

Федеральное агентство научных организаций
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ ИМ. А.П. ВИНОГРАДОВА СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 550.47

№ госрегистрации 0120135164



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН

Член-корреспондент РАН

Щацкий В.С.

19 декабря

2016 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В
ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ
(заключительный)

Номер проекта в ИСГЗ ФАНО 0350-2014-0004


Приоритетное направление СО РАН VIII.69. Динамика и механизмы изменения ландшафтов, климата и биосферы в кайнозое. История четвертичного периода

Программа ФНИ СО РАН VIII.69.1. Факторы, определяющие изменение среды и климата Северной и Центральной Азии в кайнозое

Протокол Ученого совета ИГХ СО РАН
№ 7 от « 21 » декабря 2016 г.

Руководитель проекта


Д.Г.-М.Н.

 19.12.2016 В.И. Гребенщикова
(подпись, дата)

Иркутск, 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, доктор
геолого-минералогических наук

 19.12.2016
подпись, дата

В.И. Гребенщикова (раздел

Ответственные исполнители темы:

кандидат геолого-минералогических
наук

 19.12.2016
подпись, дата


Г.А. Белоголова (раздел 2)

кандидат геолого-минералогических
наук

 19.12.2016
подпись, дата


О.Н. Гордеева (раздел 2)

кандидат геолого-минералогических
наук

 19.12.2016
подпись, дата

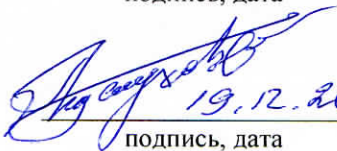
О.А. Склряова (раздел 3.1)

кандидат геолого-минералогических
наук

 19.12.2016
подпись, дата

В.И. Полетаева (раздел 3.2)

кандидат биологических наук

 19.12.2016
подпись, дата

М.В. Пастухов (раздел 3.3)

Реферат

Отчет включает 37 стр., 14 илл., 16 ист.

Ключевые слова: компоненты окружающей среды, геохимия, мониторинг, геохимическая трансформация, природные и техногенные ландшафты, водные экосистемы, биогеохимическая индикация.

Определен минеральный состав пылеаэрозольных выпадений снегового покрова, уровни накопления и формы нахождения химических элементов в снеговой воде и почвах урбанизированных территорий Прибайкалья. Проанализированы особенности распределения химических элементов в зависимости от характера промышленного воздействия.

Получены новые данные о значительном влиянии ризобактерий *Azotobacter* и *Bacillus* на формы нахождения, особенности миграции As, Hg, Pb, Cd, Zn и биофильных элементов в системе «почва–растение» в зоне техногенных объектов Южного Прибайкалья.

Изучена пространственно-временная динамика содержания макро- и микроэлементов в абиотических и биотических компонентах водных экосистем различного генезиса (Восточная Сибирь).

Содержание

Введение	5
Раздел 1 Продолжение многолетних геохимических исследований уровней накопления химических элементов в различных компонентах окружающей среды (снег, почва, поверхностная вода, растения, продукты питания, биосубстраты человека и др.) на опорных мониторинговых станциях Прибайкалья	6
Раздел 2 Трансформация биогеохимических процессов в системе почва – растение в техногенных ландшафтах Южного Прибайкалья	11
Раздел 3 Изучение эволюции водных экосистем Прибайкалья с различной геохимической обстановкой и техногенной нагрузкой	15
Основные результаты проведённого исследования	29
Список использованных источников	33
ПРИЛОЖЕНИЕ. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в соответствии с государственным заданием	35

Введение

С каждым годом возрастающая антропогенная деятельность приводит к необратимым изменениям всех компонентов окружающей среды. Поэтому, все большее значение приобретают фундаментальные научные знания, с помощью которых человечество может прогнозировать направления возможных изменений в окружающей среде, оптимизировать эксплуатацию природных ресурсов и разрабатывать методы, восстанавливающие трансформированную в результате хозяйственной деятельности природную среду.

При проведении мероприятий по рациональному использованию природных ресурсов и охране окружающей среды большое внимание уделяется геохимическим аспектам. В задачи таких исследований входят не только изучение отдельных источников техногенного загрязнения, но и оценка их влияния на качественные и количественные изменения всех сопряженных компонентов окружающей среды (снеговой покров, почва, вода, донные осадки, растения), включая животных и человека. Необходимы также знания по химическому составу окружающей среды областей и регионов, характеризующихся разнообразными специфическими природными геохимическими особенностями. Большое значение приобретает и геохимическое картирование для районирования ландшафтно-геохимических и биогеохимических провинций. Полученные знания о геохимических процессах, происходящих в природных и техногенных ландшафтах, широко используются в разработке новых методических способов восстановления окружающей среды.

В соответствии с заданием по проекту проведено комплексное изучение абиотических и биотических компонентов окружающей среды, которое несомненно позволит решить ряд прикладных региональных задач и приблизиться к решению фундаментальных научных вопросов о стабильном функционировании природных экосистем в современный период.

Раздел 1 Многолетние геохимические исследования уровней накопления химических элементов в различных компонентах окружающей среды (снег, почва, поверхностная вода, растения, продукты питания, биосубстраты человека и др.) на опорных мониторинговых станциях Прибайкалья.

В 2016 г. проведены эколого-геохимические исследования снегового (11 пунктов наблюдения) и почвенного покровов (96 пунктов наблюдения) в агропромышленной зоне г. Зимы (Иркутская область), находящейся под влиянием предприятий химической промышленности (ОАО "Саянскхимпласт"), топливно-энергетического комплекса (Ново-Зиминская ТЭЦ) и сельскохозяйственной деятельности. Содержания большинства тяжелых металлов (Ni, Co, Cr, Cu, Zn, Cd, Pb) в снеговом покрове (снеговая вода, твердый осадок) сопоставимы с уровнем среднего значения их для Байкальского региона. В отношении ртути отмечается широкий диапазон концентраций от 0,001 до 0,51 мкг/дм³ для снеговой воды и от 0,25 до 45 мг/кг для твердого остатка снега. В распределении этого токсиканта на изучаемой территории отмечается приуроченность максимальных концентраций к промышленной зоне, где они образуют четко выраженную аномалию, протяженностью более 4 км, вытянутую по направлению розы ветров (рисунок 1).

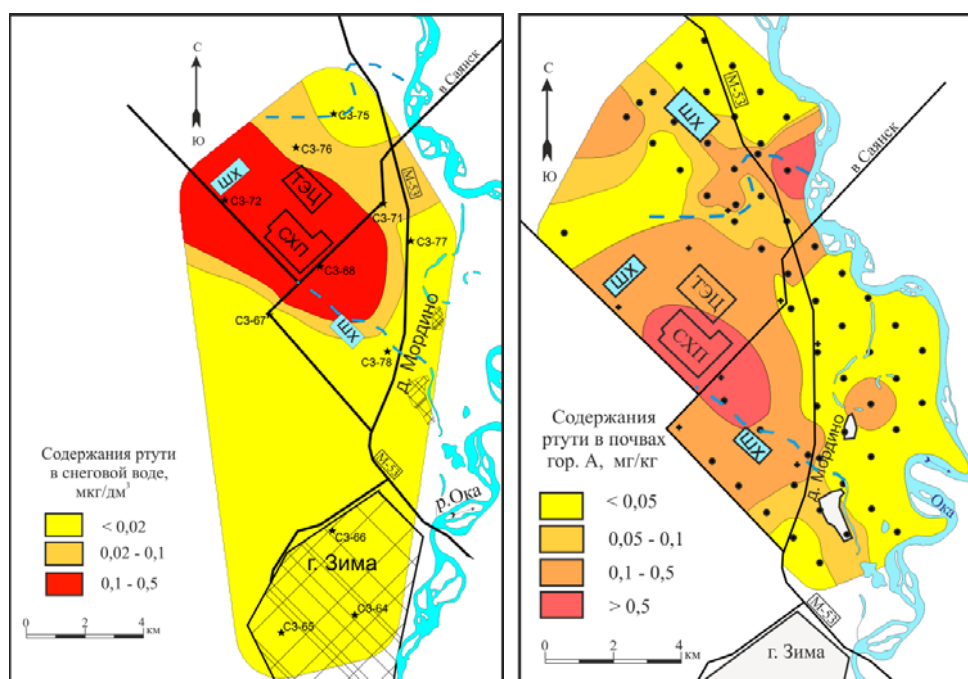


Рисунок 1. Карты-схемы распределения валовых содержаний Hg в снеговом и почвенном покрове района химпредприятия «Саянскхимпласт» (Иркутская область).

СХП - ОАО «Саянскхимпласт», ТЭЦ - теплоэлектростанция, ШХ – шламоотстойник, СЗ-35 - № пробы

Результаты исследований по проекту позволили получить новые данные по распределению и уровню накопления химических элементов в снеговой воде и почвенном покрове урбанизированных территорий Прибайкалья. По полученным данным построены карты распределения ряда элементов в компонентах окружающей среды (рис. 1, 2). Установлено, что химический состав снеговой воды городов Прибайкалья существенно различается по химическому составу и отражает промышленную специфику городов: Иркутск – Zn, Pb, Cu, Ni, Co, V; Усолье-Сибирское – Hg, B, Si, Sc, Mo; Братск – Al, Cd, Ba, Sr, Li, Rb; Шелехов – Be, Al, F, B; Ангарск – S, Al, Sr, B, U; Зима – Hg.

