свинцом (рис. 3.18).

Уменьшение концентрации свинца по трофической цепи фитопланктон – зоопланктон – зообентос (брюхоногие и двустворчатые моллюски – соскабливатели перифитона и фильтраторы) наблюдается и в оз. Тайху, Китай (Tao et al., 2012a), при сопоставимых уровнях свинца в воде (0,05-0,11 мкг/л) и донных отложениях (22,4-37,6 мкг/г). В р. Амур содержание свинца в ихтиофауне (частиковые рыбы) также существенно снижалось по сравнению с перифитоном (водоросли обрастания гравийно-галечного субстрата – донный аналог фитопланктона) и сестоном (планктонные диатомовые водоросли *Melosira islandica*) (Сиротский и др., 2011).

Сопоставимые по размерам компоненты геосистемы озер ВСА – планктон и ВВ, но разные по происхождению и содержанию органического вещества, имеют в целом сопоставимые концентрации металлов (рис. 3.18). Однако, это не всегда так: в зал. Гуанабара, загрязненного металлами и органическим веществом (Kehrig et al., 2009), концентрации Pb (а также Cd и Cu) в сестоне – материале с фильтра с диаметром пор 1,2 мкм, – в 8-200, 1,6-56 и 4,5-12 раз выше,

соответственно, чем в фитопланктоне (1,2-70 мкм). В зоопланктоне концентрация свинца увеличивается или сопоставима с таковой в фитопланктоне, что не согласуется с нашими данными по переносу по трофической цепи планктон – моллюски. Вероятно, кроме размера на интенсивность накопления металлов организмом оказывает влияние происхождение пищевых частиц – живые клетки фитопланктона в среде с избытком тяжелых металлов способны к регуляции их поступления через клеточную мембрану. Данное свойство водорослей было отмечено в экспериментах на водорослях (Айздайчер, Гостюхина, 2015; Бурдин и др., 1990). Возможно, причиной накопления повышенных концентраций свинца в зал. Гуанабарра зоопланктоном является питание как менее загрязненным фитопланктоном, так и детритом и микроорганизмами из более загрязненной взвеси (сестона).

Таким образом, уменьшение содержания Pb, Ni, Fe по трофической цепи планктон – моллюски как в чистой (озера побережья Японского моря), так и загрязненной среде (озера Васьковское, Тайху), связано с уменьшением удельной площади поверхности моллюсков и свойствами металлов: они находятся в воде преимущественно во взвешенной форме, и, оказавшись в фильтрационном аппарате в составе взвеси, на 60 % агрегируются в пеллеты-псевдофекалии, которые удаляются из организма, минуя пищеварительный тракт.

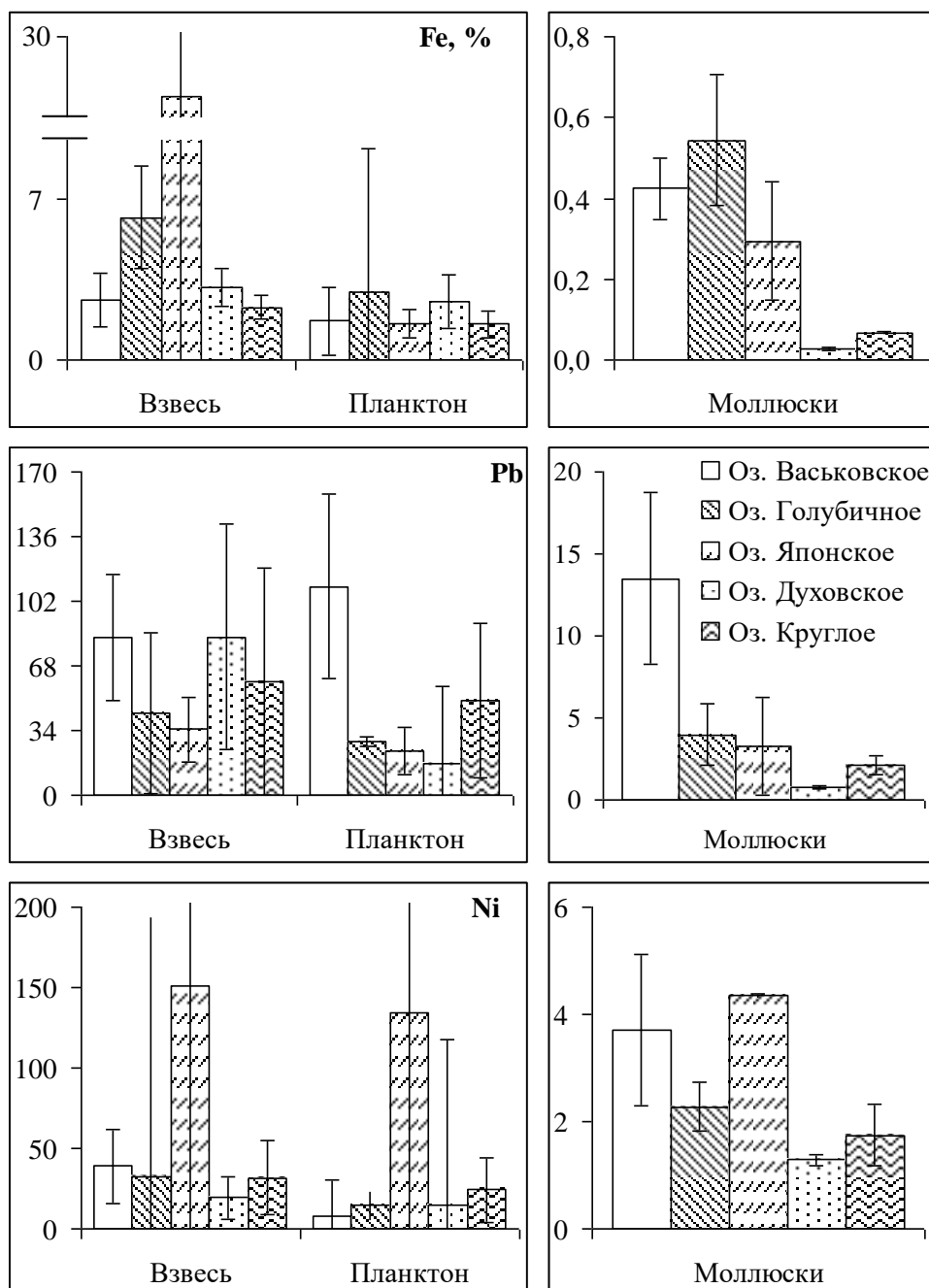


Рис. 3.18. Содержание Fe, Pb, Ni ($\mu\text{г/г}$) в трофической цепи озер ВСА

3.2.2. Кадмий, цинк

Концентрация Zn и Cd по трофической цепи планктон – моллюски не увеличивается, хотя и не уменьшается. Zn находится в воде преимущественно в растворенной форме, распределение Cd между растворенной и взвешенной формой сильно варьирует в разные годы исследований, но в целом концентрации металла распределены равномерно между двумя формами нахождения, что снижает выведение металлов с неорганической частью взвеси в пеллетах-

псевдофекалиях. Цинк и его химический аналог кадмий имеют высокое сродство к органическому веществу (Христофорова, 1989). Тенденция накопления этих элементов планктоном и взвесью подтверждает это (рис. 3.19): в планктоне средние концентрации Zn и Cd несколько выше, чем во взвеси, хотя различия недостоверны из-за высокой межгодовой изменчивости параметров.

Одна из причин сохранения концентраций этих металлов в трофической цепи планктон – моллюски на фоне уменьшения удельной площади поверхности: усваивание растворенных форм элементов наряду с использованием моллюсками в качестве пищи планктона и органической части взвеси, которая на 6,5-38 % состоит из органического углерода ($C_{\text{орг}}$), вместе с заключенными в них металлами. Также это может быть связано с экологическими особенностями корбикул и кунаширий – обитанием в мягких грунтах: содержание металлов в поровых водах мягких грунтов и в придонном слое воды существенно выше, чем в толще водной среды (Хажеева и др., 2004; Урбазаева и др., 2014), и при взмучивании частицы грунта и детрита могут попадать в пищеварительную систему, что служит дополнительным источником металлов и служит сохранению их концентраций по пищевой цепи.

Концентрации Zn в планктоне и моллюсках-фильтраторах из оз. Васьковского самые высокие (391-762 мкг/г – рис. 3.19). Среднее содержание Zn во взвеси этого озера превышает среднее содержание в осадочных горных породах в 3 раза, а в планктоне наблюдаются более высокие концентрации Zn, чем во взвеси, однако тенденция сохранения концентраций в трофической цепи этого озера не меняется.

Сравнение распределения Zn по трофической цепи озер ВСА с литературными данными (Сиротский и др., 2011; Тао et al., 2012b) дает сходную картину. Так, при более высокой концентрации металла в воде р. Амур, чем в озерах ВСА, концентрации Zn в ихтиофауне (частиковые рыбы) всего в 1,5 раза ниже, чем в сестоне и перифитоне (Сиротский и др., 2011). Тенденция изменения концентраций Zn и Cd в организмах трофической цепи фитопланктон – зоопланктон – зообентос из чистых станций оз. Тайху, Китай (Тао et al., 2012b)

(уровень загрязнения Zn воды и ДО сопоставим с таковым из оз. Васьковского) была сходной с таковой в приморских озерах. В загрязненных металлами станциях этого озера (уровень загрязнения Zn воды и ДО выше, чем в оз. Васьковском) концентрации Zn и Cd, а также Pb, снижались по трофической цепи. В свою очередь, концентрации Cd (а также Pb и Cu) в зоопланктоне (70-290 мкм) из загрязненной металлами эстуарной зоны зал. Гуанабара, Бразилия (Kehrig et al., 2009) были сопоставимы (на 2-х станциях), либо выше (на 4-х станциях), чем в фитопланктоне в 1-10, 1-2, 1-4 раза, соответственно.

Оз. Тайху и приморские озера также отличаются по содержанию взвешенного и растворенного органического вещества (ОВ). В приморских озерах количество растворенного $C_{орг}$ составляет 2,5-6,7 мг/л, взвешенного $C_{орг}$ – 0,3-2,2 мг/л. В оз. Тайху концентрации $C_{орг}$ – 15-69 мг/л (Тао et al., 2012a). Содержание ВВ в приморских озерах 2,2-9,1 мг/л, в оз. Тайху \approx 7,9-40 мг/л (Тао et al., 2012a) (соответствует 13,6-69,9 NTU (нефелометрические единицы измерения. 1NTU = 0,58мг/л (ГОСТ 3351-74)). В связи с низким содержанием ВВ и $C_{орг}$ в воде, вероятно, моллюски приморских лагунных озер имеют более высокую скорость фильтрации, чем моллюски оз. Тайху и зоопланктон залива Гуанабара, и могут накапливать более высокие, сопоставимые с планктоном, концентрации Zn и Cd. При более высоких концентрациях $C_{орг}$ в воде, скорость фильтрации организмов снижается, и даже при повышенных концентрациях микроэлементов в воде, их накопление будет осуществляться с более низкой скоростью. Соответственно, конечные концентрации элементов в организмах будут ниже, по сравнению с их пищевыми объектами, как в оз. Тайху. Питание объектами, обогащенными металлами и $C_{орг}$, как в зал. Гуанабара, даже при условии уменьшения скорости фильтрации, приводит к росту содержания элементов по трофической цепи.

ДеФорест Д. с соавторами (DeForest et al., 2007) установили, что коэффициент биоаккумуляции металлов организмами из воды снижается по мере роста концентраций металлов в воде. Вероятно, одна из причин этой тенденции – высокая скорость фильтрации организмов в чистых водах и низкая – в загрязненных.

