

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ им. А.П.ВИНОГРАДОВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИГХ СО РАН)

УДК 550.4:552.57/.58)

Reg № НИОКТР 121041500059-6

Инв. № _____



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН,

Д. Г.-М.Н.

А.Б.Перепелов

« 18 » января 2022 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
по теме:

«Пространственно-временная изменчивость экосистем и климата Восточной
Сибири в позднем плейстоцене-голоцене»

(промежуточный)

№ 0284-2021-0003

Направление фундаментальных и поисковых исследований
1.5.10. География, геоэкология и рациональное природопользование

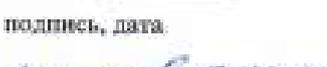
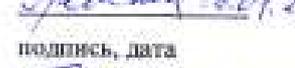
Протокол Ученого совета ИГХ СО РАН
№ 1 от «21» января 2022 г.

Руководитель темы
доктор географических наук

 18.01.2022 Е.В. Безрукова
(подпись, дата)

Иркутск 2021

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ:

Руководитель темы, выс. д-р географич. наук	<u></u> подпись, дата	Е. В. Безрукова (реферат, введение, разделы 5.1, 5.2, 5.4, заключение, комплектация отчета)
Исполнители:		
снс, канд. биол. наук	<u></u> подпись, дата	М.В. Пастухов (раздел 1)
снс, канд. геол.-мин. наук	<u></u> подпись, дата	В.Н. Полегаева (раздел 1)
нс, канд. геол.-мин. наук	<u></u> подпись, дата	М.А. Крайнов (раздел 5.2, оформление отчета по ГОСТу)
снс, канд. геол.-мин. наук	<u></u> подпись, дата	А.А. Щегников (раздел 5.3)
нс, канд. геол.-мин. наук	<u></u> подпись, дата	Е.В. Иванов (раздел 5.4)
нс, канд. геол.-мин. наук	<u></u> подпись, дата	Ю.Н. Шолохова (раздел 5.4)
снс, канд. мед. наук	<u></u> подпись, дата	Е.А. Мамонтова (раздел 4)
снс, канд. биол. наук	<u></u> подпись, дата	А.А. Мамонтов (раздел 4)
нс, д-р. геол.-мин. наук	<u></u> подпись, дата	В.Н. Гребеншикова (раздел 3)
нс, канд. геол.-мин. наук	<u></u> подпись, дата	О.Н. Гордеша (раздел 2)
снс, канд. геол.-мин. наук	<u></u> подпись, дата	Г.А. Белоголова (раздел 2)

Ключевые слова: научно-исследовательская работа, промежуточный отчет.

РЕФЕРАТ

Отчет 59 с., 1 кн., 26 рис., 1 табл., 43 источника, 2 прил.

ПРИРОДНАЯ СРЕДА, ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ, ПОЧВА, БАКТЕРИИ, МЫШЬЯК, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОХИМИЯ, МОНИТОРИНГ, ЭКОСИСТЕМЫ, ПРИБАЙКАЛЬЕ, ОЗ. БАЙКАЛ, ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, РТУТЬ, ПОЛИХЛОРИРОВАННЫЕ БИФЕНИЛЫ, ХЛОРООРГАНИЧЕСКИЕ ПЕСТИЦИДЫ, АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ, ПЛАНКТОН, ЛАНДШАФТЫ, КЛИМАТ, ГОЛОЦЕН

Объектами исследования были донные отложения и основные виды промысловых рыб в акватории Братского водохранилища, почвенный покров территорий бывших металлургических и хлорорганических заводов Приангарья, пробы атмосферного воздуха южного Прибайкалья и планктона южного Байкала, химический состав воды в оз. Байкал и истоке р. Ангары, донные отложения озер Восточного Саяна.

Цель исследований – изучение пространственно-временной изменчивости природной среды юга Восточной Сибири в настоящем и прошлом, установление механизмов и причин этих изменений.