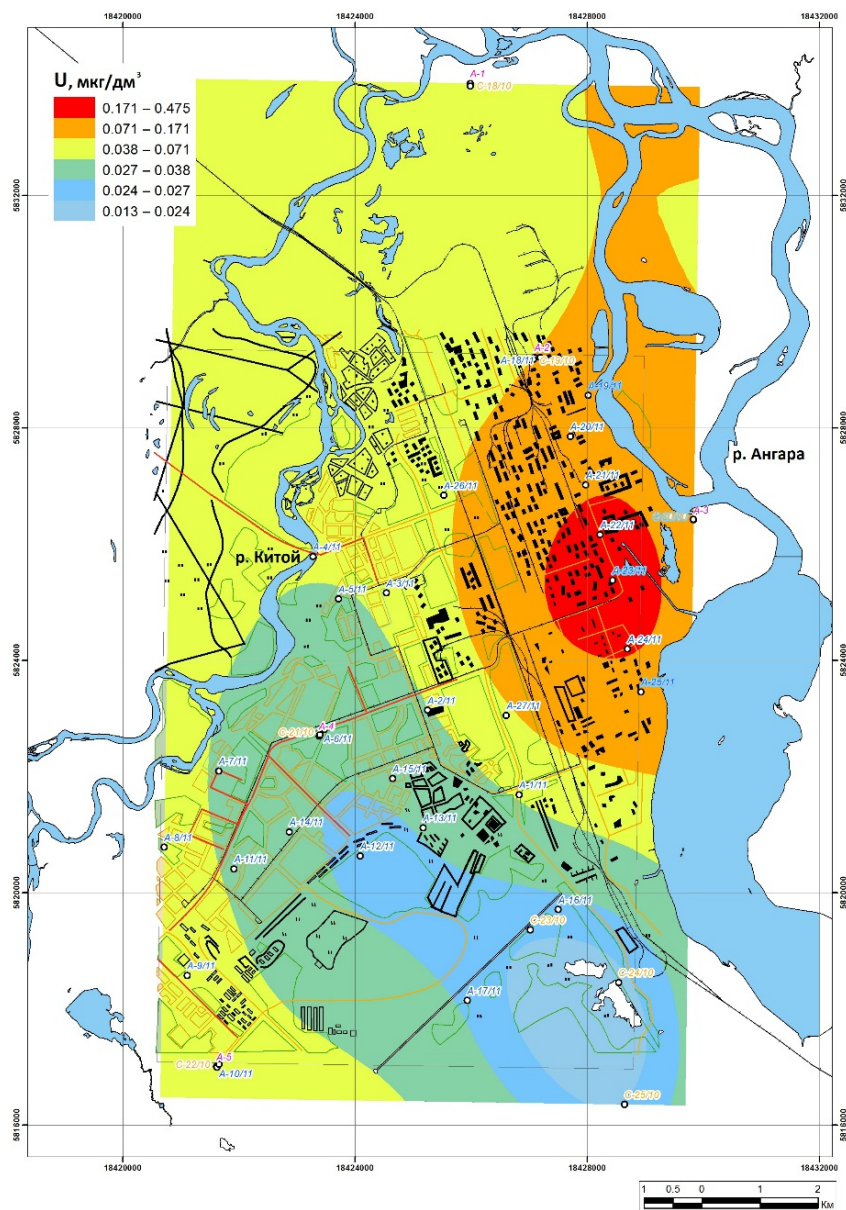


Рисунок 2. Карта-схема распределения U в снеговой воде г. Ангарск.

Для изучения геохимической специфики промышленных выбросов и степени

техногенной нагрузки в районах Иркутско-Шелеховской агломерации исследован минеральный состав твердого осадка снега. Установлена взаимосвязь состава твердых аэрозолей со степенью техногенной нагрузки, которая четко проявлена в изменении соотношения частиц техногенного и природного происхождения: в районе, подверженном техногенной нагрузке соотношение в среднем составляет 65 % к 35 %, в условно фоновом районе – 20% к 80%, соответственно. Частицы техногенного происхождения в твердом осадке снега существенно обогащены Zn, P, B, Ni, As, Be, F, Pb, Al, в то время, как природные частицы преимущественно содержат порообразующие элементы (рис. 3). Природные частицы – это кварц, альбит, доломит, глинистые минералы, техногенные частицы – корунд, муллит, магнетит, анкерит, гиперстен, флюорит, фторид алюминия, гематит. Техногенные аэрозоли, в отличие от природных, представлены более широким спектром минеральных фаз, поступающих в атмосферу из различных промышленных и бытовых источников. В них обнаружены сажистые частицы, карбиды, сульфаты, сульфиды и окислы тяжелых металлов.

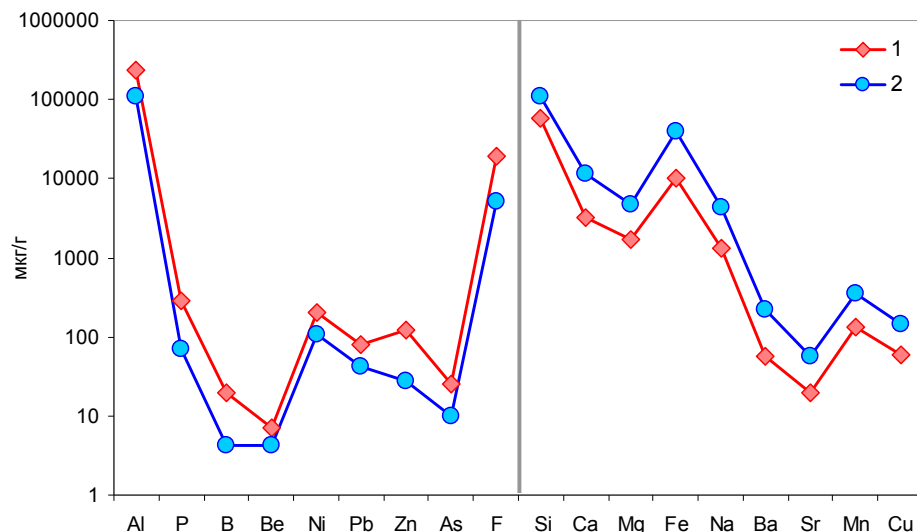


Рисунок 3. Распределение химических элементов в твердом осадке снега Иркутско-Шелеховской агломерации.

1 – район с высокой техногенной нагрузкой; 2 – условно фоновый район.

Изучены формы нахождения Pb, Cu, Zn, Co, Ni, Cr и As в почвах г. Иркутска и его окружения. Установлено большое количество металлоорганических соединений и преобладание в максимально загрязненных городских почвах повышенной подвижности в основном для Zn и As, способных поступать и

накапливаться в биологических объектах.

Для оценки воздействия алюминиевого производства на окружающую среду определена геохимическая специфика природной среды в районе строящегося алюминиевого завода и анодной фабрики (г. Тайшет). Основное внимание уделено распределению Al, Be, F, Li – маркерных элементов будущего производства.

Детально рассмотрено распределение радиоактивных элементов (U, Th) в снеге и почве некоторых городов. Установлено, что в снеговой воде г. Ангарск наибольшие концентрации U, основным источником в атмосферу которого является сжигание углей ТЭЦ, отмечены в промышленной зоне (рис. 2). Определяющим фактором в распределении U в снеговом покрове г. Ангарск является направление розы ветров. Такое распределение характерно не только для урана, но и для других химических элементов.

Повышенные содержания Th, U, а также значения уровня мощности экспозиционной дозы гамма-излучения характеризуют почвенный покров урбанизированной территории г. Иркутска относительно почв из его окружения. В зонах техногенеза выявлены наибольшие содержания Th и U, указывающие на локальные, различные по своей специфике источники привноса радиоэлементов в окружающую среду. Отклонение торий-уранового отношения от нормального (3,5-5), так же как и отношения изотопов $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra} < 1$ в почвах, является индикатором техногенной эмиссии этих радиоэлементов. Городским почвам зон техногенеза свойственна «урановая природа», т.е. преобладание урана по сравнению с торием. «Ториевая природа» характерна для антропогенно измененных почв сельскохозяйственного назначения, что возможно связано с применением органических удобрений. Максимальное количество радионуклидов аккумулируется в гумусовом горизонте почвы на глубине 0-5 см, исключая верхний дерновый слой (рис. 4).

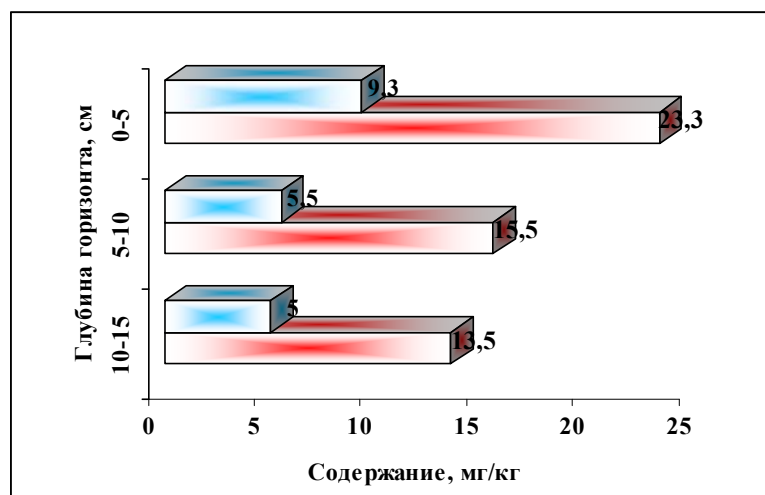


Рисунок 4. Характер распределения Th (■) и U (■) в почвенном профиле в Иркутске-II, возле взлетной полосы авиазавода "Иркут". Значения рядом с колонками на рисунке обозначают содержания Th и U – средние значения в выборке.

В г. Черемхово по концентрации U и Th в почвах рассчитана техногенная нагрузка (г/км^2) за зимний период года: со снеговой водой на поверхность поступает 0,10-0,18 тория и 0,16-0,47 урана. На два порядка и более металлы поступают на поверхность с твердой фазой снега (г/км^2): 91-437 тория и 45-131 урана. Основной вклад в загрязнение почв г. Черемхово данными металлами вносят твердые продукты сжигания каменного угля. Установлен высокий положительный коэффициент корреляции U и Th с Hg (0,7), что свидетельствует об общем источнике их поступления. Повышенные содержания Th имеют более широкий ареал распространения в почвах, что обусловлено не только его поступлением из антропогенных источников, но также и влиянием коренных пород (геохимическими особенностями региона). В настоящее время загрязнение почв ураном и торием мало отражается на таком показателе, как Th/U-отношение. Нарушение этого отношения отмечается лишь на отдельных локальных участках.

Раздел 2 Трансформация биогеохимических процессов в системе почва – растение в техногенных ландшафтах Южного Прибайкалья

Исследование основано на изучении форм нахождения химических элементов в ризосферной части почвы: в легкообменной, сорбированной, органической фракции, в форме гидроксидов железа, комплексных органических соединений тяжелых металлов с фульвокислотами, гуминовыми кислотами и вытяжке этилендиаминтетраацетата натрия ЭДТА, которая характеризует хелатные соединения. Изучение влияния ризосферных бактерий на поведение химических элементов в системе «почва – растение» основано на проведении экспериментов по выращиванию культурных растений. Для этого использовали техногенные почвы с различной степенью загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком, которые инокулировали ризосферными бактериями *Azotobacter* и *Bacills*. Выращивание растений проводили в условиях фитотрона.

Изучены формы соединений и особенности миграции As, Hg, Pb, Cd, Zn и некоторых биофильных элементов в системе «почва ризосферы – растение» в зоне влияния техногенных объектов.

Установлены высокие значения коэффициентов корреляции между содержанием мышьяка в растениях и концентрацией его в наиболее подвижных фракциях почвы легкообменной и карбонатной и максимально высокие значения коэффициентов биологического накопления Кб, рассчитанные относительно содержания As в легкообменной и карбонатной фракциях. Это также указывало на значительное влияние подвижных форм мышьяка на его аккумуляцию в растениях.

Максимальное накопление тяжелых металлов и мышьяка в ризосферной части почвы наблюдалось в хелатных фракциях, за исключением ртути. Это видно на примере As (рис. 5). Результаты модельного эксперимента указывают на способность ризосферных бактерий связывать As и тяжелые металлы в ризосфере техногенных максимально загрязненных почв, уменьшая поступление их в растения. Таким барьером могут являться низкомолекулярные органические их соединения в виде хелатных форм, которые могут накапливаться на клетках почвенных бактерий, создавая барьер для поступления их в растения. Установлена также зависимость аккумуляции тяжелых металлов и As в растениях от pH почв.