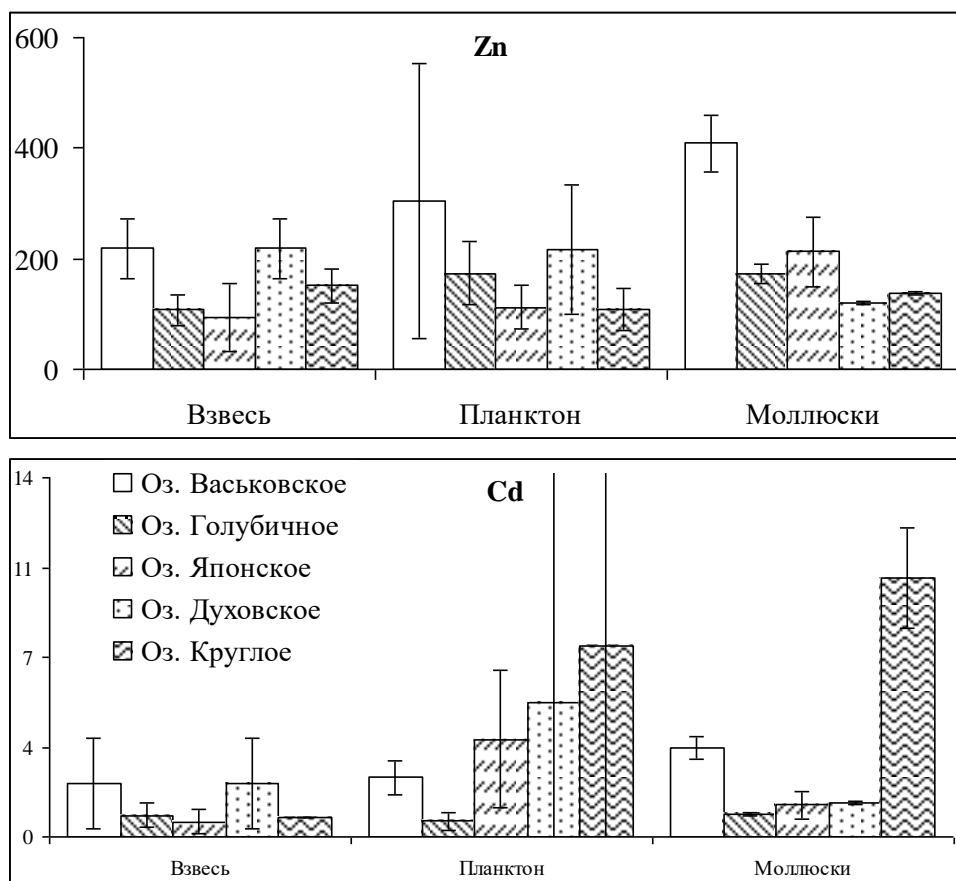


Рис. 3.19. Содержание Cd и Zn (мкг/г) в трофической цепи озер ВСА.

Таким образом, отсутствие снижения либо накопления Zn и Cd по трофической цепи планктон – моллюски-фильтраторы в озерах ВСА можно объяснить преобладающими концентрациями в растворенной форме (Zn) либо равномерным распределением между растворенной и взвешенной формами (Cd), преобладанием этих элементов в органической части взвеси и в планктоне (по сравнению с минеральной взвесью), высокой скоростью фильтрации моллюсков в обедненных органическим веществом водах, а также обитанием моллюсков в богатых ТМ мягких грунтах, которые при взмучивании могут служить дополнительным источником элементов.

3.3.3. Марганец, медь

Изменение содержания меди и марганца по пищевой цепи, в отличие от остальных металлов, имеет ярко выраженные видовые особенности, подтвержденные другими работами (Богатов и др., 2018).

Cu находится в воде преимущественно в растворенной форме, а Mn – во взвешенной. Медь – единственный элемент из обсуждаемых в данной работе, содержание которого во взвеси озер ВСА в 1,4-3 раза ниже средних содержаний в осадочных горных породах, Mn, наоборот, в 2-4 раза выше (Григорьев, 2003).

Содержание меди во взвеси и планктоне сопоставимо (исключение – озеро Японское), марганца – сопоставимо или ниже в планктоне (рис. 3.20).

В планктоне из оз. Васьковского средние концентрации Cu в 2-4 раза выше, чем в планктоне остальных озер, а вот концентрации Mn отличаются незначительно.

В моллюсках же исследованных озер наблюдаются значительные различия в зависимости от вида: корбикулы содержат в 3-4 раза больше меди, чем кунаширии, а кунаширии – в 200-400 раз больше марганца, чем корбикулы (рис. 3.20). Mn по пищевой цепи планктон - корбикулы снижается, аналогично группе металлов Fe-Pb-Ni, что связано с его преобладанием во взвешенной форме, не усваиваемой моллюсками, и выведением в составе псевдофекалий, а также увеличением площади поверхности моллюсков по сравнению с планктоном. По пищевой цепи планктон – кунаширии марганец сопоставим, и даже имеет тенденцию к увеличению, вероятно, в связи с высокой способностью моллюсков семейства *Unionidae* к аккумуляции марганца, по сравнению с корбикулами (Богатов и др., 2018).

Поведение меди по пищевой цепи планктон – корбикулы сопоставимо с группой Zn-Cd – концентрации не изменяются (рис. 3.20); так же, как эти элементы, медь находится в воде преимущественно в растворенной форме, обладает биофильными свойствами и высоким сродством к органическому веществу. Исследование содержания меди в представителях семейств *Unionidae* и *Cyrenidae* (Богатов и др., 2018) показало, что *Unionidae* содержат более низкие концентрации меди, чем *Cyrenidae*. Вероятно, поэтому в оз. Васьковском и Голубичном наблюдается снижение концентрации этого металла по трофической цепи планктон – кунаширии. Концентрация Cu в планктоне и кунашириях из оз. Японского сопоставима (рис. 3.20), что связано, вероятно, с низким содержанием

этого элемента в планктоне – пище моллюсков, в условиях низких концентраций во взвеси - ниже средних содержаний в осадочных породах и необходимости организмов активно накопить данный элемент до физиологически необходимых количеств из всех возможных источников. Известно, что процент усвоения микроэлементов из пищи и воды может изменяться в зависимости от потребностей (Wang, 1995).

Сравнение с оз. Тайху (Tao et al., 2012b), все компоненты которого загрязнены медью больше, чем компоненты озер ВСА (растворенные формы – 1,17-3,01 мкг/л; донные осадки – 17,9-39,0 мкг/г), показало, что по трофической цепи фитопланктон – зоопланктон – моллюски (корбикулы и живородки) на 3-х станциях происходит рост концентраций меди (70-50-155 мкг/г в загрязненном местообитании и 10-7-25 мкг/г в чистом). И лишь на одной станции, при содержании Cu в воде 2,54 мкг/л, наблюдалось снижение концентрации элемента по пищевой цепи (55-55-8 мкг/г).

Выше было отмечено, что снижение содержания Zn по трофической цепи оз. Тайху может быть связано с более низкой скоростью фильтрации моллюсков в условиях более высокого содержания углерода РОВ, чем в озерах ВСА. Однако, при более низкой скорости фильтрации моллюсков, это противоречит основной тенденции накопления Cu по трофической цепи этого озера. В то же время, сопоставимые содержания Cu по трофической цепи в озерах ВСА и снижение концентрации элемента по трофической цепи на одной из станций оз. Тайху хорошо согласуется с разными концентрациями органического вещества, регулирующими скорость фильтрации (низкими – в озерах ВСА, высокими в оз. Тайху).

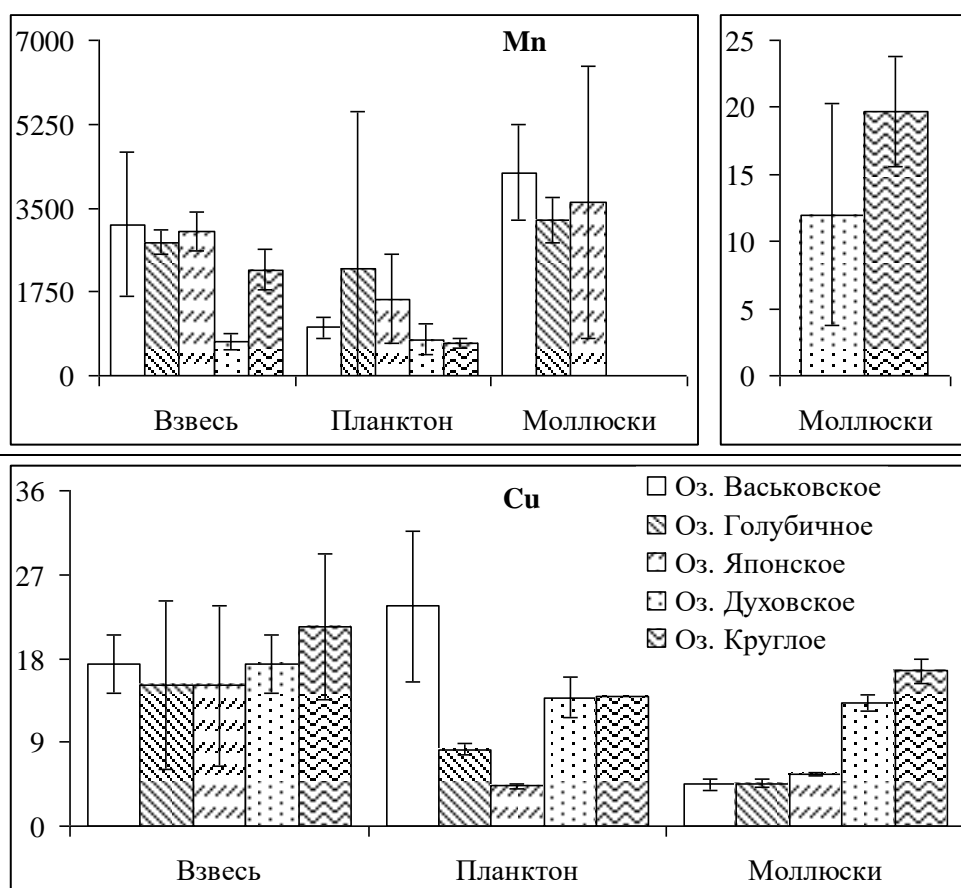


Рис. 3.20. Содержание Mn и Cu (мкг/г) в трофической цепи озер ВСА.

Таким образом, содержание Pb, Ni, Fe по трофической цепи планктон – моллюски уменьшается как в чистых, так и антропогенно-измененных озерах, так как эти металлы находятся в воде преимущественно во взвешенной форме и удаляются из организма в виде пеллет-псевдофекалий. Отсутствие снижения либо накопления Zn и Cd по трофической цепи можно объяснить преобладающими концентрациями в растворенной форме (Zn) либо равномерным распределением между растворенной и взвешенной формами (Cd). Mn и Cu – единственные элементы, имеющие видовые особенности накопления: корбикулы накапливают Mn в количествах значительно меньших, чем кунаширии, а Cu – в более высоких. В основном, поведение Mn по пищевой цепи планктон – моллюски соответствует группе Fe-Pb-Ni, а Cu - группе Zn-Cd.

ВЫВОДЫ

1) Установлено, что, благодаря влиянию морской среды, воды малых озер восточного Сихотэ-Алиня имеют гидрокарбонатно- или хлоридно-натриевый состав.

2) Определены концентрации растворенных металлов в водах малых озер восточного Сихотэ-Алиня, которые ниже средних в реках мира. Исключение составляют повышенные концентрации цинка и железа. Сумма концентраций растворенной и взвешенной форм металлов в исследованных озерах меньше рыбохозяйственных ПДК.

3) В наиболее антропогенно-измененном оз. Васьковском, относительно средних значений в реках мира, превышения концентраций растворенных металлов и металлов во взвеси в основном не обнаружено, концентрации растворенного цинка, а также свинца и марганца во взвеси этого озера повышены. В донных отложениях ($<0,01$ мм), планктоне, растениях и моллюсках содержание свинца и цинка повышено, относительно фоновых озер ВСА. Концентрация свинца в донных отложениях ($<0,01$ мм) превышает уровень вероятного негативного биологического эффекта (PEL).

4) Выявлено, что связей между содержанием тяжелых металлов (меди, никеля, железа) в планктоне и в воде преимущественно не наблюдается, так как находящиеся в диапазоне фоновых значений для региона концентрации элементов в озерах ВСА не приводят к их аккумуляции в живом веществе. Для марганца, кадмия, цинка и свинца существует достоверная корреляционная зависимость между планктоном и водой, за счет повышенных концентраций этих металлов в компонентах геосистемы оз. Васьковского.

5) Установлено, что в трофической цепи фитопланктон – моллюски, как в фоновых, так и антропогенно-измененных озерах ВСА, наблюдается достоверное снижение содержания свинца (в 7-22 и 29-87 раз), никеля (в 12-70 и 12-54 раз) и железа (в 3-10 и 25-98 раз). Концентрации цинка и кадмия в планктоне и моллюсках сопоставимы. Перенос по пищевой цепи меди и марганца зависит от семейства моллюсков: по сравнению с планктоном концентрации меди в

корбикулах сопоставимы, а в кунашириях снижаются. Для марганца наблюдается обратная картина.