В результате исследований проведена эколого-геохимическая оценка и изучены особенности трансформации тяжелых металлов и мышьяка в природно-техногенных почвах Прибайкалья; по результатам долговременного мониторинга определена пространственно-временная изменчивость концентраций ртути в донных осадках и рыбах Братского водохранилища; установлено, что территория Ангарского металлургического завода остается опасной зоной для проведения на ней какой-либо хозяйственной деятельности; показано, что значимые максимумы содержания ртути в воде оз. Байкал и истоке р. Ангары являются откликами на сильные геодинамические воздействия (землетрясения); установлено, что использование планктона оз. Байкал для мониторинга стойких органических загрязнителей целей возможно только для оценки состояния системы в период, не превышающий месяца; показано, что значимыми источниками информации об изменениях условий осадконакопления в озерах Восточного Саяна служат ассоциации слоистых силикатов, их соотношения в разрезе и кристаллохимические характеристики; выполнена сводная характеристика развития региональных экосистем в позднеледниковье, раннем, среднем и позднем голоцене.

Основные научные показатели: высокая степень новизны полученных материалов и выводов. Степень внедрения – внедрено, результаты опубликованы в рецензируемых журналах, учитываемых в системах WoS, Scopus и РИНЦ.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	8
Основная часть.....	9
1 Экологические эффекты, миграция и накопление ртути: обобщенные результаты эколого-геохимического мониторинга Братского водохранилища.....	9
1.1 Введение.....	9
1.2 Материалы и методы.....	9
1.3 Результаты и обсуждение.....	10
1.3.1 Содержание ртути в вертикальных профилях донных отложений, как показатели антропогенной нагрузки на экосистему БВ.....	10
1.3.2 Пространственно-временная изменчивость концентраций ртути в рыбах Братского водохранилища, экологическая опасность ртутного загрязнения.....	13
1.4 Выводы.....	18
2 Оценка загрязнения почв мышьяком территории АМЗ гор. Свирска и факторы, влияющие на аккумуляцию и миграцию ртути в почвах территории бывшего металлургического и хлорорганического заводов Прибайкалья.....	19
2.1 Введение.....	19
2.2 Объекты и методы.....	19
2.3 Результаты исследований.....	20
2.3.1 Оценка загрязнения мышьяком почвенного покрова и технозёмов территории бывшего АМЗ после его ликвидации.....	20
2.3.2 Факторы аккумуляции и миграции ртути в почвах территории бывшего металлургического и хлорорганического заводов Прибайкалья.....	23
2.3.3 Влияние As, Pb, Cd на особенности образования биопленок почвенными микро-организмами и их выживание.....	25
2.4 Выводы.....	26
3 Природные аномальные изменения в воде Байкальской экосистемы.....	26
3.1 Введение.....	26
3.2 Материалы и методы.....	27
3.3 Результаты и обсуждение.....	28
3.4 Выводы.....	31

4	Обобщение текущих и ретроспективных результатов анализа ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе южного Прибайкалья и планктона южного Байкала.....	31
4.1	Введение.....	31
4.2	Материалы и методы.....	32
4.3	Результаты и обсуждение.....	33
4.4	Выводы.....	37
5	Пространственно-временная изменчивость экосистем и климата Восточной Сибири в позднем плейстоцене-голоцене.....	38
5.1	Особенности седиментогенеза в оз. Хикушка (Окинское плато).....	38
5.1.1	Введение.....	38
5.1.2	Материалы и методы.....	38
5.1.3	Результаты и обсуждение.....	39
5.1.4	Выводы.....	40
5.2	Первые свидетельства катастрофического паводкового события в озере Номто-Нур (Восточный Саян) в позднем голоцене	41
5.3	Изменения природной среды и климата в позднеледниковье и голоцене на территории Монголии и в Байкальском регионе: систематический обзор результатов изучения.....	43
5.4	Комплексные лито-геохимические исследования донных отложений позднеплейстоцен–голоценового возраста озера Хубсугул и их методическое обеспечение.....	44
	Заключение.....	50
	Список использованных источников.....	52
	Приложение А. Список публикаций 2021 г. по теме исследований.....	57
	Приложение Б. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в соответствии с государственным заданием.....	59

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчёте о НИР используются следующие сокращения и обозначения.