Результаты этого эксперимента опубликованы в [1].

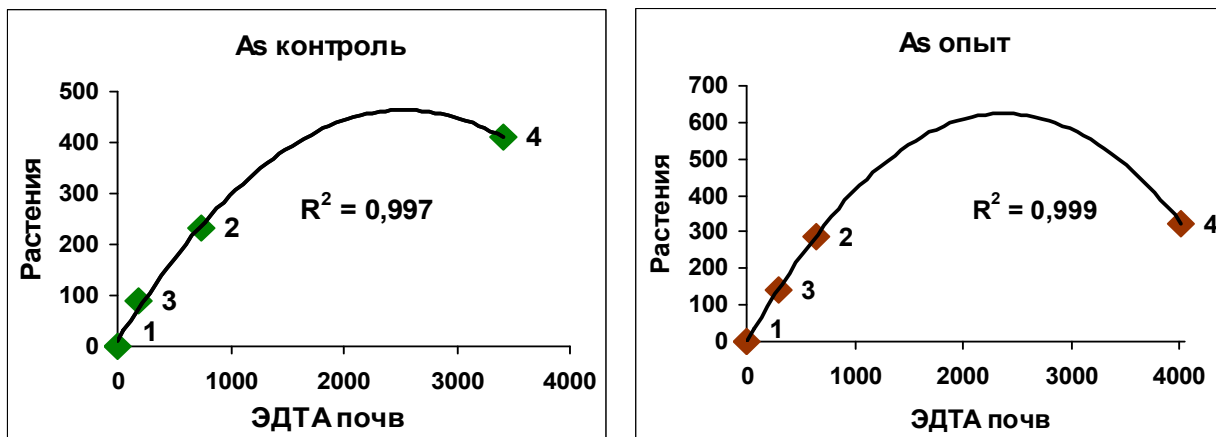


Рисунок 5. Зависимость среднего содержания As (мг/кг сухого вещества) в растениях от его содержания в легкообменной и карбонатной фракциях (мг/кг) почвы ризосферы
Участки: 1 – условно фоновый 15 км; 2 – в 500 м; 3 – в 100 м; 4 – в 10 м от источника загрязнения.

Несмотря на то, что Pb в почве обладает слабой миграционной подвижностью, для этого элемента прослеживается закономерность, подобная As (рис. 6).

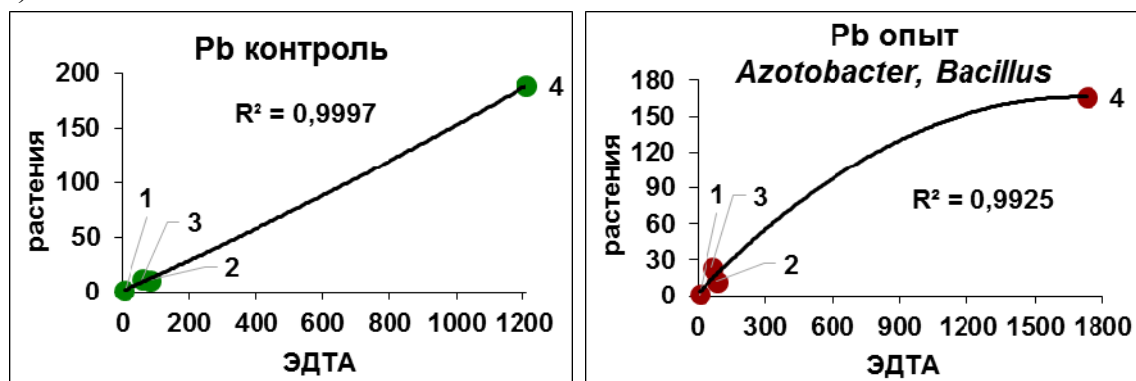


Рисунок 6. Зависимость среднего содержания Pb (мг/кг сухого вещества) в растениях от его содержания в вытяжке ЭДТА ризосферной части почв (мг/кг), в контрольной почве и в почве опыта с ризобактериями. Участки: 1 – условно фоновый 15 км; 2 – 500; 3 – 100; 4 – 10 м от источника загрязнения.

Детально изучены связи тяжелых металлов и As с органическим веществом. Увеличение содержаний ртути установлено в слабо подвижных гуминовых кислотах, что указывает на ее иммобилизацию в органических комплексах почв, а мышьяк в основном связан с наиболее подвижными формами фульвокислот. Свинец в почве обычно связан со стабильными гуминовыми кислотами. В нашем эксперименте свинец ассоциировал с фульвокислотами, которые обладают большей подвижностью. Этот элемент накапливался в повышенных концентрациях в хелатных соединениях, в которых он мог сорбироваться на

ризосферных бактериях, этим объясняется снижение концентрации Pb в растениях и увеличение его концентрации в хелатной форме при внесении в почву ризосферных бактерий *Azotobacter* и *Bacillus* (рис. 6). Такая же закономерность установлена для цинка и кадмия, близких по своим химическим свойствам. В отличие от других элементов для кадмия наблюдалась повышенная мобильность, что подтверждается наличием максимально высокой корреляционной зависимостью между легкообменными формами кадмия в почве и растениях. В результате ризобактерии могли инициировать поступление Cd в растения. Известно, что кадмий способен образовывать большое множество хелатных соединений и может находиться в наиболее токсичной метилированной форме, хорошо доступной для растений.

Исследование 2016 г. проведено на основе изучения постадийных вытяжек и одноактной вытяжки ЭДТА из почв с различной степенью техногенного загрязнения для биотических элементов: K, P, Ca, Mg, S, Si и закономерности аккумуляции их в культурных растениях. Установлено, что большинство биофильных элементов переходят в легкообменные фракции почв, которые способны поступать в растения, но максимально они накапливаются в хелатных соединениях вытяжки ЭДТА. Особенно интенсивно эти процессы усиливаются под влиянием ризосферных бактерий, внесенных в почву. На рисунке 7 это показано на примере P и Si.

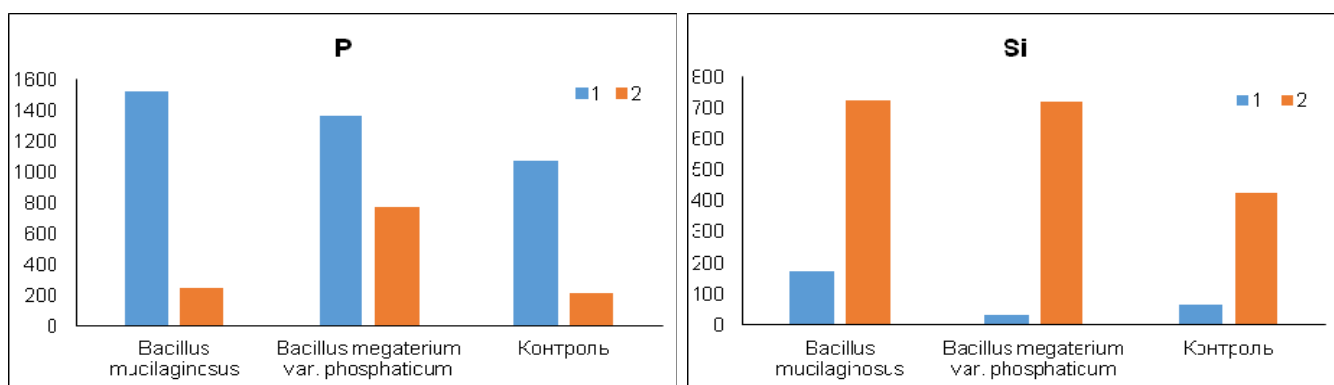


Рисунок 7. Распределение содержания P и Si (мг/кг) в ЭДТА ризосферной части почвы с почвенными бактериями и в исходной контрольной почве без бактерий при выращивании овса.

1 – культурная почва, 2 – техногенная почва

Для калия установлена высокая отрицательная корреляционная зависимость с

тяжелыми металлами в растениях. Значимая отрицательная корреляционная связь для калия с Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Tl, Pb, Th, U (- 0.88) – (- 0.7) с вероятностью $p < 0.001$ прослеживается в выборке для 50 растений. Данная закономерность может служить критерием, указывающим на токсический стресс в растениях, который сопровождается значительным снижением в них содержания калия при высоких концентрациях тяжелых металлов. Для фосфора эта закономерность выражена слабее, а для Ca, Mg практически отсутствует.

В техногенных экосистемах, в отличие от природных, происходит нарушение биогеохимических циклов биофильных элементов за счет накопления ксенобиотиков в растениях, что инициирует уменьшение аккумуляции необходимых для жизнедеятельности растений биофильных элементов питания в них. В эксперименте содержание калия и фосфора, являющихся основными элементами питания для растений, резко снижается в растениях техногенных зон, при увеличении в них тяжелых металлов. При этом установлено положительное влияние ризосферных бактерий *Bacillus mucilaginosus* и *Bacillus megaterium var. phosphaticum* на аккумуляцию в растениях биофильных элементов. Исследования впервые показали положительное влияние ризобактерий на метаболические процессы в растениях, способных активизировать транспортную систему клеток. На это указывает закономерное увеличение значений K/Na в растениях, выращенных на почвах, инокулированных ризосферными бактериями.

Раздел 3 Изучение эволюции водных экосистем Прибайкалья с различной геохимической обстановкой и техногенной нагрузкой.

Изучение пространственно-временной динамики содержания макро- и микроэлементов в абиотических и биотических компонентах водных экосистем различного генезиса (Восточная Сибирь)

3.1 Особенности накопления микроэлементов и основные тренды геохимической эволюции малых озер Забайкалья и Приольхонья

На основании режимных наблюдений за составом воды озер и источников, а также физико-химического моделирования, выявлены особенности эволюции озерных вод Западного Прибайкалья.

Методом термодинамического моделирования равновесий в системе вода-порода-органические кислоты для озер Приольхонья установлено влияние последних на перераспределение Ca и Mg между раствором и твердой фазой. В то же время количественно продемонстрировано, что на вариации отношений Mg/Ca в растворе и твердой фазе значимо влияют процессы испарительного концентрирования с пересыщением растворов по Mg и/или изменение содержания CO₂, связанные с изменением климата и функционированием озер [2].

Режимные наблюдения за составом воды озер и источников на протяжении 15 лет позволили оценить адекватность построенной ранее физико-химической модели [3] эволюции малых озер в условиях холодного климата. Модель описывает существование озерной системы в идеальных условиях – стабильную обстановку осадконакопления. В процессе моделирования нами рассмотрены также случаи нарушения водно-солевого баланса системы: испарение превышает питание озер и прекращение подземного питания (настоящее время).

Результаты расчетов динамики изменения компонентного состава озера Холбо-Нур при отсутствии входящего подземного потока отражены на рисунке 8.А, где отчетливо виден рост содержания ионов Cl⁻ и Na⁺. На рисунке 8.Б – показатели результатов режимных наблюдений за составом воды озера с 2000 г. по 2014 г.