б) С учетом литературных данных показано, что динамика содержания металлов в организмах трофической цепи планктон – моллюски-фильтраторы зависит от нескольких факторов: степени загрязнения водоема органическим веществом и металлами, форм их нахождения, удельной площади поверхности и фильтрационной активности моллюсков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айздайчар Н.А., Гостюхина О.Б. Совместное влияние солености и загрязнения среды бихроматом калия на адаптивные возможности диатомовой бентосной микроводоросли *Attheya ussurensis* в лабораторных условиях // Известия ТИНРО, 2015. – Т. 182. – С 183-189.
2. Алекин О.А. Основы гидрохимии / Л.: Гидрометеиздат, 1953. – 296 с.
3. Алимов А.Ф. Функциональная экология пресноводных двустворчатых моллюсков / (Тр. Зоол. Ин-та АН СССР. Т. 96). Л.: Наука, 1981. 248 с.
4. Апонасенко А.Д., Лопатин В.Н., Щур. Л.А., Филимонов В.С., Назаров В.А. Современное состояние озера Ханка по некоторым гидробиологическим и гидрофизическим параметрам // Известия ТИНРО, 2000. Т. 127. № 1-2. С. 535-558.
5. Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. Геохимия ландшафтов и техногенез / М.: Наука, 1990. – 196 с.
6. Барабанщиков Е.И. Зоопланктон озера Ханка / Автореф... канд. биол. наук. Зоологический институт РАН. СПб: Зоологический институт РАН, 2004. 22 с.
7. Барабанщиков Е.И., Колпаков Е.В. Видовой состав зоопланктона двух приморских озер Сихотэ-Алинского заповедника // Результаты охраны и изучения природных комплексов Сихотэ-Алиня. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию со дня образования Сихотэ-Алинского государственного заповедника, п. Терней, Приморский край, 20-23 сентября 2005 г. Владивосток: ОАО «Примполиграфкомбинат», 2005. – С. 127-131.
8. Батоян В.В., Сорокин В.Н. Микроэлементы в рыбах Куйбышевского водохранилища // Экология.– 1989. – №6. – С. 81-83.
9. Богатов В.В., Богатова Л.В. Аккумуляция тяжелых металлов пресноводными гидробионтами в горнорудном районе юга Дальнего Востока России // Экология, 2009. – № 3. – С. 202-208.

10. Богатов В.В., Прозорова Л.А., Чернова Е.Н., Лысенко Е.В. Особенности биоаккумуляции тяжелых металлов у двустворчатых моллюсков (*Bivalvia*) в природных водоемах восточной Азии // Вестник ДВО РАН, 2018. – № 4 (в печати)
11. Болдескул А.Г., Шамов В.В., Гарцман Б.И., Кожевникова Н.К. Ионный состав генетических типов вод малого речного бассейна: стационарные исследования в центральном Сихотэ-Алине // Тихоокеанская геология, 2014. – Т. 33, № 2. – С. 90-101.
12. Бурдин К.С., Золотухина Е.Ю. Тяжелые металлы в водных растениях (аккумуляция и токсичность) / М.: Диалог МГУ, 1998. – 202 с.
13. Бурдин К.С., Крупина М.В., Савельев И.Б. Физиологические механизмы регулирования содержания тяжелых металлов в морских макроводорослях // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 16. Биология, 1990. – № 2. – С. 35-42.
14. Ветров, Кузнецова. Микроэлементы в природных средах региона озера Байкал / РАН, Сиб. отд-ние, Ин-т геохимии. Науч. ред. чл.-кор. РАН М.И. Кузьмин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. – 234 с.
15. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах / М.: Изд-во АН СССР, 1957. 277 с.
16. Гаретова Л.А., Каретникова Е.А. Гидрохимические и микробиологические показатели в оценке экологического состояния малых эстуарных систем (на примере оз. Токи) // Известия ТИНРО, 2010. Т. 162. С. 294-305.
17. Гашкина Н.А. Зональные особенности распределения биогенных элементов и органического вещества в малых озерах // Водные ресурсы, 2011. – Т.38, № 3. – С. №25-344.
18. Гашкина Н.А., Моисеенко Т.И. Лимитирование трофности малых озер по основным биогенными элементам // Доклады Академии Наук, 2010. – Т. 435, № 3. – С. 394-398.
19. Гашкина Н.А., Таций Ю.Г., Удачин В.Н., Аминов П.Г. Биогеохимическая индикация загрязнения окружающей среды (на примере

влияния крупного медеплавильного комбината) // Геохимия, 2015. № 3. С. 264-275.

20. Геохимия окружающей среды / Сает. Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. М.: Недра, 1990. 335 с.

21. Горбунов М.Ю. Вертикальная стратификация водных масс в малых озерах лесостепного Поволжья // Изв. Самарского науч. центра РАН. – 2007. – Т. 9, № 4. – С. 973–986.

22. Гордеев В.В., Лисицын А.П. Средний химический состав взвесей рек Мира и питание океанов речным осадочным материалом // Доклады АН СССР, 1978. – Т. 238, №1. – С. 275-277.

23. Государственный водный реестр [Электронный ресурс]. URL: <http://textual.ru/gvr> (дата обращения 24.07.2018).

24. ГОСТ Р 52963-2008. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов.

25. Грехнев Н.И., Крупская Л.Т., Бубнова М.Б., Остапчук В.И. Экологический мониторинг на основе изучения геохимического состава озерных отложений (на примере оз. Ханка) // Экологические системы и приборы, 2006. № 11. С. 3-6.

26. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия, 2003. – № 7. – С. 785-792.

27. Громыко М.Н. Физико-географические условия Сихотэ-Алинского биосферного заповедника // Тигры Сихотэ-Алинского заповедника: экология и сохранение. – Владивосток: «ПСР», 2005. – С. 14-18.

28. Даувальтер В.А., Кашулин Н.А. Основные закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер северо-западной части Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран // Вестник Кольского научного центра РАН, 2015. – № 1. – С. 101-112.

29. Долотов А.В., Гапеева М.В. Оценка загрязнения тяжелыми металлами водоемов питьевого назначения (на примере Уводьского водохранилища) // Экология человека, 2009. – № 1. – С. 15-19.
30. Долотов А.В., Гапеева М.В., Козловский Е.В. Оценка загрязнения тяжелыми металлами Уводьского водохранилища // Водные ресурсы, 2010. – Т. 37, № 1. – С. 58-64.
31. Елпатьевский П.В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах / М.: Наука, 1993. – 253 с.
32. Жизнь растений в 6-ти томах. Том 6. Цветковые растения / Под ред. А.Л. Тахтаджяна. М.: Просвещение, 1982. 543 с..
33. Зверькова Ю.С. Использование раковин пресноводных моллюсков для мониторинга загрязнения ТМ экосистем р. Днепр на территории Смоленской области // Экология, 2009. – № 6. – С. 468-472.
34. Иванов Г.И. Почвообразование на юге Дальнего Востока / М.: Наука, 1976. 200 с.
35. Иванов П.В. Классификация озер по величине и по их средней глубине // Бюл. ЛГУ, 1948. № 21. С. 29-36.
36. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов / Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – 395 с.
37. Клишко О.К., Авдеев Д.В., Голубева Е.М. Особенности биоаккумуляции тяжелых металлов у моллюсков в аспекте оценки состояния окружающей среды // Доклады АН, 2007. Т. 413, № 1. – С. 132-134.
38. Ковековдова Л.Т., Симоконь М.В. Оценка содержания металлов и мышьяка в донных отложениях и рыбах из рек бассейна залива Петра Великого (Японское море) // Известия ТИНРО, 2010. – Т. 160. – С. 223-235.
39. Кожевникова Н.К., Болдескул А.Г., Шапов В.В., Гарцман Б.И., Губарева Т.С. Особенности формирования химического состава природных вод в горных лесных бассейнах // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова, 2014. № 6. С. 316-323.

40. Колесников Б.Н. Растительность // Южная часть Дальнего Востока. М.: Наука, 1969. С. 206-250.
41. Кононова А.С., Кремлева Т.А., Тимшанов Р.И. Оценка устойчивости малых водоемов Пуровского и Тазовского районов Тюменской области к процессам закисления // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2016. – Т. 2, № 1. – С. 68-72.
42. Короткий А.М., Кулаков А.П., Никонова Р.И. Основные черты рельефа юга Дальнего Востока // Особенности почвообразования в зоне бурых лесных почв. Владивосток: БПИ СО ДВФ АН СССР, 1967. С. 12-16.
43. Кот Ф.С., Шамов В.В., Зазулина В.Е. Рассеянные металлы в донных отложениях озер нижнего Амура // В сборнике: Биогеохимические и гидроэкологические характеристики наземных и водных экосистем тематический сборник. Владивосток, 2007. – С. 100-111.
44. Котляков В.М., Комарова А. И. География. Понятия и термины. / Пятиязычный академический словарь: русский, английский, французский, испанский, немецкий. М.: Наука, 2007. 859 с.
45. Кремлева Т.А., Моисеенко Т.И. Определение буферной емкости природных озер Западной Сибири к закислению: критерии устойчивости // Геохимия, 2017. - № 6. – С. 539-549.
46. Кремлева Т.А. Моисеенко Т.И., Хорошавин В.Ю., Шавнин А.А. Геохимические особенности природных вод западной Сибири: микроэлементный состав // Вестник ТГУ, 2012. № 12. С. 80-89.
47. Кремлева Т.А., Паничева Л.П., Третьякова М.Н., Морозова Н.В. Оценка устойчивости мильных озер севера Западной Сибири в отношении процессов закисления // Вестник ТГУ. Экология и природопользование, 2013. - № 5. – С. 23-33.
48. Кремлева Т.А., Хорошавин В.Ю. Особенности ионного состава природных вод малых озер Западной Сибири и их классификация по кислотности и содержанию органического вещества // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных в природных средах. Материалы II международной

школы-семинара для молодых исследователей, посвященной памяти профессора В.Б. Ильина. Тюмень, 2016. – С. 153-164.

49. Куренцова Г.Э. Растительность Приморского Края. Владивосток: БПИ СО ДВФ АН СССР, 1968. 192 с.

50. Лакин Г.Ф. Биометрия: Учеб. пособие для биол. спец. вузов – 4-е изд., перераб. и доп. / М.: Высш. шк., 1990. – 352 с.

51. Латыпова В.З., Степанова Н.Ю., Минакова Е.А. Экологическое нормирование антропогенных нагрузок на водные экосистемы // Экологический консалтинг, 2004. № 4. С. 3-10.

52. Левшина С.И., Шамов В.В., Ким В.И. Органическое вещество в воде припойменных озерах нижнего Амура // Водные ресурсы, 2007. – Т. 34, № 5. – С. 596-603.

53. Леонова Г.А. Оценка современного экологического состояния озер алтайского края по биогеохимическим критериям // Электр. журнал ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ. 2005. Т. 091. С. 954-972. [Электронный ресурс]. URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/091.pdf> (дата обращения: 13.04.2016).

54. Леонова Г.А., Бобров В.А. Геохимическая роль планктона континентальных водоемов Сибири в концентрировании и биоседиментации микроэлементов / Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2012. – 314 с.

55. Леонова Г.А., Бобров В.А. Особенности использования планктона в экологическом мониторинге водохранилищ // Научные основы экологического мониторинга водохранилищ: материалы Всерос. науч.-практ. Конф., Хабаровск, 26-29 октября 2010 г. – Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2010. – С. 91-95. – (Дружининские чтения; Вып. 4)

56. Леонова Г.А., Бобров В.А., Богуш А.А. Геохимическая характеристика современного состояния соляных озер Алтайского края // Геохимия. 2007. № 10. С. 1114-1128.

57. Леонова Г.А., Бычинский В.А. Гидробионты Братского водохранилища как объекты мониторинга тяжелых металлов // Вод. ресурсы. – 1998. – Т. 25, № 5. – С. 603-610.

58. Линник П.Н., Жежеря В.А., Линник Р.П., Запорожец О.А. Состояние металлов в поверхностных водных объектах как важная характеристика при оценке их химической и биологической активности // VII международная научно-практическая конференция «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде», г. Семей, 4-8 октября 2012 г. – С. 175-181.