Биомагнификация – увеличение концентрации химических веществ на каждой ступени экологической пирамиды, связанное с тем, что количество поглощаемой организмом пищи намного превышает его собственную массу, а химические вещества выводятся из организма не полностью

Биопленки – основной образ жизни большинства микроорганизмов, состоят из сложных полимерных соединений, способны защищать микроорганизмы от стрессовых условий окружающей среды

Референтная доза/концентрация – суточное воздействие химического вещества в течение всей жизни, которое устанавливается с учетом всех имеющихся современных научных данных и, вероятно, не приводит к возникновению неприемлемого риска для здоровья чувствительных групп населения

Седиментация – физическое химическое оседание твердых частиц, взвешенных в жидкости или газе, происходящее под действием силы тяжести; процесс образования осадка в осадочном бассейне путем перехода осадочного материала из подвижного состояния в неподвижное

Споруляция – спорообразование микроорганизмов, которые могут долго сохраняться при стрессовых нагрузках в таком виде

абс. выс. – абсолютная высота

АМЗ – Ангарский металлургический завод

БВ – Братское водохранилище

влаж. – влажный

ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения

г – грамм

г. – год

гор. – город

гг. – года

ГХБ – гексахлорбензол

ГХЦГ – гексахлорциклогексан

д. – деревня

ДДД – дихлордифенилдихлорэтан

ДДТ – дихлордифенилтрихлорэтан
ДДЭ – дихлордифенилдихлорэтилен
зал. – залив
ИК – инфракрасный
кал. – калиброванный
км – километр
л – литр
л.н. – лет назад
м – метр
МВ – магнитная восприимчивость
мг – миллиграмм
мкг – микрограмм
мкм – микрометр
мм – миллиметр
нг – нанограмм
о. – остров
оз. – озеро
ПДК – предельно допустимая концентрация
ППП – потери при прокаливании
ПХБ – полихлорированные бифенилы
пос. – поселок
р. – река
см – сантиметр
СОЗ – стойкие органические загрязнители
ст. – станция
т – тонна
тыс. – тысяча
УХП – «Усольехимпром»
ХОП – хлорорганические пестициды
ЦКП – центр коллективного пользования
ЦЭ – цех ртутного электролиза
ч – час
ШН – шламонакопитель
ТНҚ – коэффициент целевой опасности

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, направленные на изучение современного состояния, особенно химического загрязнения водных и почвенных экосистем, а также пространственно-временной изменчивости эко- и геосистем Восточной Сибири в настоящее время и в прошлом представляют одно из актуальнейших направлений в современной географии и геоэкологии. Для создания надежной основы понимания сути происходящих региональных эко- и геосистем, прогнозных сценариев природной среды и климата требуются новые данные о развитии природной среды регионов, полученные с использованием современных научных методов и подходов к изучению региональной экологии прошлого и настоящего.

Целями исследований были: эколого-геохимическая оценка и изучение особенностей трансформации тяжелых металлов и мышьяка в природно-техногенных почвах Прибайкалья, эколого-геохимическая оценка загрязнения мышьяком почвенного покрова Ангарского металлургического завода после его ликвидации и изучение особенности миграции ртути в почвах бывшего металлургического и хлорорганического заводов Приангарья; оценка динамики концентраций ртути в донных отложениях и основных видах промысловых рыб по акватории БВ и межгодовом аспекте; исследование природных аномальных изменений в окружающей среде Байкальского региона; изучения причин variability природной среды Окинского плато (Восточный Саян) в голоцене.

Все цели проекта выполнены полностью. Настоящий отчет является промежуточным по теме: «Пространственно-временная изменчивость экосистем и климата Восточной Сибири в позднем плейстоцене-голоцене».

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Экологические эффекты, миграция и накопление ртути: обобщенные результаты эколого-геохимического мониторинга Братского водохранилища

1.1 Введение

Поступление огромных количеств ртути в окружающую среду связано с работой хлор-щелочных заводов. Так в Прибайкалье основным источником техногенной ртути в окружающей среде является предприятие «Усольехимпром» (гор. Усолье-Сибирское). В результате работы цеха ртутного электролиза в окружающую среду поступило 1327 тонн ртути [1], что привело к экологической катастрофе, последствия которой не устранены даже через несколько десятилетий после прекращения работы цеха. Особую опасность создает поступление Hg в экосистему Братского водохранилища (БВ), в которой конечными индикаторами путей геохимической миграции ртути являются донные отложения.

Рыбы, занимающие верхние трофические уровни в пищевых цепях БВ, в сравнении с другими гидробионтами, являются наиболее объективными, интегральными биогеохимическими показателями ртутного загрязнения определенного участка экосистемы водоема. В отличие от донных отложений, где значительная доля Hg находится в прочносвязанных и нерастворимых формах, рыбы аккумулируют в мышечной ткани наиболее мобильную биодоступную метилированную ртуть, обладающую крайне высокой степенью токсичности. В рацион жителей городов и поселков, прилегающих к Братскому водохранилищу, местная рыба входит как один из основных объектов питания и, по сути, в период значительного снижения концентраций ртути в поверхностной воде, становится единственным значимым источником поступления ртути в организм человека.