В 2016 г. проведено комплексное исследование Еравнинско-Гусиноозерской системы озер (Восточное Прибайкалье), в пределах которой выделяются четыре

группы озер - Еравнинская, Хоринско-Удинская, Гусиноозерская и Джидинская (рис. 9).

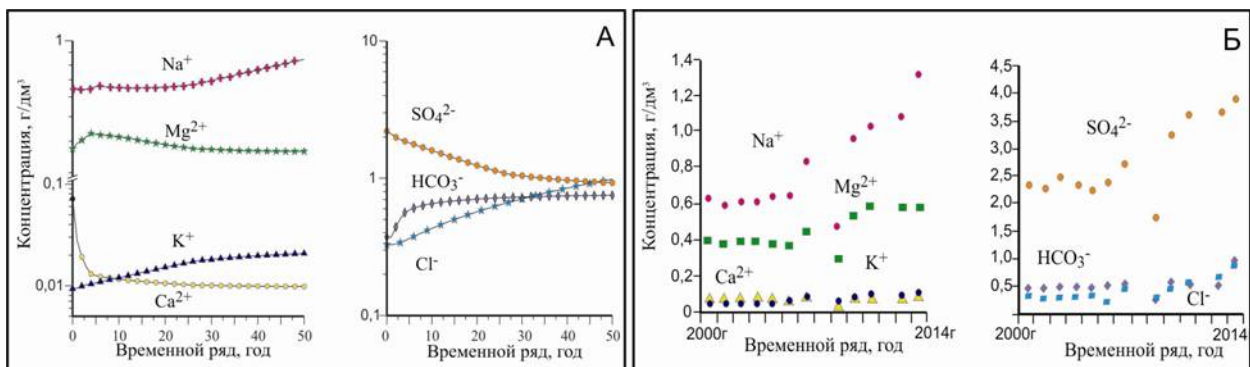


Рисунок 8. А-результаты расчетов компонентного состава озера Холбо-Нур в отсутствии подземных водных потоков; Б- результаты режимных наблюдений.

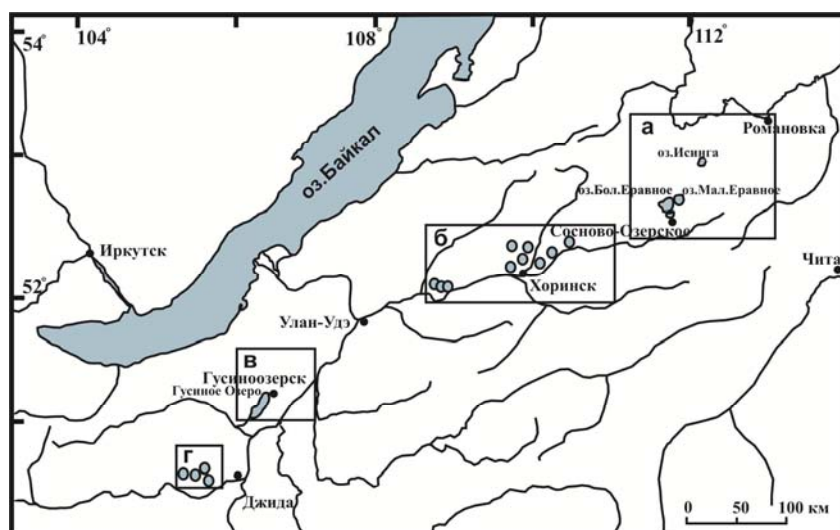


Рисунок 9. Схема распространения озер и источников Еравнинско-Гусиноозерской системы малых озер. Группы: Еравнинская (а), Хоринско-Удинская (б), Гусиноозерская (в) и Джидинская (г).

Озера группируются в системы в виде цепочек, имеющих С-З, реже С-В простирание и, несмотря на компактное расположение внутри каждой группы, имеют значительные различия в составе растворенных веществ. Первая группа - это в основном пресные, щелочные озера с HCO₃-Ca Na типом вод, обогащенных U, REE, V. Вторая группа озер с SO₄-Ca Na типом вод и высоким содержанием W, Br, Mn, REE, Fe, As. Третья группа HCO₃ SO₄ - CaNa типа вод, обогащенных W, As, Th, REE. В четвертой группе по мере увеличения солености вод тип воды меняется от HCO₃-Na до SO₄-Na, концентрируются в озерах микроэлементы Br, W, Li, Th, Ba и B (рис.10).

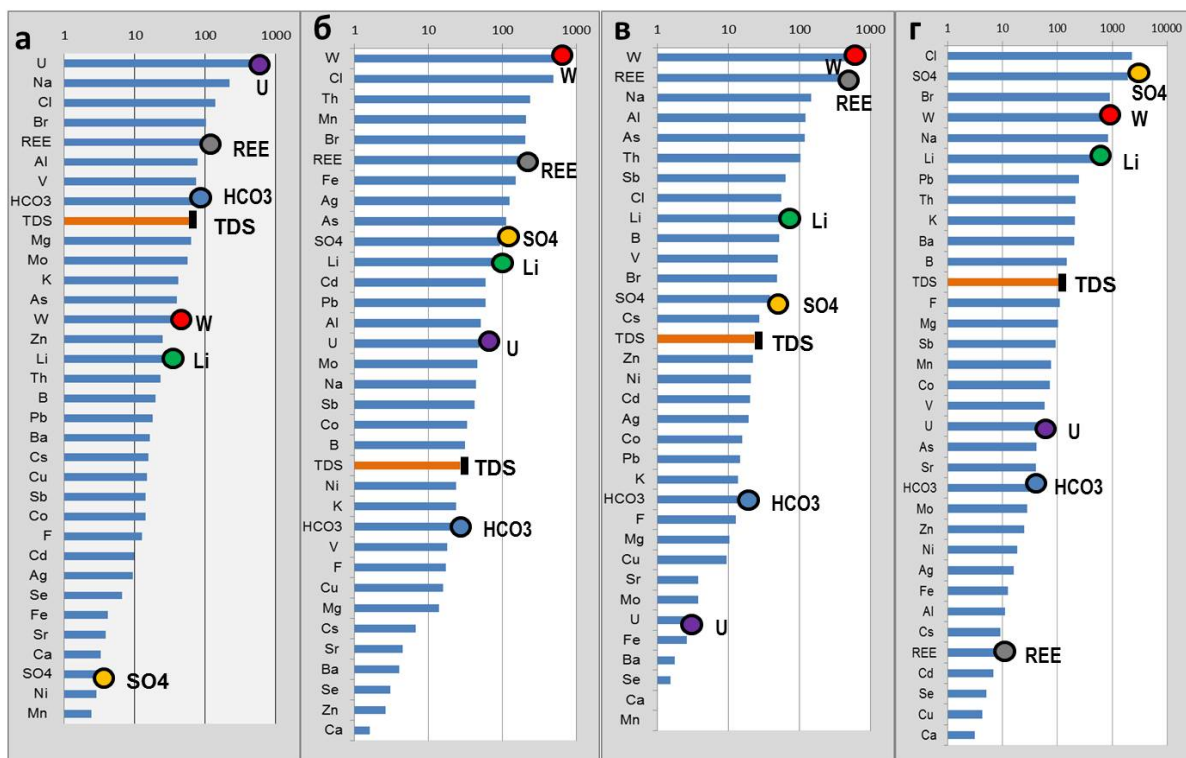


Рисунок 10. Коэффициенты концентрирования макро- и микрокомпонентов в воде озер Еравнинско-Гусиноозерской системы.

В результате выполненных в рамках проекта комплексных исследований макро- и микрокомпонентов воды озер и родников, а также донных осадков малых озер Прибайкалья и обобщения имеющегося у авторов материала за период 2000-2016 гг. получена детальная летопись климата голоцена (последние 8000 лет) Западного Прибайкалья. Полученные сведения позволили воссоздать сложную историю эволюции изученных водных бассейнов, определяемую климатом региона от начала атлантического периода до современности и построить физико-химическую модель, описывающую преобразование вещества в небольших водоемах в условиях холодного климата [4].

Для осадочного разреза оз. Большое Алгинское (Баргузинская впадина) получена новая летопись климата голоцена Западного Забайкалья за последние 4900 лет. Сопоставление карбонатной записи с данными литологического анализа, результатами определения стабильных изотопов ^{18}O и ^{13}C и распределением некоторых геохимических индикаторов климатических изменений позволило воссоздать сложную историю эволюции озера, определяемую климатом региона от конца атлантического периода до современности [5, 6].

В результате выполненных комплексных исследований донных осадков малого бессточного солёного озера Киран получены новые данные об изменении климата Западного Забайкалья в среднем-позднем голоцене [7]. Выделено 4 стадии в его развитии. Установлено, что озеро на протяжении всего рассматриваемого периода было мелководным, имели место перерывы в осадконакоплении. Об улучшении условий в водоеме свидетельствует поведение тяжелых изотопов ^{18}O и ^{13}C , Sr/Ca и Sr/Rb отношений. Наши исследования показали, что в целом на протяжении среднего и позднего голоцена климат юга Бурятии отличался высокой аридностью. Наблюдались его флуктуации в сторону увлажнения, в частности, в середине атлантического периода (время образования оз. Киран) и в последние десятилетия, вплоть до современности.

Изучены особенности минералообразования в современных (Восточное Прибайкалье) и палеотермальных (Западное Прибайкалье) источников. В травертинах Могойского источника (Баунтовская система озер) обнаружен редкий минерал когаркоит, который ранее был зафиксирован только в щелочных магматических породах [8]. Когаркоит – редкий минерал с химической формулой $\text{Na}_3\text{SO}_4\text{F}$, кристаллизующийся в моноклинной сингонии, в породах присутствует в виде таблитчатых и псевдоромбоэдрических кристаллов и их агрегатов. Находка когаркоита в отложениях термального Могойского источника является вторым, после Л.Н. Когарко, документированным фактом обнаружения минерала на территории России. Важно подчеркнуть, что описанный нами когаркоит имеет генезис и минеральную ассоциацию, отличные от когаркоита из нефелиновых сиенитов Ловозерского массива. Данная находка расширяет наши представления о составе новообразованных минеральных фаз, связанных с термальными источниками Забайкалья.

В Западном Прибайкалье выявлены и изучены палеогейзериты – уникальные объекты, изучение которых позволяет получить информацию о характере проявления гидротермальных процессов далекого прошлого [9]. К настоящему времени в регионе обнаружено более 100 выходов гейзеритов, которые по химическому составу относятся к двум группам – железисто-кремнеземистым и

карбонатно-кремнеземистым. Исходными для образования гейзеритов послужили насыщенные кремнеземом и обогащенные углекислым газом и углеводородами, а также некоторыми рудными компонентами (Fe, Mn, Cr, Sb, As и Y) водные растворы, температура которых была не ниже 400°C. Высокое содержание в гейзеритах метана и присутствие в них битумов подтверждает представление о том, что графит в этих породах образовался в результате пиролиза углеводородов.