59. Луценко Т.Н., Лысенко Е.В., Чернова Е.Н. Растворенное органическое вещество в озерах лагунного типа (северо-восток Приморья, Россия) // Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах», Петрозаводск, 10-14 сентября 2012 г. / Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. С. 338-342.

60. Луценко Т.Н., Чернова Е.Н., Лысенко Е.В. Органическое вещество малых озер северо-востока Приморья // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2014. № 6. С. 408-414.

61. Луценко Т.Н., Чернова Е.Н., Лысенко Е.В., Рыжаков Д.С. Органические вещества в малых озерах Сихотэ-Алинского Биосферного Заповедника // Успехи наук о жизни, 2015. Т. 9, № 1. С. 32-36

62. Лысенко Е.В. Макрокомпонентный состав вод ряда озер восточного Сихотэ-Алиня // Территориальные исследования: цели, результаты и перспективы: Тезисы VI региональной школы-семинара молодых ученых, аспирантов и студентов. Биробиджан, 25-27 октября 2011 г. / Под ред. Е.Я. Фрисмана. Биробиджан: ИКАРП ДВО РАН – ГОУВПО «ДВГСГА», 2011. С. 31-33.

63. Лысенко Е.В. Особенности распределения металлов в системе «вода-взвесь-планктон» в озерах Восточного Сихотэ-Алиня // Географические и геоэкологические исследования на Дальнем Востоке: Материалы XI молодежной конференции с элементами научной школы, г. Владивосток, 24-26 октября 2012 г. – Владивосток: Дальнаука, 2012. Вып. 9. С. 67-70.

64. Лысенко Е.В. Распределение тяжелых металлов в системе «вода – донные отложения – высшие водные растения» (на примере малых озер

восточного Сихотэ-Алиня) // Географические и геоэкологические исследования на ДВ: сб. научных статей молодых ученых. Владивосток: Дальнаука, 2014. Вып. 10. С. 66-72.

65. Лысенко Е.В. Содержание металлов в организмах трофической цепи планктон - моллюски в солоноватоводных озерах Восточного Сихотэ-Алиня // Географические и геоэкологические исследования на ДВ: сб. научных статей молодых ученых – Владивосток: Дальнаука, 2016. – Вып. 12. – С. 59-63.

66. Лысенко Е.В. Эколого-геохимическое состояние прибрежно-морских территорий восточного Сихотэ-Алиня как один из факторов устойчивого природопользования // Устойчивое природопользование в прибрежно-морских зонах: Материалы международной конференции, г. Владивосток, 7-9 октября 2013 г. Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 145-148.

67. Лысенко Е.В., Чернова Е.Н. Биоаккумуляция микроэлементов в трофической цепи «вода – планктон – моллюски-фильтраторы» в озерах северо-восточного Сихотэ-Алиня с разным уровнем антропогенной нагрузки // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах: Материалы Международной школы-семинара молодых исследователей, г. Тюмень, 13-16 мая 2014 г. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2014. С. 215-220.

68. Лысенко Е.В., Чернова Е.Н. Гидрохимические и биогеохимические особенности Духовских озер восточного Сихотэ-Алиня // Совещание географов Сибири и Дальнего Востока: Материалы XV совещ. географов Сибири и Дал. Востока г. Улан-Удэ, Россия 10-13 сент. 2015 г. Иркутск, 2015. С. 110-113.

69. Лысенко Е.В., Чернова Е.Н. Изменение химического состава вод озер Васьковское и Голубичное (восточный Сихотэ-Алинь) в зависимости от водного режима // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2014. № 6. С. 415-420.

70. Лысенко Е.В., Чернова Е.Н. Особенности распределения тяжелых металлов в воде и гидробионтах из водных экосистем северо-восточного Сихотэ-Алиня - озер Васьковское и Голубичное (Приморский край) с разной степенью

антропогенной нагрузки // VII международная научно-практическая конференция «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде», г. Семей, 4-8 октября 2012 г. С. 312-314.

71. Лысенко Е.В., Чернова Е.Н. Перенос тяжелых металлов по трофической цепи планктон - моллюски-фильтраторы в солоноватоводных лагунных озерах побережья Японского моря // Изв. ТИНРО, 2016. – Т. 187. – С. 197-204.

72. Лысенко Е.В., Чернова Е.Н. Тяжелые металлы в высших водных растениях малых озер северо-восточного Сихотэ-Алиня с различным уровнем антропогенного воздействия и минерализации // Биогеохимия и биохимия микроэлементов в условиях техногенеза биосферы: Материалы VIII биогеохимической школы, посвященной 150-летию со дня рождения академика В.И. Вернадского. Гродненский государственный университет, 11-14 сентября 2013 г. / Отв. Ред. В.В. Ермаков. М.: ГЕОХИ РАН, 2013. С. 495-498.

73. Мандыч А.Ф. Изменение гидрологического режима территории на ее интенсивном освоении // Стационарные гидрологические исследования на юге Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1979. С. 155-166.

74. Методы химического анализа в гидробиологических исследованиях / Отв. ред. В.Н. Золотарев. Владивосток, 1979. 131 с.

75. Моисеенко Т.И. Водная экотоксикология: Теоретические и прикладные аспекты / М.: Наука, 2009. 400 с.

76. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Микроэлементы в поверхностных водах суши и особенности их водной миграции // Доклады Академии Наук. – 2005. – Т. 405, № 3. – С. 395-400.

77. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Распределение микроэлементов в поверхностных водах суши и особенности их водной миграции // Водные ресурсы, 2007. – Т.34. № 4. – С. 454-468.

78. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Биоаккумуляция ртути в рыбах как индикатор уровня загрязнения вод // Геохимия, 2016. № 6. С. 495-504.

79. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Дину М.И., Кремлева Т.А. Особенности закисления вод на европейской территории России и в Западной Сибири // Доклады Академии Наук, 2015. – Т. 462, № 5. – С. 582.

80. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Дину М.И., Хорошавин В.Ю., Кремлева Т.А. Влияние природных и антропогенных факторов на процессы закисления вод в ных регионах // Геохимия, 2017. – № 1. – С. 41-56.

81. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Кудрявцева Л.П., Былиняк Ю.А., Сандимиров С.С. Зональные особенности формирования химического состава вод малых озер на территории европейской части России // Водные ресурсы, 2006. – Т. 33, № 2. – С. 163-180.

82. Моисеенко Т.И., Кудрявцева Л.П., Гашкина Н.А. Оценка геохимического фона и антропогенной нагрузки на биоаккумуляции микроэлементов в организмах рыб // Водные ресурсы, 2005. – Т. 32, № 6. – С. 700-711.

83. Моисеенко Т.И., Паничева Л.П., Дину М.И., Кремлева Т.А., Фетилев Н.Н. Инактивация токсичных металлов в одах суши гумусовыми веществами // Вестник ТГУ, 2011. № 5. С. 6-19.

84. Муллинс Т. Химия загрязнения воды / Химия окружающей среды, под ред. Дж.О.М. Бокриса, 1982. С. 276-345.

85. Никаноров А.М. Гидрохимия: Учебник. / Изд. 3-е, дополненное. Ростов/Д: «НОК», 2008. 461 с.

86. Никаноров А.М., Жулидов А.В. Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах / Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 312 с.

87. Никаноров А.М., Посохов Е.В. Гидрохимия / Л.: Гидрометеиздат, 1985. 232 с.

88. Отчет о научно-исследовательской работе за 2009 г. Тема 2: Мониторинг водных экосистем. Подраздел 2.1.2. Исследования химико-гидрологических условий обитания макробентоса в западных и восточных водотоках заповедника и его транзитной зоны / Терней, 2009. – 32 с.

89. Пшеничников Б.Ф. Пшеничникова Н.Ф. Иллювиально-гумусовые буроземы Приморья // Биологические науки, 1978. № 8. С. 131-135.
90. Разработка биологического обоснования на рыбохозяйственное использование некоторых озер Тернейского района: Духовское, Мраморное, Круглое / Отчет о НИР. // ТИНРО, 1990. - № 21718. Владивосток. 37 с.
91. Расписание погоды rp5.ru [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rp5.ru>.
92. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. А.Д. Семенова. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 541 с.
93. Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира / М.: ГЕОС, 2006. – 175 с.
94. Саенко Е.М., Богатов В.В., Зайкин Д.В. О систематическом положении дальневосточных родов *Kunashiria* и *Arsenievinaia* (Bivalvia, Unionidae) // Зоологический журнал, 2009. – Т. 88, № 11. – С. 1298-1310.
95. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.opengost.ru>.
96. Сиротский С.Е., Чижикова Н.П., Харитонова Г.В., Уткина Г.В. Микроэлементы в водных экосистемах бассейна р. Амур // Биогеохимические и гидроэкологические параметры наземных и водных экосистем. Вып. 19. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2011. С.116-124.
97. Скопинцев Б.А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус) / Л.: Гидрометеиздат, 1950. 290 с.
98. Скопинцев Б.А. Формирование современного химического состава вод Черного моря / Л.: Гидрометеиздат, 1975. 236 с.
99. Соловых Г.Н., Минакова В.В., Карнаухова И.В., Павловская В.В. Сравнительное исследование аккумуляции тяжелых металлов двустворчатыми

моллюсками семейств *Unionidae* и *Dreissenidae* // Вестник ОГУ, 2009. – № 6. – С. 348-350.

100. Сосудистые растения советского Дальнего Востока. Т. 3 / Отв. ред. С.С. Харкевич. Л.: Наука, 1988. – 421 с.

101. Страховенко В.Д., Щербов Б.Л., Маликова И.Н., Восель Ю.С. Закономерности распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озер различных регионов Сибири // Геология и геофизика, 2010. – Т. 51, № 11. – С. 1501-1514.

102. Сурина Н.И., Таргульян В.О., Шоба С.А. Морфологический анализ профиля и химические особенности горных буроземов среднего Сихотэ-Алиня // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 1984. № 3. С. 10-20.

103. Таргульян В.О., Грачева Р.Г. Проблема оглинивания горно-лесных почв с бурым профилем в Сибири и на Дальнем Востоке // Процессы почвообразования и превращения элементов в почвах в переменном режиме увлажнения. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. С. 54-66.

104. Теплая Г.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // Астраханский вестник экологического образования, 2013. – № 1 (23). – С. 182-192.

105. Унифицированные методы анализа вод СССР. Выпуск 1 / Под. ред. Г.Г. Доброумовой. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 144 с.

106. Урбазаева С.Д., Павлов И.А., Раднаева Л.Д. Микроэлементный состав поровых вод донных отложений дельты р. Селенга // Вестник ВСГУТУ, 2014. – Т. 4. – № 49. – С. 176-179.

107. Хажеева З.И., Урбазаева С.Д., Бодоев Н.В., Раднаева Л.Д., Калинин Ю.О. Тяжелые металлы в воде и донных отложениях дельты р. Селенги // Водные ресурсы, 2004. – Т. 31. – № 1. – С. 69-72.

108. Христофорова Н.К. Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжелыми металлами / Л.: Наука. Ленинградское отделение. 1989. 192 с.

109. Худяков Г.И., Денисов Е.П., Короткий А.М. и др. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока: Юг Дальнего Востока. М.: Наука, 1972. 424 с.

110. Чернова Е.Н., Лобас Л.А., Ковалев М.Ю., Лысенко Е. В. Особенности распределения тяжелых металлов в компонентах водных экосистем памятников природы – озер Благодатное, Васьковское (Приморский край) и Азабачье (Камчатский край) // Водные ресурсы, 2014а. Т. 41. № 3. С. 312-318.

111. Чернова Е.Н., Лобас Л.А., Ковалев М.Ю., Кудрявцева Е.П. Особенности распределения тяжелых металлов в гидробионтах из водных экосистем-памятников природы – озер Благодатное, Васьковское (Приморский край) и Азабачье (Камчатский край) // IX Дальневосточная конференция по заповедному делу. Владивосток, 20-22 октября 2010 г.: Материалы конф. – Владивосток: ДальНаука, 2010. – С. 455-460.

112. Чернова Е.Н., Лысенко Е.В. Закономерности переноса микроэлементов по трофической цепи планктон – моллюски // Вестник ОГУ, 2016. - № 10. – С. 87-92.

113. Чернова Е.Н., Лысенко Е.В. Содержание металлов в организмах разных трофических уровней в условиях пресноводных озер Восточного Сихотэ-Алиня // Биология внутренних вод, 2018. – № 4 (в печати).