Целью исследования являлась оценка динамики концентраций ртути в донных отложениях и основных видах промысловых рыб по акватории БВ и межгодовом аспекте, выявление внутренних и внешних факторов, влияющих на аккумуляцию и миграцию в ртути, определение уровня потенциальной опасности ртутной интоксикации местного населения при употреблении рыбы в разные по техногенному воздействию периоды.

1.2 Материалы и методы

Данные о временной динамике концентраций микроэлементов в донных отложениях БВ получены по результатам мониторинговых работ (2009–2018 гг.). Образцы береговых наилок отобраны на участках в 1,5 и 5 км ниже гор. Усолье-Сибирское. По акватории БВ (от гор. Усолье-Сибирское до д. Заславск) выделены станции с разной скоростью

осадконакопления (от 0,08 до 1,61 см/год). На каждой станции образцы донных отложений и затопленных почв отобраны послойно (шаг 2 см) с помощью трубки ГОИН-1. Концентрации Hg в образцах измерялись на анализаторе RA-915⁺ с приставкой PYRO-915⁺.

Рыба отлавливалась ставными сетями ячеей 14–70 мм на различных глубинах по разрешениям Росрыболовства на 4 участках БВ. В полевых условиях проводился отбор проб мышечной ткани рыб (10 г) для химического анализа, определение пола, стадии зрелости и биометрических параметров. У рыб также отбирались пробы для биологического анализа. На исследуемых участках БВ отбиралось по 20 особей каждого вида. Общий объем собранного материала составил 1200 проб мышечной ткани рыб.

Расчет коэффициента опасности (THQ) производился по [2]:

$$\text{THQ} = \frac{\text{EF} \times \text{ED} \times \text{FI} \times \text{MC}}{\text{OR}_f \times \text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-3} \quad (1)$$

где, EF – частота воздействия (365 дней в году); ED – продолжительность воздействия (68 лет для взрослых); FI – потребление рыбы 20 г сырой массы / человека / день; MC – концентрация Hg (мг/кг влаж. веса) OR_f – пероральная референтная доза Hg 0,0001 мг/кг/день; BW – средняя масса тела взрослого человека (65 кг); AT – среднее время воздействия неканцерогенов (365 дней × 68 лет). Определение концентраций Hg в рыбах проведено на анализаторе RA-915⁺ с приставкой РП-91 методом «холодного пара».

1.3 Результаты и обсуждение

1.3.1 Содержание ртути в вертикальных профилях донных отложений, как показатели антропогенной нагрузки на экосистему БВ

Оценка загрязнения компонентов окружающей среды требует определения регионального геохимического уровня, который для БВ получен по наиболее часто встречающимся концентрациям ртути в затопленных почвах. Определено, что средний региональный геохимический уровень концентраций Hg составляет 0,020 мг/кг (диапазон: 0,007–0,030 мг/кг).

В 2009 г. в береговых наилках участков БВ в 1,5 и 5 км ниже предприятия «Усольехимпром» концентрации ртути составляли 2,77 и 1,40 мг/кг, соответственно. Через 20 лет после закрытия цеха ртутного электролиза произошло значительное снижение концентрации ртути в этом районе (0,059 и 0,022 мг/кг, соответственно). Только в 1,5 км ниже от предприятия «Усольехимпром», концентрации ртути в 3 раза превышают фоновый уро-

вень, а на расстоянии 5–30 км ниже по течению находятся на уровне фоновых значений (0,016–0,022 мг/кг). Спад техногенной нагрузки от Усольской промышленной зоны отмечается и по концентрации ртути в воде водохранилища, которая в 1998 г. составляла около 0,02–0,08 мкг/л, в 2003 г. – 0,0106 мкг/л, в 2012 г. – 0,0042 мкг/л. Повышенные концентрации ртути, отмеченные в наилках левого берега водоема в районе г. Усолье-Сибирское в 2018 г., указывают на продолжающееся поступление этого токсиканта в водоем с поверхностным стоком, которое по данным [1] составляет 115 кг/год.