Сделана экспертная оценка достоверных интервалов базовых уровней (БУ) 58 элементов в водной массе озера Байкал. Выделено 4 группы элементов с различным типом статистического распределения по толще байкальской воды. Сравнение принятых нами оценок БУ элементов в Байкале с фоновым содержанием химических элементов в незагрязненных пресных поверхностных водах планеты свидетельствует о принадлежности Байкала к наиболее чистым водоемам биосферы [10].

Рассмотрено влияния подземных термальных вод и впервые выявленного в Байкальской рифтовой зоне холодного кислого источника на состав вод Северного Байкала (рис. 11) [11].

Общей особенностью гидротерм является малая минерализация от 0,25 до 0,51 г/л, высокие концентрации кремния (45-104 мг/л), высокие концентрации SO₄, Cl, F и Na, превышающие на 1,5-2 порядка содержание соответствующих компонентов в байкальской воде. Агрессивная среда растворов, определяемая высокими температурами и щелочной средой, приводит к интенсивному выщелачиванию Li, Rb, Cs, Al, Fe, Zn, Ge, As, Mo, W из вмещающих пород и насыщению ими терм. Холодный кислый источник характеризуется значительными концентрациями Al, Mn, Co, Ni, Cu, Y, REE, содержание которых на 3-4 порядка выше, чем в байкальской воде. Несмотря на значительное превышение в холодном кислом и термальных источниках ряда вышеотмеченных элементов по отношению к байкальской воде, их влияние на состав воды Байкала весьма незначительно, но можно прогнозировать возникновение локальных аномалий некоторых элементов в донных осадках Байкала.

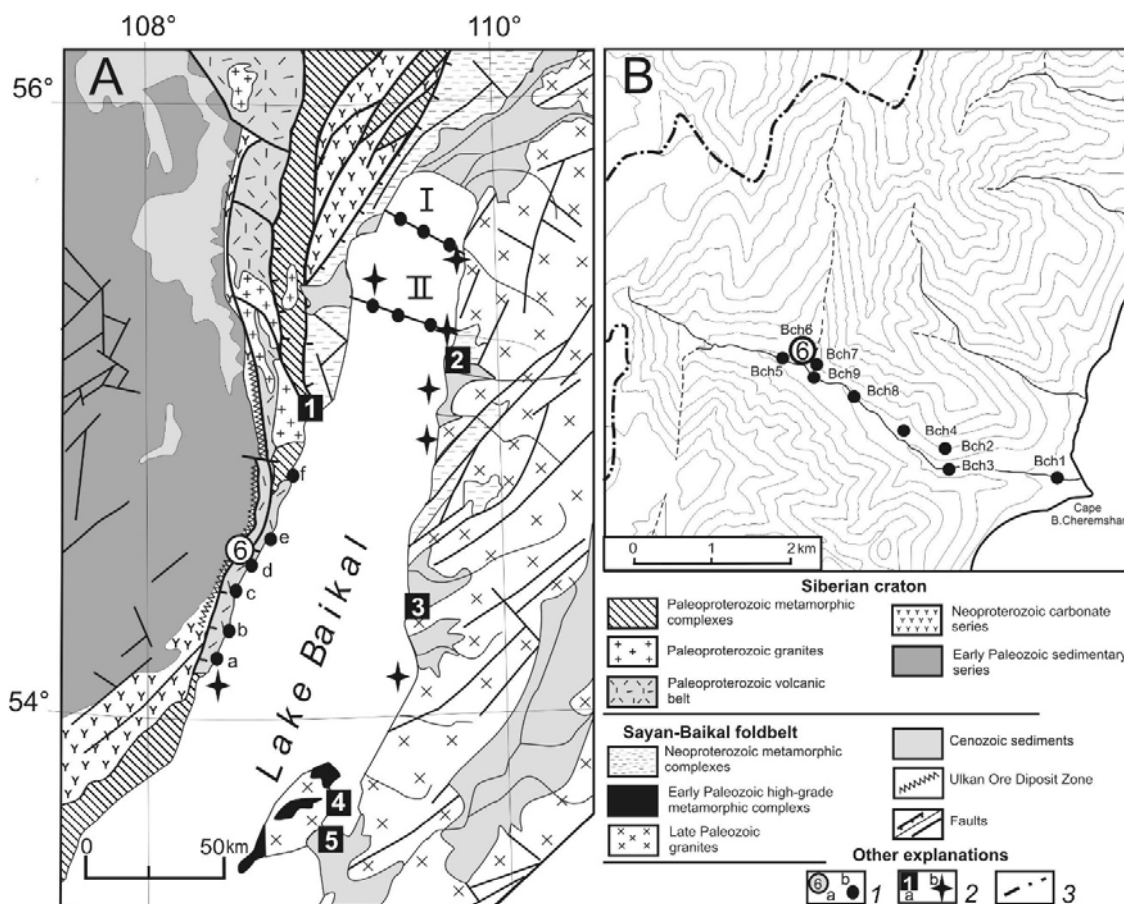


Рисунок 11. Схематическая геологическая карта Северного Прибайкалья (А) и схема опробования реки Большая Черемшанная (В).

1 – холодные воды: а – кислый источник, б – реки; 2 – горячие источники: а – выходы у береговой линии озера, б – субаквальная разгрузка.

3.2 Изучение природных и техногенных источников поступления, накопления и миграции химических элементов в Ангарском каскаде ГЭС

Многолетние систематические исследования химического состава водных экосистем Прибайкалья позволили изучить особенности и выявить закономерности пространственного распределения, накопления и преобразования форм нахождения макро- и микроэлементов в р. Ангаре и ее водохранилищах. Для выявления факторов, влияющих на формирование химического состава водных экосистем были выделены и детально исследованы районы с различной техногенной нагрузкой.

Источники техногенного поступления элементов и их влияние на водоемы рассмотрены на примере сточных вод Усольской промзоны, поступающих в Братское водохранилище. Для этого в **2016 г.** изучены гидрохимический состав и протяженность потоков рассеяния производственных стоков, с помощью физико-

химической модели определены формы нахождения элементов и их трансформация (рис. 12). Установлено, что более минерализованные сточные воды отличаются от маломинерализованных природных вод формами существования элементов в растворе. Это выражается в преобладании в стоках комплексных соединений элементов с ионами Cl^- , Br^- и F^- , концентрации которых в стоках повышены. При смешении и разбавлении сточных вод происходит резкое уменьшение концентраций токсикантов и перераспределение их форм, наиболее высокие концентрации приходится на гидроксиды и простые катионы. Распределение и соотношение форм элементов в воде в 1,5 и 5 км ниже по течению от выпусков Усольской промзоны близки между собой, но не сравниваются с фоновыми.

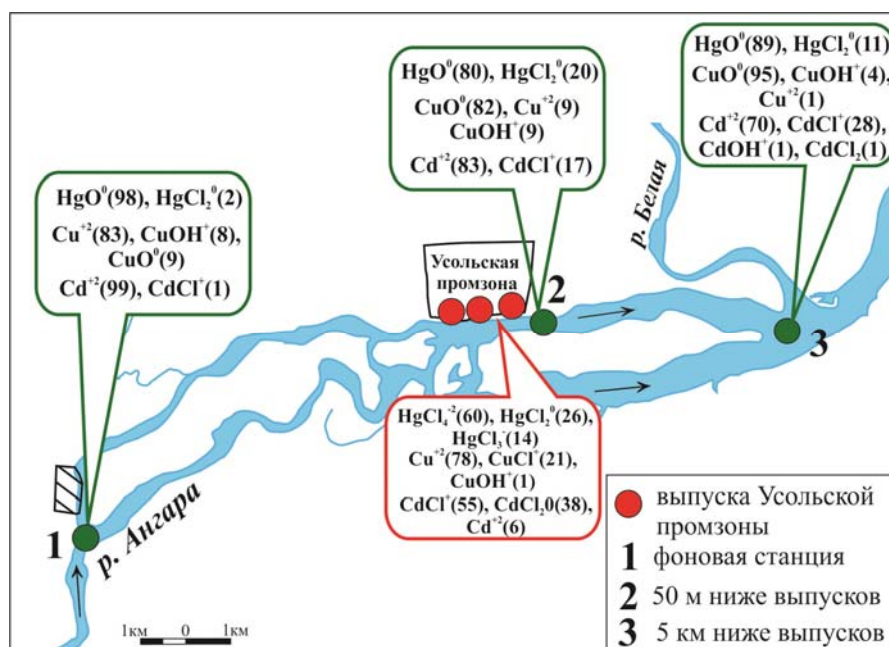


Рисунок 12. Распределение элементов по основным химическим формам в р. Ангаре и сточных водах Усольской промзоны.

Техногенная нагрузка на Усть-Илимское водохранилище определена двумя источниками: промышленная зона г. Братска и поступление со сточными водами загрязняющих веществ в Вихоревский залив (рис. 13). На примере распределения концентраций Fe, Al, Mn и As в воде Вихоревского залива и прилегающей русловой части определена роль водных потоков, под воздействием которых происходит перераспределение этих элементов в водной среде. Установлено, что наиболее мощным фактором самоочищения водохранилища является разбавление загрязненных вод большим объемом метаморфизованных в вышележащих

водохранилищах байкальских вод.

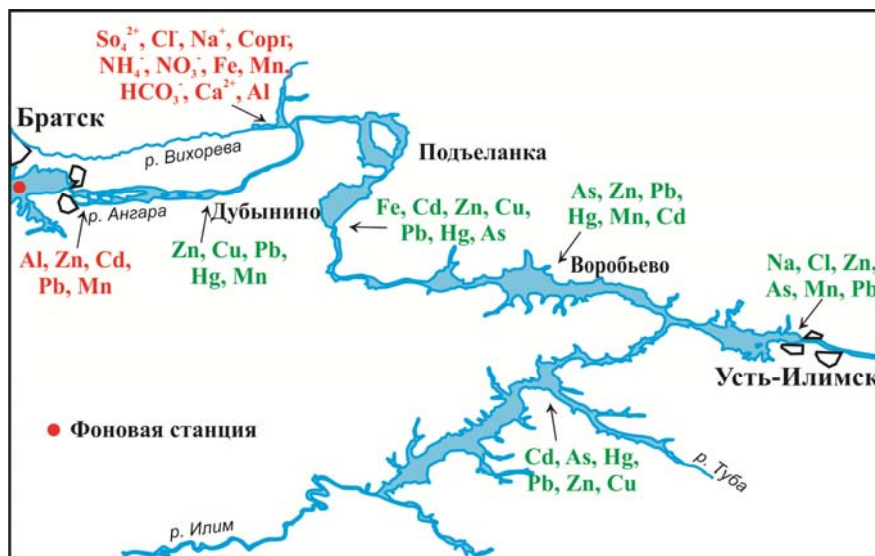


Рисунок 13. Элементы природного (зеленый цвет) и техногенного (красный цвет) генезиса в экосистеме Усть-Илимского водохранилища

Изучение распределения и взаимосвязи микро- и макроэлементов в воде Усть-Илимского водохранилища и сравнение полученных результатов с материалами площадной гидрогеохимической съемки [12] позволили выделить природные источники поступления химических элементов (Cd, Zn, Pb и As). К ним относятся зоны разрывных нарушений (участок между Шаманским и Воробьевским расширением), очаговый вид разгрузки подземных вод (д. Дубынино, устье зал. Туба) и площадь проявления гидрогеохимического купола (устье Илимской части – плотина Усть-Илимской ГЭС).