114. Чернова Е.Н., Лысенко Е.В., Луценко Т.Н. Биогеохимические особенности лагунных озер (Благодати, Голубичное, Японское) Сихотэ-Алинского Биосферного Заповедника // Успехи наук о жизни, 2015. № 10. С. 124-132

115. Чернова Е.Н., Шулькин В.М. Связь между концентрациями металлов в среде и водорослями и биоаккумуляционный фактор // Биология моря, 2018 (в печати).

116. Чернова Е.Н., Шулькин В.М., Лысенко Е.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г. Гидрохимические и биогеохимические особенности пресных и солоноватоводных озер восточного Сихотэ-Алиня // Изв. ТИНРО. 2014б. Т. 178. С. 157-172.

117. Черных Н.А., Сидоренко С.Н. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере: Монография / М.: Изд-во РУНД, 2003. 430 с.
118. Чудаева В.А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока / Владивосток: Дальнаука, 2002. – 392 с.
119. Чудаева В.А., Чудаев О.В. Особенности химического состава воды и взвесей рек Приморья (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. – 2011. – Т. 30, № 2. – С. 102-119.
120. Чухлебова Л.М., Бердников Н.В., Панасенко Н.М. Тяжелые металлы в воде, донных отложениях и мышцах рыб реки Амур // Гидробиологический журнал, 2011. – Т. 47, № 3. – С. 110-120.
121. Шамов В.В., Волынец Е.И., Крюкова М.В. Индикационные исследования озер долины нижнего Амура // В книге: Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды Тезисы докладов IV Международной конференции. Белорусский государственный университет, 2011. – С. 218-221.
122. Шамов В.В., Матрошилов Ю.А., Петров Е.С., Баканов К.Г. Условия формирования и оценка ресурсов органоминеральных отложений озер нижнего Приамурья // География и природные ресурсы, 1999. – № 1. – С. 105-111.
123. Шамов В.В., Осипенко Б.В., Мещенин И.Г. Оценка современного экологического состояния оз. Болонь // Биогеохимические и гидроэкологические исследования на Дальнем Востоке. Вып. 7. Владивосток: Дальнаука, 1997. – 168 с.
124. Шаров П.О. Загрязнение свинцом пос. Рудная Пристань и его влияние на здоровье детей. Владивосток: Дальнаука, 2005. 132 с.
125. Шулькин В.М. Металлы в экосистемах морских мелководий / Владивосток: Дальнаука. 2004. 276 с.
126. Шулькин В.М. Изменчивость химического состава речных вод Приморья как индикатор антропогенной нагрузки и ландшафтной структуры водосборов // Вестник ДВО РАН, 2009. № 4 (146). С. 103-114.

127. Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Перепелятников Л.В. Пространственно-временная изменчивость химического состава речных вод юга Дальнего Востока РФ // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 4. С. 428-439.
128. Шулькин В.М. Никулина Т.В. Комплексная оценка качества речных вод Приморского края РФ по химическим характеристикам и составу водорослей перифитона // Биология внутренних вод, 2015. – № 1. – С. 19-29.
129. Шулькин В.М., Никулина Т.В. Химический состав вод и водоросли перифитона р. Рудная (Приморский Край) // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова, 2014. – № 6. – С. 763-777.
130. Щур Л.А., Апонасенко А.Д., Лопатин В.Н., Филимонов В.С., Назаров В.А. Бактерио- и фитопланктон озера Ханка (Приморский край) // Изв. ТИНРО, 2000. Т. 127, № 1-2. С. 569-589.
131. Щур Л.А., Генкал С.И. Размерная структура Bacillatiophyta планктона оз. Ханка // Биология внутренних вод, 2005. № 1. С. 49-56.
132. Явнов С.В. Некоторые результаты изучения и промысла моллюсков рода *Corbicula* (Bivalvia) в бассейне реки Раздольной // Известия ТИНРО, 2000. – Т. 127, №. 1-1. – С. 334-341.
133. Bruland K.W. Oceanographic distribution of cadmium, zinc, nickel and copper in the North Pacific // Earth Planet Sci. Lett., 1980. Vol. 47. Pp. 176-198.
134. Campbell L.M., Norstrom R.J., Hobson K.A., Muir D.C.G., Backus S., Fisk A.T. Mercury and other trace elements in a pelagic Arctic marine food web (Northwater Polynya, Baffin Bay) // Science of the Total Environment. 2005. V. 351. P. 247-263.
135. Cassini A., Tallandini L., Favero N., Albergoni V. Cd bioaccumulation studies in the freshwater mollusks *Anodonta cygnea* & *Unio elongatulus* / Comp. Biochem. Physiol., 1986. – Vol. 84C, № 1. – Pp. 35-41.
136. Chapman D. Water Quality Assessments – A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring – Second Edition / Cambridge, 1996. – 609 p.

137. Chelation/Solvent Extraction System for the determination of Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn in natural waters. Applied Geochemistry Research Group. Technical Communication / L. Imperial College of Science and Technology, 1975. – Vol. 62. – P. 1-24.
138. Chen C.Y., Stemberger R.S., Klaue B., Blum J.D., Pickhardt P.C., Folt C.L. Accumulation of heavy metals in food web components across a gradient of lakes // *Limnol. Oceanogr.*, 2000. – 45(7). – Pp. 1525-1536.
139. Chua E. M., Flint N., Wilson S.P., Vink S. Potential for biomonitoring metals and metalloids using fish condition and tissue analysis in an agricultural and coal mining region // *Chemosphere*, 2018. – Vol. 202. – Pp. 598-608.
140. Ciparis S., Schreiber M. E. and Voshell Jr J. R. Using watershed characteristics, sediment, and tissue of resident mollusks to identify potential sources of trace elements to streams in a complex agricultural landscape // *Environ. Monit. Assess.*, 2012. – Vol. 184. – Pp. 3109-3126.
141. Cui B., Zhang Q., Zhang K., Liu X., Zhang H. Analyzing trophic transfer of heavy metals for food webs in the newly-formed wetlands of the Yellow River Delta, China // *Environmental Pollution*, 2011. – Vol. 159. – Pp. 1297-1306.
142. Dehn L.A., Follmann E.H., Thomas D.L., Sheffield G.G., Rosa C., Duffy L.K., O'Hara T.M. Trophic relationships in an Arctic food web and implications for trace metal transfer // *Science of the Total Environment*. 2006. V. 362. P. 103-123.
143. DeForest D.K., Brix K.V., Adams W.J. Assessing metal bioaccumulation in aquatic environments: The inverse relationship between bioaccumulation factors, trophic transfer factors and exposure concentration // *Aquatic Toxicology*, 2007. – Vol. 84. – Pp. 236–246.
144. Depledge M.H., Rainbow P.S. Models of regulation and accumulation of trace metals in marine invertebrates // *Comp. Biochem. Physiol. C.*, 1990. Vol. 97. Pp. 1-7.
145. Dietz R., Riget F., Cleemann M., Aarkrog A., Johansen P., Hansen J.C. Comparison of contaminants from different trophic levels and ecosystems // *Science of the Total Environment*. 2000. V. 245. P. 221-231.

146. Fritioff A., Greger M. Uptake and distribution of Zn, Cu, Cd and Pb in an aquatic plant *Potamogeton natans* // Chemosphere, 2006. – V. 63, № 2. – Pp. 220-227.
147. Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace elements in river waters / In Surface and Ground Water, Weathering, and Soils (ed. J.I. Drever) Vol. 5 Treatise on Geochemistry (eds. H.D. Holland and K.K. Turekian). Elsevier – Pergamon, Oxford, 2003. Pp.225-272.
148. Graney R. L., Jr., Cherry D. S., Cairns J. Jr. Heavy metal indicator potential of the Asiatic clam (*Corbicula fluminea*) in artificial stream systems // Hydrobiologia, 1983. – Vol.102. – Pp. 81-88.
149. Gundacker C. Comparison of heavy metal bioaccumulation in freshwater mollusks of urban river habitats in Vienna / Environ. Poll., 2000. – Vol. 110. – Pp. 61-71.
150. Hutchinson G.F. A treatise of limnology. N.Y.: Wiley, 1967. Vol. 2. 115 p.
151. Interim sediment quality guidelines. Environment Canada / Ottawa, Ontario: Ecosystem Conservation Directorate, Guidelines Branch, 1995. – 35 p.
152. Joiris C.R., Azokwu M.I. Heavy metals in the bivalve *Anadara (Senilia) senilis* from Nigeria // Marine Pollution Bulletin. 1999. V. 38. № 7. P. 618-622.
153. Kehrig H.A., Palermo E.F.A., Seixas T.G., Branco C.W.C., Moreira I., Malm O. Trophic transfer of methylmercury and trace elements by tropical estuarine seston and plankton // Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009. – Vol. 85. – Pp. 36-44.
154. Kinkade M.L., Erdman H.E. The influence of hardness components (Ca^{2+} and Mg^{2+}) in water on the uptake and concentration of cadmium in a simulated freshwater ecosystem // Environ. research., 1975. – Vol. 10. – Pp. 308-313.
155. Lakes in China. Research of their environment. Vol. 2. / Edited by: Xiangcan Jin. China: China Ocean Press, 1995. 482 p.
156. Liu H., Yang J., Gan J. Trace element accumulation in bivalve mussels *Anodonta woodiana* from Taihu Lake, China // Arch. Environ., Contam. Toxicol., 2010. – Vol. 59. – Pp. 593-601.

157. Łuczyńska J., Paszczyk B., Łuczyński M.J. Fish as bioindicators of heavy metals pollution in aquatic ecosystem of Pluszne Lake, and risk assessment for consumer's health // *Ecotoxicol. and Environ. Safety*, 2018. – Vol. 197. – Pp. 318-324.
158. Medvedeva L.A. Biodiversity of aquatic algal communities in the Sikhotealin Biosphere Reserve (Russia) // *Cryptogamie, Algol.*, 2001. – Vol. 22, № 1. – Pp. 60–100.
159. Monferrán M.V., Garnero P., de los Angeles Bistoni M., Anbar A.A., Gordon G.W., Wunderlin D.A. From water to edible fish. Transfer of metals and metalloids in the SanRoque Reservoir (Córdoba, Argentina). Implications associated with fish consumption // *Ecological Indicators*, 2016. – Vol. 63. – Pp. 48-60.
160. Morel F.M., Hering J.G. Principles and applications of aquatic chemistry / Wiley, New York, 1993. – 608 p.
161. Patrick C.H., Waters M.N., Galladay S.W. The distribution and ecological role of *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) in a large and shallow reservoir // *BioInvasion Records*, 2017. – Vol. 6, Issue 1. – Pp. 39-48.
162. Phillips D.J.H., Rainbow P.S. Strategies of trace metal sequestration in aquatic organisms // *Mar. Environ.*, 1989. Vol. 28. Pp. 207-210.
163. Pynnönen K., Holwerda D.A., Zandee D.I. Occurrence of calcium concretions in various tissues of freshwater mussels, and their capacity for cadmium sequestration // *Aquatic Toxicol.*, 1987. Vol. 10. Pp. 101-114.
164. Qui Y.-W. Bioaccumulation of heavy metals both in wild and mariculture food chains in Daya Bay, South China // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015. Vol. 163. Pp. 7-14.
165. Radwan S., Kovalik W., Kowalczyk C. Occurrence of heavy metals in water, phytoplankton and zooplankton of a mesotrophic lake in eastern Poland // *The Science of the total Environment*. 1990. V. 96. P. 115-120.
166. Rajeshkumar S., Li X. Bioaccumulation of heavy metals in fish species from Meiliang Bay, Taihu Lake, China // *Toxicol. Reports*, 2018. – № 5. – Pp. 288-295.
167. Rainbow P.S. The significance of trace metal concentrations in decapods // *Symp. Zool. Soc. Lond.*, 1988. Vol. 59. Pp. 291-313.