Для каждого керна рассчитана глубина донных отложений, соответствующая периодам с различной техногенной нагрузкой (рисунок 1). В период I (1967-1970 гг.) происходит более чем 10-кратное, по сравнению с фоновыми концентрациями, увеличение концентраций ртути в донных отложениях. Такая тенденция, связанная с заполнением БВ, обусловлена поступлением ртути в донные отложения из верхнего, гумусового слоя затопленных почв и остатков растительности.

Эмиссия Hg в БВ, вызванная началом работы цеха ртутного электролиза, началась в 1970 г. Антропогенное поступление токсиканта с 1970 по 1998 г. (период II) четко определяется наибольшими концентрациями ртути в донных осадках по всей акватории водоема (рисунок 1). В донных осадках с более высокой скоростью осадконакопления (S-3, S-4, S-5, S-10, S-11) наблюдается два пика. В настоящее время, можно предположить, что эти концентрации отражают интенсивность работы цеха ртутного электролиза.

По данным [1] с поверхностными водами, атмосферными осадками и сточными водами в БВ поступило ~76 т ртути. На миграцию Hg в водоемах большое влияние оказывает сорбция ее взвешенными частицами с их последующей седиментацией. В донных отложениях русловой части БВ обнаруживается положительная корреляция ($r=0,898$, $p<0.01$) между максимальными концентрациями Hg в керне и скоростью седиментации. Наиболее высокие концентрации ртути (до 10,13 мг/кг) определены в донных отложениях S-3, где наблюдается самая высокая скорость осадконакопления и, по данным [3] происходит активная седиментация терригенного материала малой размерности. Повышенные концентрации Hg определяются высокой долей пелитовых частиц, достигающей 30%. Количественная оценка содержания ртути в донных отложениях района S-8 показала, что на участке площадью 2 км² сосредоточено 3 257 кг ртути.

Наименее загрязненные донные осадки зафиксированы на участках с невысокой скоростью осадконакопления: Балаганское расширение водохранилища (S-8) и устье зал. Унга (S-9). Гидродинамические условия этого участка способствуют интенсивному пере-