Полученные результаты уровней накопления элементов в фито- и зоопланктоне, являющихся надежными биогеохимическими индикаторами состояния водной среды, подтверждают полученный в результате гидрохимических исследований вывод о природных и техногенных источниках поступления элементов в экосистему Усть-Илимского водохранилища (рис. 13). Наибольшая ассоциация микроэлементов с повышенными концентрациями определена в планктоне района Вихоревского залива, д. Дубынино, Воробьевского расширения, устья Илимской части и плотины Усть-Илимской ГЭС. Установлено, что планктон Вихоревского залива обогащен элементами техногенного генезиса S, Na, Fe, Ca, в то время как для планктона участков с природным поступлением

элементов характерно повышение концентраций Cd, Zn, Pb и As.

Для оценки факторов, оказывающих непосредственное влияние на накопление и перераспределение тяжелых металлов и их биогеохимические циклы в системе вода–донные отложения проведено изучение миграционных форм основных элементов водовмещающих пород (Al, Fe, Mn). Исследованы район максимального загрязнения Братского водохранилища (г.г. Усолье-Сибирское, Свирск) и районы вне явных источников загрязнения (приток р. Ангары – р. Унга, междуречье р. Осы и р. Унга и район д. Усть-Уда). Определено, что Fe, Al и Mn переносятся в водной массе в виде взвешенных частиц собственных гидроксидов, мигрирующих либо в форме коллоидов, либо в виде продуктов их коагуляции. При предпочтительно грубодисперсной форме переноса соотношение ее меняется. Увеличение растворенной формы для Fe, Mn и Al в воде водохранилища наблюдается по мере удаления от техногенных источников. Так, на глубине 44 м в районе д. Усть-Уда превалирует растворенная форма железа, а грубодисперсная форма отсутствует. Присутствие железа в форме Fe^{2+} указывает на дополнительный природный источник его поступления в водные массы, вероятно связанный с подтоком подземных вод по трещинам в бортах долины водохранилища.

Методом последовательного экстрагирования в донных отложениях и затопленных почвах впервые определены формы нахождения Fe, Al, Mn в районе основного седиментационного барьера Братского водохранилища. Установлено, что большая часть этих элементов находится в форме труднорастворимых силикатов. Из подвижных форм марганец в большей мере присутствует в легкообменной фракции при подчиненном значении фракции легкоразрушаемых силикатов, железо – во фракции легкоразрушаемых силикатов.

Количественное соотношение форм элементов различно по глубине осадка: содержание марганца в легкообменной фракции уменьшается и увеличивается во фракции легкоразрушаемых силикатов, обратная зависимость наблюдается для железа. По подвижности в донных осадках и затопленных почвах изученные элементы образуют следующий ряд: $Al \ll Fe < Mn$.

3.3 Изучение особенностей и выявление закономерностей распределения, аккумуляции, миграции и трансформации микроэлементов в трофических цепях гидробионтов озера Байкал.

Уникальной природной лабораторией для исследования поведения химических элементов в гидросфере является Байкал – древнейшее и глубочайшее озеро планеты, с эндемичным животным и растительным миром. Относительно простые трофические связи в пелагической пищевой цепи Байкала, конечным звеном которой является млекопитающее – нерпа, позволяют рассматривать этот водоём как наглядную систему для изучения природных процессов миграции и биоаккумуляции тяжелых металлов в незагрязнённой водной среде. В проведенных исследованиях основной упор был сделан на поведение ртути в естественной среде, пути ее миграции, аккумуляции и трансформации в пищевых цепях Байкала.

Методом ИСП-МС проанализированы Cd, Hg, Pb, As и Se в воде, планктоне, бентосе и рыбах двух локальных участков оз. Байкал, с наибольшей вероятностью подверженных антропогенному воздействию – район напротив Селенгинского мелководья и Лиственничный залив (район истока р. Ангара). Проведенное исследование показало преимущественно низкие концентрации микроэлементов в оз. Байкал, которые меньше или сопоставимы с подобными данными по другим незагрязненным пресноводным экосистемам. Наряду с этим, обнаружены существенные различия в содержаниях Cd, Hg, Pb, As и Se в воде и гидробионтах как между исследованными участками оз. Байкал, так в пелагической и бентосной пищевых цепях из одного района. Несмотря на то, что средние концентрации Pb на порядок больше в воде Селенгинского участка по сравнению с Лиственничным заливом (0,0331 и 0,0040 мкг/л, соответственно), его содержание в рыбах значительно выше в Лиственничном заливе. Это может быть связано с большей биодоступностью свинца в Лиственничном заливе, вызванной меньшим содержанием в воде природных лигандов, участвующих в комплексообразовании с металлами. Аналогичная тенденция наблюдалась для Cd, Hg и Se – более высокие концентрации в планктоне Лиственничного залива при отсутствии значимых

различий их концентраций в воде обоих участков. Значительные отличия в аккумуляции микроэлементов между пелагическими и донными рыбами обнаружены для Hg и As. Концентрации Hg были в 7 раз выше в донных рыбах, в то время как пелагические рыбы содержали вдвое больше As (рис. 14).

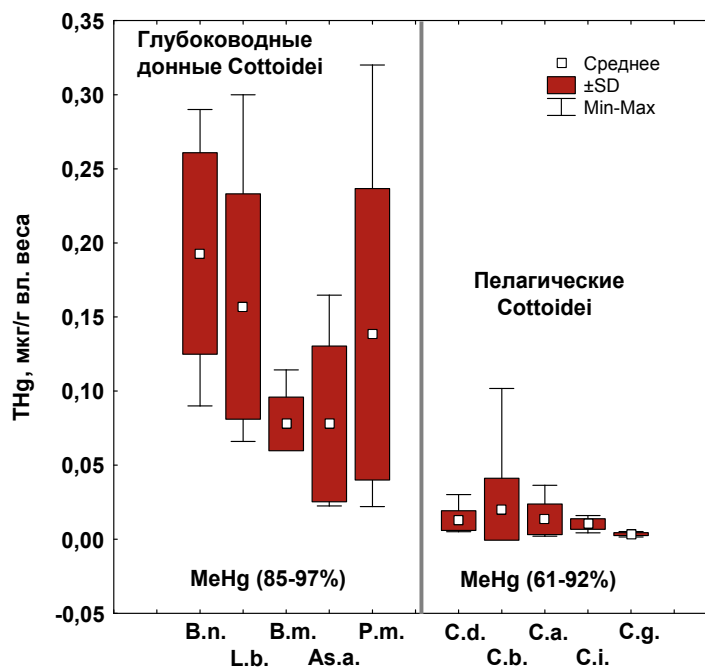


Рисунок 14. Биоаккумуляция общей ртути (THg) байкальскими рогатковидными рыбами (Cottoidei) из различных биотопов. В.п. – *Batrachocottus nikolskii*, В.м. – *B. multiradiatus*, L.б. – *Limnocottus bergianus*, As.a. – *Asprocottus abyssalis*, P.м. – *Procottus major*, C.d. – *Comephorus dybowski*, C.б. – *C. baicalensis*, C.a. – *Cottocomephorus alexandrae*, C.i. – *C. inermis*, C.g. – *C. grewinkii*.

Результаты исследований показали, что в пелагической и бентосной пищевых цепях Байкала происходит биомагнификация (биоусиление) Hg, в то время, как для As, Cd и Pb наблюдается обратный процесс – биоразбавление при повышении трофического уровня. Байкальская нерпа (*Pusa sibirica* Gmel.), накапливающая наибольшие концентрации металлов по сравнению с другими гидробионтами, может являться хорошим интегральным показателем состояния экосистемы Байкала в целом. Годовые кольца дентина зубов байкальской нерпы – вершины пищевой пелагической цепи оз. Байкал, являются регистрирующими структурами возраста тюленей. Впервые методом лазерной абляции ICP-MS проведен химический анализ годовых дентиновых колец архивных и современных зубов байкальской нерпы, отобранных в период с 1960 г. по 2013 г. (рис. 15).

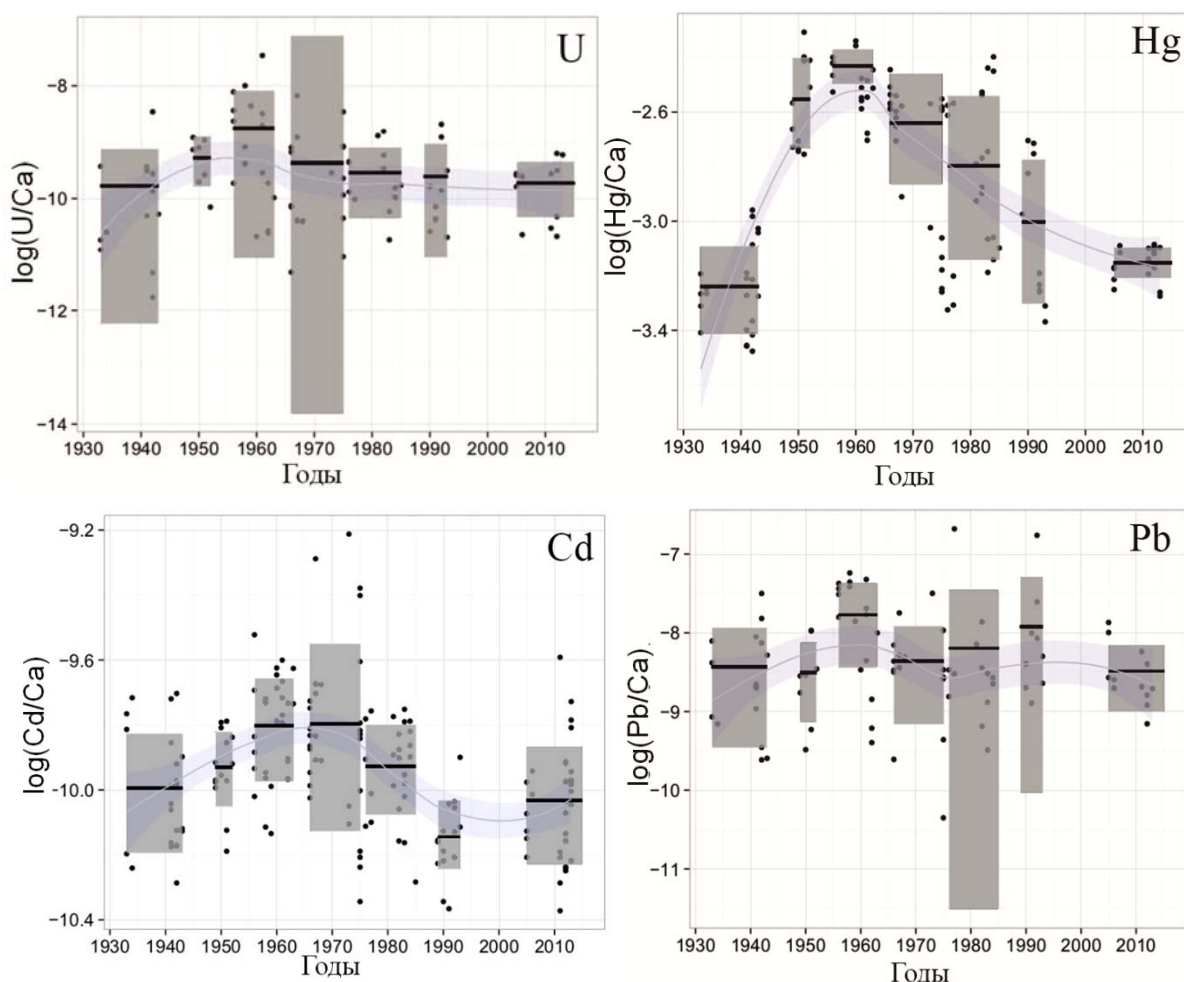


Рисунок 15. Временная динамика накопления Hg, Cd, U, Pb в годовых слоях дентина зубов байкальской нерпы.