168. Reinfielder J.R., Fisher N.S., Luoma S.N., Nichols J.W., Wang W.-X. Trace elements trophic transfer in aquatic organisms: a critique of the kinetic model approach // *The Science of the Total Environ.*, 1998. Vol. 219. Pp. 117-135.
169. Rubio-Franchini I., Rico-Martínez R. Evidence of lead biomagnification in invertebrate predators from laboratory and field experiments // *Environmental Pollution*. 2011. V. 159. P. 1831-1835.
170. Rzymiski P., Niedzielski P., Klimaszyk P., Poniedziałek B. Bioaccumulation of selected metals in bivalves (Unionidae) and *Phragmites australis* inhabiting a municipal water reservoir // *Environ. Monit. Assess.*, 2012. - № 186. – Pp. 3199-3212.
171. Salánki J., Hiripi L. Effect of heavy metals on the serotonin and dopamine systems in the central nervous system of the freshwater mussel (*Anodonta cygnea* L.) // *Comparative Biochemistry and Physiology Part C Comparative Pharmacology*, 1990 Vol. 95, № 2. Pp. 301-305. DOI: 10.1016/0742-8413(90)90122-P
172. Salánki J., V.-Balogh K. Physiological background for using freshwater mussels in monitoring copper and lead pollution // *Hydrobiologia*, 1989. Vol. 188-189. Pp. 445-454.
173. Tao Y., Yuan Z., Xiaona H., Wei M. Distribution and bioaccumulation of heavy metals in aquatic organisms of different trophic levels and potential health risk assessment from Taihu Lake, China // *Ecotox. and Environ. Safety.*, 2012a. – 81. – pp. 55-64.
174. Tao Y., Yuan Z., Wei M., Xiaona H. characterization of heavy metals in water and sediments in Taihu Lake, China // *Environ. Monit. Assess.*, 2012b. – 184. – Pp. 4367-4382.
175. *Treatise on Geochemistry. Surface and ground water, weathering, and soils. Trace elements in river waters* / Ed. Drever J.I. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003. – Vol. 5. Chapter 5.09. – Pp. 225–272.
176. V.-Balogh K. Heavy metal pollution from a point source demonstrated by mussel (*Unio pictorum* L.) at Lake Balaton, Hungary / *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1988. – Pp. 910-914.

177. V.-Balogh K. Seasonal and local variation in the heavy metal concentration in animals of Lake Balaton / Heavy Metals in Water Organisms, 1985. – Pp. 119-139.
178. Viarengo A. Heavy metals in marine invertebrates: mechanisms of regularity and toxicity at the cellular level // CRC Crit. Biochem. Physiol., 1989. Vol. 1. Pp. 295-317.
179. Wang W-X., Fisher N. S. Assimilation of trace elements by the mussel *Mytilus edulis*: effects of diatom chemical composition. Mar. Biol., 1996a. Vol. 125. Pp. 715-724.
180. Wang W-X., Fisher N. S. Assimilation of trace elements and carbon by the mussel *Mytilus edulis*: effects of food composition. Limnol. Oceanogr., 1996b. Vol. 41. Pp. 197-207.
181. Wang W-X., Fisher N. S. Modeling metal bioavailability for marine mussels. Rev. Environ. Contam. Toxicol., 1997. Vol. 151. Pp. 39-65.
182. Wang W-X., Fisher N. S., Luoma S.N. Assimilation of trace elements ingested by the mussel *Mytilus edulis*: effects of algal food abundance // Marine Ecology Progress Series, 1995. Vol. 129. Pp. 165-176.
183. Wang W.X., Rainbow P.C. Comparative Approaches to understand metal bioaccumulation in aquatic animals // Comparative biochemistry and Physiology, 2008. – Part C. – Vol. 148. – Pp. 315-323.
184. Williams Sh.L., Aulenbach D.B., Clesceri N.L. Sources and distribution of trace metals in aquatic environments / Aqueous-Environmental chemistry of metals, Allen J. Rubin, Ann Arbor Science Publishers, Inc. 1974. – Pp. 77-128.
185. Zhou Q., Zhang J., Fu J., Shi J., Jiang G. Biomonitoring: an appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem // Anal. Chim. Acta, 2008. – Vol. 606, № 2. – Pp. 135-150.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Содержание макроионов (в мг/л) в воде озер ВСА в летний период 2011-2014 гг.

Озера	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	n
Васьковское	9,67±1,52 (7,69-11,60)	7,30±8,70 (3,25-31,9)	4,76±0,813 (3,90-6,23)	0,44±0,08 (0,35-0,66)	2,49±0,647 (1,60-3,36)	0,553±0,107 (0,426-	4,76±0,860 (3,65-5,91)	10
Голубичное	11,3±3,33 (7,20-15,86)	8,67±1,95 (5,47-10,8)	2,64±0,52 (1,83-3,09)	0,40±0,11 (0,27-0,54)	2,41±0,780 (1,55-3,37)	1,00±0,197 (0,677-1,21)	7,29±1,89 (4,02-8,81)	6
Японское	11,02±2,68 (7,93-12,57)	4,9±1,6 (3,66-6,74)	3,38±0,25 (3,13-3,62)	0,30±0,03 (0,27-0,32)	2,55±0,684 (1,77-3,06)	0,804±0,185 (0,591-	4,93±1,00 (3,78-5,55)	3
Круглое	8,87±1,28 (7,81-10,74)	42,7±17,7 (23,6-66)	7,50±2,30 (5,67-10,8)	1,06±0,38 (0,81-1,62)	2,10±0,109 (1,99-2,23)	2,61±0,862 (1,87-3,86)	23,19±8,81 (17,8-36,4)	3
Мраморное	12,5±4,85 (6,96-16,0)	1416±672 (671-1977)	231±139 (101-377)	20,6±9,40 (14,4-31,4)	26,1±10,8 (14,4-35,7)	90±49,9 (40,1-140)	784±491 (278-1259)	3
Духовское	17,0±3,67 (12,8-19,7)	601±404 (134-834)	89±61 (19,1-129)	12,8±7,91 (3,70-17,9)	14,4±8,69 (4,39-20,1)	36,3±25,1 (7,35-52,5)	300±202 (67-430)	4
Благодати	56,8±24,1 (15,5-83)	5414±3285 (570-10465)	814±504 (78-1377)	99±99 (13,3-251)	89±76 (12,3-213)	364±224 (34,2-598)	2781±1775 (273-4982)	7

Примечание к табл. 1: Среднее значение плюс-минус стандартное отклонение (минимальное и максимальное значения); n – количество проб.

Таблица 2. Содержание углерода растворенного (C_{POB}) и взвешенного вещества (C_{BOB}) в воде озер ВСА в летний период 2011-2014 гг.

Озера	C_{POB} , мг/л	C_{BOB} , мг/л	C_{BOB} , %	n
Васьковское	3,87±0,55 (3,00-5,10)	0,50±0,20 (0,31-0,80)	16,4±10,9 (6,49-38,3)	10/7/7
Голубичное	6,70±1,19 (5,20-8,20)	1,18±0,82 (0,60-1,76)	41,4±30,8 (19,6-63,2)	6/2/2
Японское	6,57±1,76 (5,50-8,60)	0,91±0,42 (0,61-1,20)	23,5±9,02 (17,1-29,9)	3/2/2
Круглое	2,60±0,71 (2,00-3,40)	1,14±1,24 (0,26-2,01)	61,8±70,5 (11,9-112)	4/2/2
Мраморное	2,47±0,55 (1,90-3,00)	0,31	21,6	3/1/1
Духовское	4,03±0,25 (3,80-4,30)	0,64±0,21 (0,49-0,79)	8,15±2,04 (6,71-9,59)	4/2/2
Благодати	6,64±1,47 (4,10-8,00)	2,18±1,38 (0,92-3,65)	30,0±12,2 (22,5-44,0)	7/3/3

Примечание к табл. 2: Среднее плюс-минус стандартное отклонение (минимальное и максимальное значения); n – количество проб ($C_{POB}/C_{BOB}/C_{BOB}$, %).

Таблица 3. Содержание растворенных металлов в воде озер ВСА (мкг/л) в летний период 2011-2014 гг.

Озера (годы)	Cu	Fe	Ni	Mn	Zn	Cd	Pb	n/ n ₁
Васьковское, ручей (2011)	0,178	137	0,026	11,9	0,58	0,004	0,072	1 1
Васьковское (2011-2014)	0,319±0,125 (0,241-0,647)	26,4±8,90 (14,1-37,1)	0,206±0,183 (0,026-0,570)	3,35±3,51 (0,520-9,75)	1,97±1,30 (0,788-4,44)	0,007±0,003 (0,004-0,012)	0,070±0,051 (0,016-0,154)	10 7
Круглое (2011-2013)	0,136±0,031 (0,091-0,164)	19,6±7,61 (15,3-31,0)	0,112	7,14±12,4 (0,461-25,8)	0,720±0,571 (0,384-1,57)	0,007±0,003 (0,003-0,011)	0,027±0,041 (0,001-0,074)	3 1
Голубичное (2011-2014)	0,155±0,057 (0,091-0,207)	182±184 (34,9-500)	0,174±0,183 (0,008-0,344)	3,33±5,72 (0,376-13,5)	2,04±3,18 (0,335-7,69)	0,003±0,003 (0,001-0,008)	0,064±0,085 (0,002-0,160)	5 4
Японское (2012-2013)	0,263±0,093 (0,183-0,365)	66±43,4 (16,2-92)	0,267±0,427 (0,017-0,760)	1,81±1,17 (0,479-2,67)	0,466±0,263 (0,266-0,764)	0,002±0,001 (0,001-0,002)	0,018±0,004 (0,015-0,021)	3 3
Мраморное (2011-2013)	0,376±0,297 (0,189-0,718)	22,0±6,80 (15,8-29,3)	0,130±0,047 (0,085-0,178)	1,96±1,42 (0,750-3,52)	4,34±5,46 (0,569-10,6)	0,011±0,006 (0,006-0,018)	0,133±0,102 (0,019-0,213)	3 3
Духовское (2011-2013)	0,307±0,165 (0,213-0,553)	65±44,9 (28,6-121)	0,263±0,239 (0,043-0,584)	8,84±13,1 (1,32-28,4)	0,541±0,357 (0,310-1,06)	0,005±0,003 (0,003-0,009)	0,044±0,066 (0,003-0,120)	4 4
Благодати (2011-2014)	0,350±0,137 (0,172-0,522)	103±127 (5,49-266)	0,633±0,258 (0,278-0,883)	17,0±16,7 (0,573-37,1)	1,076±0,830 (0,313-2,43)	0,019±0,028 (0,001-0,068)	0,050±0,053 (0,010-0,110)	5 4

Продолжение таблицы 3

Озера (годы)	Cu	Fe	Ni	Mn	Zn	Cd	Pb	n/ n ₁
Реки ВСА ¹	0,32±0,16	14,7±11,6	<0,1	2,5±2,9	1,54±1,91	0,008±0,006	0,039±0,038	
оз. Пясечно ²	15	60	-	32,5	58,2	1,1	18	
Реки Мира ³	1,48	66	0,80	34	0,6	0,080	0,079	
озера ВЕР ⁴	0,6 (0,2-4,4)	142 (2,8-3300)	0,5 (0,2-4,8)	9,1 (0,3-125)	0,9 (0,2-25,0)	0,05 (<0,05-0,61)	<0,1 (<0,1-1,1)	

Примечание к табл. 3: Среднее значение плюс-минус стандартное отклонение (минимальное и максимальное значения); прочерк – нет данных; n – количество проб (n – количество определений, n₁ – количество определений Ni);
¹Шулькин и др., 2009, ²Radwan et al., 1990 (сумма растворенной и взвешенной формы); ³Gaillardet et al., 2003;
⁴Моисеенко, Гашкина, 2007, Восточно-Европейская равнина, таежный регион.

Таблица 4. Содержание взвешенных металлов в воде озер ВСА в летний период 2011-2014 гг. (мкг/л)

Озера	Cu	Fe	Ni	Mn	Zn	Cd	Pb	n/ n ₁
Васьковское, ручей (2011)	0,007	66	0,059	12,1	0,082	0	0,043	1 1
Васьковское (2011-2014)	0,050±0,046 (0,015-0,166)	114±146 (24,6-445)	0,164±0,150 (0,040-0,388)	7,74±2,41 (4,34-11,2)	0,729±0,681 (0,301-2,30)	0,014±0,027 (0,002-0,093)	0,543±0,190 (0,214-0,820)	11 7
Круглое (2011-2013)	0,045±0,018 (0,019-0,058)	68±34,1 (38,0-98)	0,070±0,051 (0,011-0,101)	4,42±0,788 (3,66-5,18)	0,306±0,116 (0,204-0,433)	0,033±0,055 (0,002-0,116)	0,223±0,235 (0,013-0,559)	4 1
Голубичное (2011-2014)	0,041±0,024 (0,005-0,067)	182±110 (54-310)	0,252±0,477 (0,025-1,494)	7,15±4,77 (1,83-14,9)	0,291±0,177 (0,096-0,571)	0,008±0,006 (0,001-0,015)	0,237±0,181 (0,035-0,598)	9 9
Японское (2012-2013)	0,052±0,030 (0,027-0,095)	174±33,0 (146-210)	0,467±0,513 (0,104-0,830)	11,2±2,06 (9,13-13,3)	0,330±0,162 (0,192-0,530)	0,002±0,002 (0,001-0,004)	0,126±0,094 (0,008-0,238)	3 2
Мраморное (2011-2013)	0,037±0,008 (0,032-0,046)	36,1±8,68 (28,1-45,3)	0,041	3,38±1,32 (2,00-4,64)	0,246±0,012 (0,235-0,259)	0,006±0,007 (0,001-0,014)	0,304±0,414 (0,006-0,776)	3 1
Духовское (2011-2013)	0,072±0,048 (0,033-0,135)	194±116 (49,0-336)	0,206±0,261 (0,041-0,659)	4,18±0,976 (2,67-5,29)	0,665±0,438 (0,146-1,13)	0,013±0,015 (0,003-0,036)	0,379±0,229 (0,057-0,632)	5 5
Благодати (2011-2014)	0,050±0,053 (0,001-0,125)	116±104 (12,1-305)	0,114±0,161 (0,007-0,497)	7,06±7,47 (1,79-26,2)	0,255±0,271 (0,045-0,898)	0,004±0,004 (0,001-0,013)	0,459±0,573 (0,025-1,95)	10 8

Примечание к табл. 4: Среднее значение плюс-минус стандартное отклонение (минимальное и максимальное значения); n – количество проб (n – количество определений, n₁ – количество определений Ni).

Таблица 5. Содержание металлов во взвеси (мкг/г) озер ВСА в летний период 2011-2014 гг.

Озера	Cu	Fe, %	Mn, %	Ni	Zn	Cd	Pb	n/ n ₁
Васьковское (2011-2014)	17,6±7,38 (7,06-33,7)	3,00±1,01 (1,76-4,89)	0,351±0,148 (0,102-0,575)	57±35,4 (19,4-110)	258±128 (161-539)	2,75±2,65 (0,312-7,37)	238±115 (23,5-364)	11 7
Круглое (2011-2013)	20,8±9,1 (10,6-30,0)	3,00±1,05 (2,11-4,49)	0,207±0,038 (0,155-0,239)	35,9±25,8 (6,88-56)	137±24,5 (117-173)	2,91±3,73 (0,741-7,22)	115±135 (5,83-310)	4 3
Голубичное (2011-2014)	21,5±19,7 (8,70-60)	8,92±3,30 (5,78-15,3)	0,317±0,066 (0,224-0,466)	103±155 (7,17-501)	153±77 (63-304)	2,40±1,99 (0,400-5,11)	64,5±32,2 (20,9-117)	9 9
Японское (2012-2013)	15,1±11,2 (6,67-31,7)	4,75±1,32 (3,63-6,42)	0,300±0,043 (0,241-0,344)	151±177 (25,9-277)	94±60 (50-177)	0,591±0,388 (0,222-1,03)	34,5±24,1 (2,06-59)	4 2
Мраморное (2011-2013)	16,2±5,64 (10,6-21,9)	1,55±0,40 (1,13-1,93)	0,156±0,088 (0,065-0,240)	14,3	111±49 (76-167)	2,01±2,19 (0,435-4,52)	100±132 (4,31-250)	3 1
Духовское (2011-2013)	10,4±6,18 (3,61-16,5)	3,14±0,93 (2,24-4,59)	0,084±0,041 (0,055-0,155)	27,9±23,3 (9,18-68)	102±28,7 (61-128)	2,34±3,34 (0,511-7,35)	58±16,2 (32,9-77)	5 5
Благодати (2011-2014)	16,4±10,5 (2,36-32,4)	4,11±2,39 (1,45-7,88)	0,291±0,229 (0,026-0,871)	34,8±40,5 (8,97-129)	101±64 (16,8-187)	0,637±0,409 (0,295-1,49)	66±65 (11,6-231)	10 8
Реки ВСА ¹	25,9-72,0	3,2-5,5	0,06-0,16	26,9-49,1	61,1-225	0,18-1,97	11,1-96,2	
Реки мира ²	98 (74)	5,1*	0,11*	75,8 (61,3)	343 (240)	3,2 (1,1)	89,0 (55,3)	
Кларки ³	57	0,333	0,067	95	80	0,03	20	
Осадочные горные породы ⁴	31	3,54	0,083	37	43	0,8	12	

Примечание к табл. 5: Среднее значение плюс-минус стандартное отклонение (минимальное и максимальное значения); n – количество проб (n – количество определений, n₁ – количество определений Ni); ¹Чудаева, Чудаев, 2011; ²Савенко, 2006, среднее арифметическое (среднее геометрическое); ³Кларки микроэлементов в осадочных породах (Войткевич, 1977); ⁴Григорьев, 2003 (среднее); *Гордеев, Лисицын, 1978.

Таблица 6. Содержание тяжелых металлов (мкг/г) в донных отложениях озер.

Озеро (год)	Фр.	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Cd	Pb	n
Васьковское (2011)	<0,1	17,3±9,61 (10,5-24,1)	26848±4144 (23918-29778)	1259±739 (737-1782)	14,2±2,49 (12,5-16,0)	197±46 (165-229)	0,558±0,199 (0,418-0,699)	155±11,1 (147-163)	2
	1-0,1	2,71±1,17 (1,88-3,54)	14681±5021 (11130-18232)	325±83 (267-384)	7,89±0,41 (7,60-8,18)	64±11,7 (56-73)	0,050±0,057 (0,010-0,090)	38,0±12,2 (29,4-46,7)	
Круглое (2011)	<0,1	20,0	21354	400	18,0	88	0,144	51	1
	1-0,1	4,18	14328	252	10,8	41,9	0,544	23,8	
Голубичное (2011, 2014)	<0,1	2,47±0,82 (1,54-3,09)	17648±12531 (7759-31740)	961±551 (372-1465)	11,15±1,40 (9,90-12,7)	42,4±12,6 (34,4-57)	1,128±0,930 (0,261-2,110)	28,2±3,05 (25,2-31,3)	3
	1-0,1	1,40±0,34 (1,15-1,79)	9815±10795 (2303-22186)	444±431 (119-933)	6,45±0,38 (6,05-6,81)	19,3±3,41 (16,2-22,9)	2,323±3,070 (0,218-5,846)	18,3±3,87 (13,9-20,8)	
Японское (2013)	<0,1	5,89	41655	1138	18,2	95	0,317	22,9	1
	1-0,1	2,20	15507	411	7,84	31,7	0,251	16,6	
Мраморное (2011,2012)	<0,1	7,82±0,43 (7,52-8,12)	13698±3123 (11490-15907)	256±6,61 (252-261)	12,7±1,74 (11,4-13,9)	143±43,3 (112-173)	0,462±0,188 (0,329-0,595)	42,9±6,43 (38,3-47,4)	2
	1-0,1	2,87±2,41 (1,17-4,58)	7861±5352 (4077-11646)	129±47 (96-163)	9,22±2,23 (7,65-10,8)	119±106 (43,9-194)	0,216±0,234 (0,050-0,381)	35,6±18,4 (22,5-48,6)	
Духовское (2011, 2012)	<0,1	6,74±0,54 (6,31-7,60)	21035±3340 (18511-26657)	186±22,2 (157-218)	17,7±1,04 (16,4-19,2)	66±10,9 (54-81)	0,222±0,072 (0,152-0,313)	35,2±4,82 (30,2-41,1)	5
	1-0,1	4,73±1,20 (3,18-6,10)	18767±7318 (12760-29275)	140±41 (73-175)	15,1±1,79 (13,5-17,8)	54±13,2 (33,7-67)	0,170±0,110 (0,070-0,353)	31,1±4,38 (23,9-34,8)	

Продолжение таблицы 6

Озеро (год)	Фр.	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Cd	Pb	n
Благодати (2011)	<0,1	5,66±1,79 (3,52-7,56)	24875±4393 (20078-29778)	631±171 (423-779)	13,41±0,77 (12,6-14,4)	48,3±7,20 (40,9-58)	2,072±3,98 (0,040-8,04)	32,3±2,78 (28,8-34,9)	4
	1-0,1	1,85±0,97 (1,05-3,02)	7211±2202 (4821-9819)	249±56 (176-304)	8,78±1,39 (7,32-9,97)	17,6±3,18 (14,5-21,2)	0,356±0,653 (0,010-1,34)	22,6±1,09 (21,2-23,6)	
TEL (PEL) ¹		18,7 (108)	-	-	-	124(271)	0,7 (4,2)	30,2 (112)	
Горные породы ²		31	35400	830	37	43	0,8	12	

Примечание к табл.6: Среднее значение плюс-минус стандартное отклонение (минимальное и максимальное значения); Фр. – фракция; n – количество проб; ¹Interim..., 1995 – цит. по: Шулькин, 2004 (TEL – уровни металлов в ДО, ниже которых не наблюдается негативных биологических эффектов, PEL – уровни вероятного негативного биологического эффекта); ²Григорьев, 2003 (среднее содержание химических элементов (мкг/г) в осадочных горных породах); прочерк – нет данных.

Таблица 7. Содержание главных ионов (мг/л) и растворенных металлов (мкг/л) в воде озер ВСА летом и в период осеннего перемешивания 2013 г.

Озеро	Дата	НСО ₃ ⁻	Сl ⁻	SO ₄ ²⁻	К ⁺	Са ²⁺	Мg ²⁺	Na ⁺	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni
Васьковское	08.2013	8,30	3,90	3,92	0,433	1,77	0,464	3,65	20,2	1,00	1,43	0,343	0,059	0,007	0,175
	10.2013	12,4	4,56	3,57	0,457	2,98	0,633	4,86	33,8	4,91	2,92	0,292	0,061	0,096	0,206
Голубичное	08.2013	7,20	5,47	2,16	0,322	1,55	0,677	4,02	218	32,3	0,87	0,522	н.о.	0,004	0,631
	10.2013	10,9	7,85	1,60	0,451	1,88	0,937	6,27	120	11,8	3,03	0,289	0,027	0,118	0,634
Японское	08.2013	7,93	6,74	3,13	0,266	1,77	0,591	3,78	95,0	1,56	1,22	0,097	н.о.	0,002	0,320
	10.2013	10,7	4,39	2,79	0,332	2,55	0,747	4,96	135	2,15	18,8	0,084	0,093	0,076	0,110
Круглое	08.2013	8,54	66	10,8	1,62	2,05	3,86	36,4	91,0	2,29	0,76	0,365	н.о.	0,002	0,760
	10.2013	33,1	4240	555	87,0	80,0	255	978	137	2,73	3,54	0,117	0,146	н.о.	0,293
Духовское	08.2013	12,8	134	19,1	3,70	4,39	7,35	67,0	83,0	28,4	1,06	0,553	н.о.	0,009	0,296
	10.2013	73,0	13276	1775	257	233	706	792	6,12	16,9	0,61	0,093	0,040	0,019	0,149
Благодати	08.2013	15,5	570	78,0	13,3	12,3	34,2	273	16,8	25,8	1,57	0,091	н.о.	0,011	0,112
	10.2013	41,6	1390	148	27,4	26,5	70,0	455	18,2	61,0	0,89	0,029	0,018	0,014	0,175

Примечание к табл. 7: н.о. – не обнаружено.

Таблица 8. Содержание металлов во взвеси (мкг/г, % для Fe и Mn) и взвешенных форм (мкг/л) в озерах ВСА летом и в период осеннего перемешивания 2013 г.