Исследование дентина зубов позволило проследить временные изменения содержания металлов в байкальской нерпе за последние 80 лет. Так как зубы являются кальциевыми структурами, все исследованные химические элементы были нормированы по Ca. Проведенная реконструкция содержания Hg, Cd, U, Pb в слоях дентина захватывает период глобального и регионального промышленного развития и упадок советской индустриальной экономики. В результате исследований установлены существенные изменения концентраций Hg, Cd, U, Pb в зубах байкальской нерпы, с увеличением содержаний в целом с 1930-х до 1960-х годов и последующим снижением до современных уровней, сопоставимых с таковыми первой трети XX века. Наиболее выраженный тренд наблюдается для ртути, как элемента обладающего наибольшей мобильностью и бимагнизацией. Наименьшие временные изменения обнаружены для свинца, имеющего низкую

мобильность в водной среде по сравнению с другими исследуемыми элементами. Помимо различных этапов в развитии глобальной и региональной промышленности, на изменения содержания металлов в зубах нерпы могут оказывать влияние уровни воды и поверхностного стока в оз. Байкал, сейсмическая активность и др.

Понимание процессов аккумуляции и распределения ртути в тканях млекопитающих, а также процесса детоксикации/выведения ртути из их организмов, является одной из важнейших задач, включающей в себя исследование сложных и связанных друг с другом процессов метаболического переноса и трансформации. В связи с этим, в 2016 г. были измерены концентрации общей (THg), неорганической (iHg) и метилртути (MMHg) и установлен изотопный состав каждой фракции в тканях и органах (печень, почки, мышцы, кишечник, поджелудочная железа, диафрагма и мех) пресноводных нерп оз. Байкал (*Phoca sibirica*, n=20) и в печени кита белуха (*Delphinapterus leucas*, n=11) из морской арктической среды.

Исследования стабильного специфического изотопного состава (CSIC) природной iHg и MMHg показали, что в тканях и органах водных млекопитающих колебания в зависимости от массы фракционирования изотопов THg были в большей степени связаны с соответствующей долей смесей неорганической и метилртути, причем в более тяжелых изотопах MMHg обогащена на ~3‰ по отношению к iHg (рис. 16а). Показатели зависимости от массы фракционирования указывают на то, что MMHg проходит через процесс деметилизации внутри организма, а затем накапливается в мышечных тканях. Образованная неорганическая ртуть, в свою очередь, откладывается в печени, и в меньшей степени в почках перед ее выведением из организма.

Показатели независимого от массы фракционирования для изотопного состава общей ртути и CSIC iHg и MMHg были практически идентичны во всех исследованных образцах тканей нерпы (рис. 16). Более того, практически идентичные соотношения наклона $\Delta^{199}\text{Hg} : \Delta^{201}\text{Hg}$ были определены для двух соединений: $1,32 \pm 0,06$ для MMHg и $1,27 \pm 0,06$ для iHg (значения для общей ртути:

1,27±0,01). В соответствии с проведенными экспериментами [14] при фоторедукции ММНг и iНг в водной толще, соединения ртути в органах нерпы должны иметь значение $\Delta^{199}\text{Hg} : \Delta^{201}\text{Hg}$ близкое к 1,3, а не 1,0, как в данном исследовании. Следовательно, можно утверждать, что оба соединения ртути имеют общий источник, т.е. метилртуть оставшаяся в водной толще после фотодеметилизации далее была включена в пелагическую пищевую цепочку и попала в организмы нерп вместе с пищей (рис. 16b).

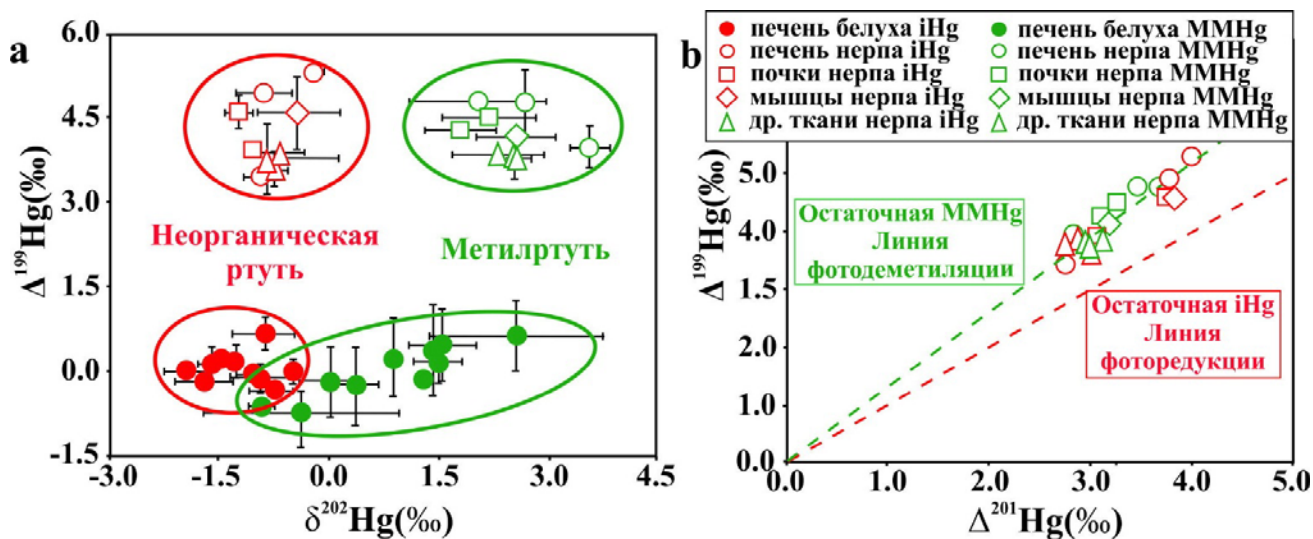


Рисунок 16. (а) Показатели зависимого и независимого от массы фракционирования (выраженные как $\delta^{202}\text{Hg}$ и $\Delta^{199}\text{Hg}$, соответственно, для соединений неорганической ртути и ММНг, во внутренних тканях белух (печень) и нерпы. iНг и ММНг показаны красными и зелеными символами, соответственно. (б) соотношение $\Delta^{199}\text{Hg}$ и $\Delta^{201}\text{Hg}$ для iНг и ММНг во внутренних органах и тканях нерпы. Зеленая пунктирная линия показывает соотношение $\Delta^{199}\text{Hg} : \Delta^{201}\text{Hg}$, ожидаемое от остаточной ММНг, измеренной в рыбах оз. Байкал после фотодеметилизации ММНг в водной толще [13], а красная пунктирная линия показывает соотношение $\Delta^{199}\text{Hg} : \Delta^{201}\text{Hg}$, ожидаемое от фоторедукции неорганической ртути в водной толще. Как ММНг так и iНг расположены на "ММНг склоне фотодеметилизации".

Таким образом, полученные результаты показывают, что изучение зависимого и независимого от массы фракционирования отдельных соединений ртути в тканях млекопитающих может пролить свет на внутренние и внешние процессы, влияющие на соединения ртути в млекопитающих, до и после попадания в их организмы ММНг. Аналогично, измерение стабильного изотопного состава ртути в тканях человека может помочь определить пути попадания iНг и ММНг в организм человека и быть мощным инструментом для прослеживания метаболической реакции на воздействие ртути.

Основные результаты проведённого исследования

В ходе эколого-геохимического картирования и мониторинга получена информация о химическом составе снегового покрова и почв урбанизированных территорий Прибайкалья. Показано, что химический состав снеговой воды существенно различается по химическому составу и отражает промышленную специфику городов. Определены ореолы загрязнения, созданные производственной деятельностью городских агломераций. Установлено, что природные минеральные частицы твердого осадка снега на территории Иркутско-Шелеховского района представлены в основном кварцем, полевыми шпатами, пироксенами, карбонатами, амфиболами, глинистыми минералами и гидроокислами железа. Напротив, техногенные аэрозоли в больших количествах содержат корунд, магнетит, кристобалит, флюорит, фторалюминат, сульфиды и окислы металлов.

Изучены формы соединений тяжелых металлов Pb, Cu, Zn, Co, Ni, Cr и мышьяка в городских почвах с различной степенью загрязнения. Установлено большое количество металлоорганических соединений и преобладание в максимально загрязненных почвах повышенной подвижности в основном для Zn и As, способны поступать в пищевые цепи. Детально рассмотрено распределение радиоактивных элементов (U, Th) в снежном покрове и почве гг. Ангарск, Иркутск, Черемхово.

Установлен эффект воздействия почвенных бактерий на миграционную подвижность мышьяка и тяжелых металлов Pb, Cd, Zn, Hg в техногенных почвах, в ризосферной ее зоне, за счет образования подвижных металлоорганических соединений с фульвокислотами и процессов хелатообразования. Хелатные формы As, Pb способны сорбироваться на поверхности бактерий и создавать биогеохимический барьер для поступления их в растения. Ризосферные бактерии стимулировали повышенную биодоступность кадмия для растений. По результатам микрозондового анализа прослеживалось увеличение интенсивности процессов выщелачивания As и Pb из сульфидных минералов в техногенных почвах опыта под влиянием ризосферных бактерий. Это направление исследований может иметь

практическое значение в растениеводстве, для ремедиации почв и в области экобиотехнологий.

Выполнено комплексное исследование систем малых озер Приольхонья (западное Прибайкалье). При значительных вариациях размеров (площадь водного зеркала от 0.01n до 10n км²), минерализации (от 0.1n до 100n г/л) их общими чертами являются небольшая глубина, не превышающая обычно первых метров, крайне ограниченная площадь водосбора, расположение в зонах аридного и семиаридного климата и отсутствие поверхностного стока.

Приольхонские озера имеют тектоническую природу и занимают впадины, приуроченные к структурам растяжения, возникшим на ранних стадиях формирования Байкальского рифта. Разломы, ограничивающие эти структуры, дренируют глубокие горизонты циркуляции подземных вод и обеспечивают водоемам устойчивую подпитку метеорными водами.

В результате выполненных исследований макро- и микрокомпонентов воды озер и родников, а также донных осадков малых озер Приольхонья и обобщения имеющегося материала позволили оценить адекватность построенной ранее физико-химической модели (Склярова и др., 2011) эволюции малых озер в условиях холодного климата. В процессе моделирования нами рассмотрены случаи нарушения водно-солевого баланса системы: испарение превышает питание озер и прекращение подземного питания (настоящее время).

Сопоставление наших теоретических модельных построений преобразование вещества в небольших водоемах с изученными реальными данными за последние 15 лет позволило проследить основные тренды геохимической эволюции озер и рассмотреть особенности накопления микроэлементов. Сделана оценка роли двух ведущих составляющих мобилизации элементов в природных водах: процессов взаимодействия вода-порода и процессов эвапоритизации в небольших резервуарах.

Многолетние систематические исследования Братского и Усть-Илимского водохранилищ позволили выделить природную (подземные воды) и техногенную (промышленные зоны) составляющие, участвующие в формировании гидрохимического режима водоемов. Детальными исследованиями участков

водоемов с повышенной техногенной нагрузкой определены основные загрязняющие компоненты, их миграционные характеристики и протяженность их потоков рассеяния. С помощью физико-химической модели установлены формы нахождения техногенных элементов, поступающих в Братское водохранилище со стоками Усольской промзоны и их трансформация при смешении промышленных и природных вод.

Основываясь на полученных по результатам исследований миграционных характеристиках и формах нахождения техногенных элементов в системе «техногенный источник–водоем» оценены факторы, влияющие на самоочищение водоемов. Выявлено, что для Братского и Усть-Илимского водохранилища наиболее значимым фактором является разбавление загрязненных вод большим объемом метаморфизованных в ангарских водохранилищах байкальских вод. Для оценки факторов, оказывающих непосредственное влияние на накопление и перераспределение тяжелых металлов и их биогеохимические циклы в системе «вода–донные отложения» проведено изучение миграционных форм основных элементов водовмещающих пород (Al, Fe, Mn).

Проведены исследования миграции, аккумуляции и трансформации ртути и других потенциально токсичных элементов в трофических цепях гидробионтов оз. Байкал. Концентрации As, Cd, Pb, Hg, Se, определенные в воде и биоте Селенгинского мелководья и Лиственничном заливе (Южный Байкал) были невысокими, ниже или, по крайней мере сопоставимы, с таковыми в других пресноводных экосистемах. Однако, установлены существенные различия в накоплении микроэлементов гидробионтами бентосной и пелагической пищевых цепей. Так например, концентрации Hg были в 7 раз выше в донных рыбах, в то время как пелагические рыбы содержали вдвое больше As. Высокий коэффициент Se / Hg в рыбе в этих двух районах озера Байкал, позволяет предположить, что вероятность Hg-индуцированной токсичности в озере Байкал для эндемичных рыб является относительно низкой.

Химический анализ архивных и современных зубов байкальской нерпы позволил проследить временные изменения содержания металлов на вершине

пищевой сети оз. Байкал за последние 80 лет. Исследования стабильных изотопов $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ в слоях дентина показали, что трофический уровень нерпы остается достаточно стабильным с 1930-х годов прошлого столетия. Установлены существенные изменения концентрации Hg, Cd, U в зубах нерпы с увеличением загрязнения в целом с 1930-х до 1970-х годов и последующим снижением до современных уровней.

Впервые показана кинетика деметиляции метилртути (ММНг) в организмах млекопитающих, приводящая к зависимому от массы фракционированию изотопов ртути, обогащающему остаточный резерв ММНг более тяжелыми изотопами относительно образовавшейся фракции неорганической ртути (iHg). Установлено, что прошедшая в организме процесс деметиляции ММНг, накапливается в мышечной ткани, а образованная iHg, откладывается в печени и почках перед ее выделением. Изучение специфики состава стабильных изотопов ртути в тканях млекопитающих, в том числе человека, может быть новым мощным инструментом для прослеживания ответной метаболической реакции организма на воздействие ртути.

Список использованных источников

1. Belogolova G. A., Sokolova M. G., Gordeeva O. N., Vaishlya O. B. Speciation of arsenic and its accumulation by plants from rhizosphere soils under the influence of *Azotobacter* and *Bacillus* bacteria. // Journal of Geochemical Exploration. - 149 (2015). - P. 52–58.
2. Гаськова О.Л., Склярова О.А. Влияние природных органических кислот на отношение Mg/Ca в донных осадках высокоминерализованных озер // Геология и геофизика. – 2013. - Т. 5. - № 6. - С. 829-840.
3. Склярова О.А., Чудненко К.В. Бычинский В.А. Физико-химическое моделирование эволюции малых озер в условиях холодного климата // Геохимия. – 2011. - Т. 49. - № 8. - С. 875-885.
4. Солотчина Э.П., Скляров Е.В., Страховенко В.Д., Солотчин П.А., Склярова О.А. Минералогия и кристаллохимия карбонатов современных осадков малых озер Приольхонья (Байкальский регион) // Доклады Академии Наук. - 2015. - Т. 461. - № 5. - С. 579-585.
5. Солотчина Э.П., Скляров Е.В., Солотчин П.А., Вологина Е.Г., Склярова О.А., Ухова Н.Н. Голоценовая осадочная летопись озера Большое Алгинское, Западное Забайкалье: связь с палеоклиматом // Доклады Академии Наук. - 2013. - Т. 448. - № 1. - С. 1-19.
6. Fedotov A.P, Phedorin M. A, Enushchenko I.V, Vershinin K.E, Krapivina S.M, Vologina E.G, Sklyarova O.A, Petrovskii S.K, Melgunov M.S. Drastic desalination of small lakes in Eastern Siberia (Russia) in the early twentieth century: inferred from sedimentological, geochemical and palynological composition of small lakes // Environmental Earth Sciences. – 2013. - V. 68. - P. 1733-1744.
7. Солотчина Э.П., Скляров Е.В., Солотчин П.А., Вологина Е.Г., Склярова О.А. Осадочный разрез озера Киран (Западное Забайкалье) как архив региональных климатических событий голоцена // Геология и геофизика. – 2014. - Т. 55. - № 2. - С. 472-482.
8. Солотчин П.А., Скляров Е.В., Солотчина Э.П., Замана Л.В., Склярова О.А.

Новая находка когаркоита $\text{Na}_3\text{SO}_4\text{F}$ в Забайкалье // Доклады Академии Наук. – 2015. Т. 462. - № 6. - С. 701-705.

9. Склярв Е.В., Скввитина Т.М., Склярва О.А., Котов А.Б., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д. Позднечетвертичные высокотемпературные гейзериты Приольхонья (Байкальская рифтовая зона): петрографические и минералогические особенности, состав и условия формирования // Петрология. – 2014. - Т. 22. - № 6. - С. 580-591.

10. Ветров В.А., Кузнецова А.И., Склярва О.А. Базовые уровни химических элементов в воде озера Байкал. // География и природные ресурсы. – 2013. - № 3. - С. 41-51.

11. Sklyarov E.V., Sklyarova O.A., Lavrenchuk A.V., Menshagin Yu.V. Natural pollutants of Northern Lake Baikal // Environmental Earth Sciences. – 2015. - V. 74. - P. 2143-2155.

12. Усть-Илимское водохранилище. Подземные воды и инженерная геология территории / Под ред. М. М. Одинцова. - Новосибирск: Наука, 1975. - 220 с.

13. Perrot V., Pastukhov M.V., Eпов V.N., Husted S., Donard O.F.X., Amouroux D. High mass-independent fractionation of Hg in the pelagic food web of Lake Baikal (Russia) // Environmental Science & Technology. - 2012. - V. 46. - T. 11. - P. 5902-5911.

14. Bergquist B.A., Blum J.D. Mass-dependant and -independent fractionation of Hg isotopes by photoreduction in aquatic systems // Science. - 2007. - V. 318. - P. 417-420.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в соответствии с государственным заданием

индикатор	Ед. измерения	Всего за 2013-2016 гг.	2013	2014	2015	2016
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	единиц	45	15	10	11	9
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	единиц	17	5	2	5	5
Число тезисов в конференциях	единиц	48	20	7	10	11
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности:						
зарегистрированных патентов в России	единиц	0	0	0	0	0
зарегистрированных патентов за рубежом	единиц	0	0	0	0	0

Публикации за 2016 г.

1. Perrot V., Masbou J., Pastukhov M.V., Epov V.N., Point D., Bérail S., Becker P.R., Sonke J.E., Amouroux D. Natural Hg isotopic composition of different Hg compounds in mammal tissues as a proxy for *in vivo* breakdown of toxic methylmercury // *Metallomics*, 2016. – V. 8, I. 2. – P. 170-178.
2. Klimenkov I.V., Sudakov N.P., Pastukhov M.V., Kositsyn N.S. Cytochemical features of olfactory receptor cells in benthic and pelagic Sculpins (Cottoidei) from Lake Baikal // *Archives of Biological Sciences*, 2016. – V. 68, I. 2. – P. 345-353.
3. Ciesielski T.M., Pastukhov M.V., Leeves S.A., Farkas J., Lierhagen S., Poletaeva V.I., Jenssen B.M. Differential bioaccumulation of potentially toxic elements in benthic and pelagic food chains in Lake Baikal // *Environmental Science and Pollution Research*, 2016. – V. 23. – I. 15. – 15593-15604.
4. Chuparina E.V., Azovsky M.G. Elemental Analysis of Aquatic Plants by X-ray Fluorescence // *Analytical Letters*, 2016. – V. 49, I. 12. – P. 1963-1972.
5. Efimova N.V., **Grebenshikova V.I.**, Lisetskaya L.G. Long-term medical and environmental effects, associated with prolonged technogenic soil pollution in Eastern Siberia // *International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR)*. – 2016. – V. 7(4). – P.1976-1981.
6. Соколова М.Г., Белоголова Г.А., Акимова Г.П., Вайшля О.Б. Влияние инокуляции ризосферными бактериями на рост растений и транслокацию микроэлементов из загрязненных почв // *Агрехимия*, 2016. – № 7. – С. 72–80.
7. Загорулько Н.А., Полетаева В.И. Динамика гидрохимического состава малых притоков верхней части Братского водохранилища // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*, 2016. – № 3. – С.112-124.
8. Забуга Г.А., Ефимова Н.В., Гребенщикова В.И., Блащинская О.Н., Горбунова О.В. Оценка экологического состояния урботерритории // *Экология урбанизированных территорий*, 2016. – № 2. – С. 13-18.

9. Касьянова Л.Н., Азовский М.Г. Степная растительность выровненных пространств острова Ольхон (озеро Байкал) // Успехи современного естествознания, 2016. – № 3. – С. 153-162.