Озеро	Дата	Cu		Fe		Ni		Mn		Zn		Cd		Pb	
		мкг/г	мкг/л	%	мкг/г	мкг/г	мкг/л	%	мкг/л	мкг/г	мкг/л	мкг/г	мкг/л	мкг/г	мкг/л
Васьковское	08.2013	17,8	0,040	4,9	110	н.о.	н.о.	0,44	10,0	271	0,610	2,06	0,005	364	0,820
	10.2013	34,1	0,091	11,0	293	84,87	0,227	0,90	24,1	44	0,116	1,41	0,004	39,5	0,106
Голубичное	08.2013	20,5- 22,5	0,065- 0,067	9,3- 10,4	296- 310	111- 501	0,355- 1,49	0,30 -	9,47- 10,2	120- 165	0,384- 0,493	0,682- 0,400	0,001- 0,002	36,0- 51	0,115- 0,151
	10.2013	4,2- 7,9	0,018- 0,023	8,8- 11,1	327- 375	5,68	0,017	0,18 -	6,06- 7,54	75- 115	0,318- 0,339	0,179- 0,269	0,001- 0,001	3,08	0,013
Японское	08.2013	10,6- 31,7	0,043- 0,095	5,2- 6,4	193- 210	277	0,830	0,24 -	9,13- 9,76	97- 177	0,392- 0,530	0,222- 0,313	0,001- 0,001	2,06- 43,0	0,008- 0,129
	10.2013	39,2	0,285	11,2	812	49,8	0,362	0,25	18,1	115	0,839	0,250	0,002	128	0,931
Круглое	08.2013	26,9	0,058	4,5	98	44,9	0,098	0,23	5,02	173	0,375	0,771	0,002	5,83	0,013
	10.2013	12,8	0,045	3,7	128	3,43	0,012	0,13	4,46	109	0,378	0,463	0,002	85	0,297
Духовское	08.2013	3,6- 14,7	0,035- 0,085	3,5- 4,6	267- 336	14,3- 68	0,083- 0,659	0,05 -	4,09- 5,29	116- 121	0,702- 1,13	0,511- 0,574	0,003- 0,006	57- 65	0,375- 0,554
	10.2013	14,7	0,059	2,7	110	10,5	0,042	0,05	1,80	79	0,318	0,391	0,002	18,9	0,076
Благодати	08.2013	24,3- 32,4	0,104- 0,125	6,4- 7,9	273- 305	0,00- 129	0,000- 0,497	0,14 -	5,92- 7,46	87- 135	0,373- 0,523	0,295- 0,379	0,001- 0,001	75- 75	0,291- 0,320
	10.2013	7,1- 44,6	0,042- 0,175	3,4- 3,3	135- 195	5,97- 63	0,035- 0,247	0,09 -	3,59- 6,35	63- 71	0,279- 0,366	0,258- 0,708	0,002- 0,003	51- 54	0,201- 0,315

Примечание к табл. 8: н.о. – не обнаружено.

Таблица 9. Содержание микроэлементов (Fe, Mn – %, остальные - мкг/г) в сестоне озер ВСА в 2014 гг.

Оз.	Размер	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Cd	Pb	n
В	20-100 мкм	91±59 (48,1-159)	32364±3815 (27993-35022)	3291±705 (2626-4030)	129±51 (69-163)	914±315 (605-1233)	2,71±0,233 (2,44-2,85)	242±41,1 (196-276)	3
	>100 мкм	35,7	10459	1885	44,0	308	2,11	239	1
Г	20-100 мкм	31,6±2,56 (29,8-33,4)	31110±6320 (23907-35723)	1651±456 (1140-2015)	14,7±16,0 (0,87-32,2)	286±21,2 (261-301)	1,07±0,209 (0,870-1,29)	73±38,5 (40,0-115)	3
	>100 мкм	348	323602	19745	172	1790	11,3	302	1
Б	20-100 мкм	11,5±5,21 (7,21-21,7)	9804±4893 (4174-15114)	918±57 (855-1018)	17,13±9,20 (8,69-30,1)	137±63 (83-234)	0,178±0,095 (0,112-0,356)	14,3±2,20 (11,2-16,5)	6
	>100 мкм	3,97±2,07 (1,53-6,73)	8632±4071 (4726-14892)	1179±62 (1089-1257)	3,34±1,62 (1,50-5,83)	45,5±12,6 (35,6-65)	0,097±0,049 (0,033-0,177)	14,2±1,41 (11,7-15,3)	6

Примечание к табл. 9: Среднее значение плюс-минус стандартное отклонение (минимальное и максимальное значения); Г – Голубичное, Б – Благодарь, В – Васьковское; Оз. – озеро; n – количество проб.

Таблица 10. Содержание микроэлементов (Fe, Mn – %, остальные – мкг/г) в сестоне озер ВСА в летний период 2011-2014 гг.

Озеро	Разм.	Cu	Fe	Ni	Mn	Zn	Cd	Pb
Васьковское	Мелк.	74,4 24,3-159	2,79 1,46-3,50	99 11,9-163	0,272 0,100-0,403	762 305-1233	2,40 1,44-2,85	264 196-329
	Круп.	19,8 7,55-35,7	1,51 0,59-3,56	18,4 3,46-44,0	0,129 0,100-0,188	391 267-718	4,25 2,11-9,43	182 40,2-333
Японское	Круп.	-	1,16	264	0,094	71	5,71	14,9
Голубичное	Мелк.	20,1 3,91-33,4	2,67 1,19-3,57	15,4 0,87-32,2	0,139 0,049-0,202	185 55-301	0,77 0,27-1,29	52 23,9-115
	Круп.	7,83 4,69-11,0	2,93 1,89-3,96	21,0 7,52-34,4	0,222 0,063-0,382	173 81-265	5,56 0,87-10,2	30,0 21,8-38,1
Круглое	Мелк.	13,8	2,20	24,3	0,068	107	0,43	49,5
	Круп.	-	1,29 1,04-1,54	39,8	0,072 0,061-0,083	83 47,3-119	20,5 7,42-33,5	67,9 28,6-107
Мраморное	Мелк.	51	1,88	-	0,046	247	2,35	201
	Круп.	4,69	0,87	132	0,044	225	9,22	28,9
Духовское	Мелк.	12,2	2,51	15,1	0,030	105	0,58	48,3
	Круп.	15,3	2,80 1,66-3,95	101 11,2-191	0,083 0,075-0,091	278 216-340	12,1 5,22-18,9	73 49,2-96
Благодати	Мелк.	13,8 6,21-30,6	1,75 0,42-3,90	19,5 8,69-37,5	0,107 0,080-0,191	141 83-234	0,18 0,11-0,36	26,7 11,2-77
	Круп.	6,08 1,53-14,3	1,53 0,47-5,41	47,4 1,50-325	0,148 0,109-0,301	93 35,6-374	1,95 0,03-11,9	32,5 11,7-101

Продолжение таблицы 10

Озеро	Разм.	Cu	Fe	Ni	Mn	Zn	Cd	Pb
оз. Колывановское ¹	-	84	0,48	5,2	0,02	109	0,43	5,3
оз. Кривое, Чаячье, Ракиты ¹	-	12-50	0,3-0,64	0,6-10	0,002-0,032	70-137	0,013-0,3	2,7-8,1
оз. Горькое-5 ¹	-	5,1	0,14	2,6	0,002	54	0,32	2,1
оз. Пясечно ²	-	11,3	0,22	-	0,13	822	0,2	6,5

Примечание к табл. 10: Среднее значение плюс-минус стандартное отклонение (минимальное и максимальное значения); Разм. – размер планктона; мелк. – планктон 20-100 мкм, круп. – планктон >100 мкм; прочерк – нет данных; н.о. – не обнаружено; ¹Леонова, 2005 (оз. Колывановское – пресное, предгорная зона; озера Кривое, Чаячье, Ракиты – пресные, лесостепная зона; Горькое-5 – солоноватоводное, лесная зона); ²Radwan et al., 1990 (мезотрофное озеро (рН=7,3), восточная Польша, общий планктон).

Таблица 11. Содержание металлов (мкг/г сух. массы) в высших водных растениях озер ВСА в летний период 2011-2014 гг.

Озера	Вид	Cu	Fe	Ni	Mn	Zn	Cd	Pb	n
Васьковское	Рдесты	11,9±10,1	2990±1271	2,55±0,56	607±488	67±14	0,38±0,22	9,56±15,9	16
Голубичное	Рдесты	8,13±9,79	4970±2167	2,37±0,38	816±378	60±10	0,80±1,47	0,75±0,34	19
Японское	Рдесты	3,78±1,40	4610±4163	2,54±1,10	834±524	32±10	0,27±0,32	2,01±3,41	17
Круглое	Рдесты	6,39±1,90	4695±3614	3,82±0,86	474±230	93±20	1,47±0,42	12,0±14,1	11
Мраморное	Рдесты	3,72±0,71	3318±1445	1,92±0,87	310±166	91±28	0,74±0,25	9,27±13,1	14
Духовское	Рдесты	4,80±1,12	4982±2183	2,80±0,54	911±169	109±111	0,66±0,17	4,69±5,78	18
Благодати	Рдесты	3,16±0,52	6520±5230	2,16±0,48	611±255	20±7,6	0,33±0,06	2,83±2,26	9
Антропоген	Рдесты	6,77±6,18	4011±2317	2,69±0,91	605±373	90±64	0,76±0,45	8,46±12,4	58
	Камыши (л)	2,45±0,30	172±49	1,09±0,55	166±134	14,0±5,80	0,11±0,06	0,13±0,25	12
	Камыши (к)	2,99±0,84	3959±814	4,15±2,55	170±119	25,4±4,11	0,23±0,10	2,47±1,26	13
Фон	Рдесты	5,49±6,72	5144±3702	2,39±0,75	781±422	42±19	0,51±0,99	1,66±2,45	44
	Камыши (л)	2,40±1,61	138±60	1,27±0,70	142±86	14,7±3,63	0,06±0,07	0,07±0,12	12
	Камыши (к)	1,75±1,10	2284±1210	1,84±0,56	155±108	20,8±6,87	0,10±0,10	0,38±0,47	12

Примечание к табл. 11: Среднее значение плюс-минус стандартное отклонение; n – количество проб; л – листья; к – корни.

Таблица 12. Содержание металлов в моллюсках (мкг/г сух. массы) озер ВСА в летний период 2011-2014 гг.

Озера	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Cd	Pb	n
Васьковское* (2011-2014)	4,81±0,71 (3,18-6,33)	5115±3474 (567-13556)	5511±2510 (1150-11099)	3,61±1,41 (0,19-6,60)	411±99 (262-734)	3,51±0,67 (1,94-5,09)	13,3±5,91 (0,08-27,4)	40
Голубичное* (2011-2014)	4,48±0,73 (2,97-5,62)	8149±7265 (644-25632)	4229±2392 (1030-10459)	3,06±1,36 (1,09-6,25)	181±38,2 (123-289)	0,88±0,27 (0,45-1,55)	2,48±2,38 (0,16-7,31)	36
Японское* (2012-2013)	5,38±0,86 (3,67-7,02)	3252±2127 (901-7082)	4435±2840 (1319-8827)	4,01±1,12 (2,09-5,59)	226±62 (143-338)	1,32±0,46 (0,67-2,17)	2,64±2,24 (0,81-7,03)	16
Круглое** (2012-2013)	16,2±2,49 (12,3-20,3)	638±100 (462-764)	21,8±8,38 (13,7-40,6)	1,83±1,00 (0,84-3,97)	137±9,13 (119-152)	13,3±2,66 (9,88-17,6)	1,98±1,00 (0,25-3,40)	9
Духовское** (2012)	13,2±0,88 (12,1-13,7)	283±13,7 (274-299)	12,3±8,26 (6,80-21,8)	1,28±0,12 (1,14-1,35)	119±3,28 (116-122)	1,34±0,07 (1,27-1,42)	0,74±0,36 (0,48-1,00)	3
оз. Тайху ¹	~13	-	-	~0	~25	~0,5	~0,25	
дельта Желтой Реки ²	4,00±1,27	-	22,68 ±4,43	4,38±1,04	70,9±24,7	0,45±0,07	0,14±0,03	
реки Вены, <i>Anodonta sp.</i> ³	0,9-12,7	-	-	-	71-862	0,13-1,30	0,12-21,3	
реки Вены, <i>Unio pictorum</i> ³	2,5-9,2	-	-	-	132-430	0,15-0,90	0,29-4,68	
Васьковское ^{4,**}	6,7-9,1	4300-8200	2600-8100	3,5-20	430-850	4,8-8,5	30-40	
Японское ^{4,**}	5,1-5,3	5400-7500	6500-7000	6,3-6,9	270-310	2,6-2,9	5,1-6,7	

Примечание к табл. 12: Среднее значение плюс-минус стандартное отклонение (минимальное и максимальное значения); ¹Тao et. Al, 2012a (значения приблизительные); ²Cui et al., 2011 (*Macra veneriformis*); ³Gundacker, 2000 (вид); ⁴Богатов, Богатова, 2009; **Kunashiria coptzevi*, ***Corbicula japonica*; n – количество проб; прочерк – нет данных.