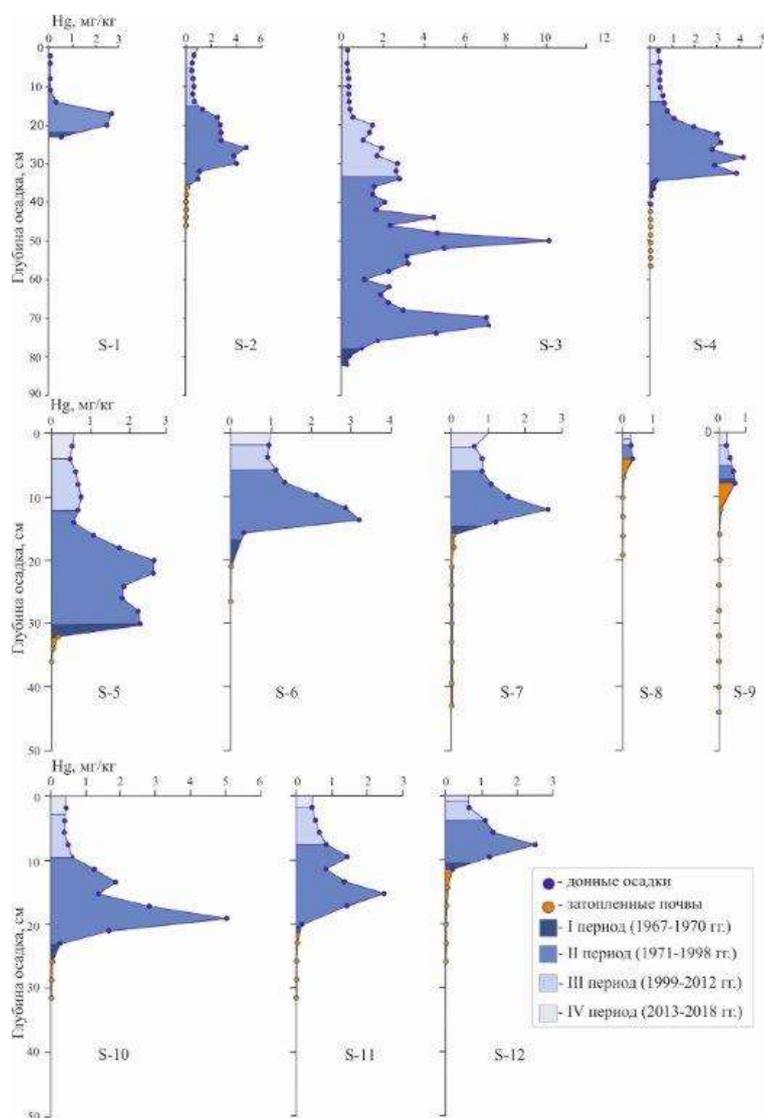


Рисунок 1 – Распределение ртути в донных отложениях Братского водохранилища: S-1 – 1 км выше гор. Свирск, S-2 – 1 км ниже гор. Свирск, S-3 – о. Конный, S-4 – д. Хинь, S-5 – д. Середкино, S-6 – д. Быково, S-7 – устье зал. Оса, S-8 – между заливами Оса и Унга, S-9 – устье зал. Унга, S-10 – д. Молька, S-11 – д. Игжей, S-12 – пос. Заславск

мыву донных отложений, переходу их во взвешенное состояние, переносу и выпадению в осадок на нижележащем участке (S-10 и далее). Результаты профильного опробования, показывающие приуроченность высоких концентраций Hg в донных отложениях по всей акватории БВ к 1970–1998 гг., определяют, что загрязненная взвесь переносится на значительное расстояние (180 км и более).

Прекращение работы цеха ртутного электролиза и последующее закрытие предприятия «Усольхимпром» привело к значительному снижению эмиссии ртути (рисунок 1). Результаты показывают, что в III (1999–2012 гг.) и IV (2012–2018 гг.) периоды происходит поэтапное снижение концентраций ртути в донных осадках БВ. Менее загрязненная

терригенная взвесь во время седиментации способствует перекрытию высоко загрязненных осадков. Однако концентрация Hg в верхних слоях осадка (0,059–0,960 мг/кг) по-прежнему выше фонового уровня, а также концентраций токсиканта, полученных в 2018 г. вблизи источника загрязнения.

Учитывая, что естественные уровни ртути для БВ составляют 0,020 мкг/кг, доля антропогенной составляющей в балансе ртути в донных осадках водоема более 90%: в S-3 – от 91,0–99,8%, в S-8 – от 93,0–93,9%. Значения индекса потенциального экологического риска [4] для донных отложений русловой части БВ (от 446 до 20260) свидетельствуют, что по концентрации Hg все донные отложения относятся к категории с очень высоким экологическим риском (>320).

1.3.2 Пространственно-временная изменчивость концентраций ртути в рыбах Братского водохранилища, экологическая опасность ртутного загрязнения

Результаты многолетних исследований накопления ртути в мышечной ткани массовых промысловых видах рыб верхней части БВ – окуне (*Perca fluviatilis*), леще (*Abramis brama*), ерше (*Gymnocephalus cernuus*) плотве (*Rutilus rutilus*) и карасе (*Carassius gibelio*), представлены на рисунке 2.

В период с 2008 по 2018 г. наблюдается устойчивая тенденция снижения средних для всех рассматриваемых видов рыб концентраций ртути, как в Балаганском расширении, так и техногенно нагруженном речном участке БВ – на 48% и 37%, соответственно. Это указывает на постепенную, сильно растянутую во времени нормализацию экологической обстановки после прекращения работы цеха ртутного электролиза на предприятии «Усольехимпром». В то же время, концентрации Hg в мышцах большинства видов рыб на речном участке водохранилища в 2018 г. еще значительно превышают уровень ПДК_{Hg} для нехищных пресноводных рыб в РФ, а у окуня, леща, ерша и уровень ПДК_{Hg} установленную ВОЗ. В Балаганском расширении в 2008 г. в мышцах всех карповых рыб (леща, плотвы и карася) средние концентрации Hg превышали уровень ПДК. В 2013 г. наблюдалось резкое снижение аккумуляции Hg в этих видах рыб до безопасных уровней, аналогичные результаты получены и в 2018 г. У окуневых рыб (окунь, ёрш) межгодовая динамика концентраций Hg иная – если у окуня в 2013 г. выявлено существенное увеличение накопления Hg в мышечной ткани по сравнению с 2008 г., то у ерша, напротив, в 2013 г. происходит снижение концентраций Hg до значений, установленных для карповых рыб. В 2018 г. наблюдается противоположная картина – увеличение средних концентраций ртути в мышцах ерша и снижение у окуня до уровня ПДК (рисунок 2).

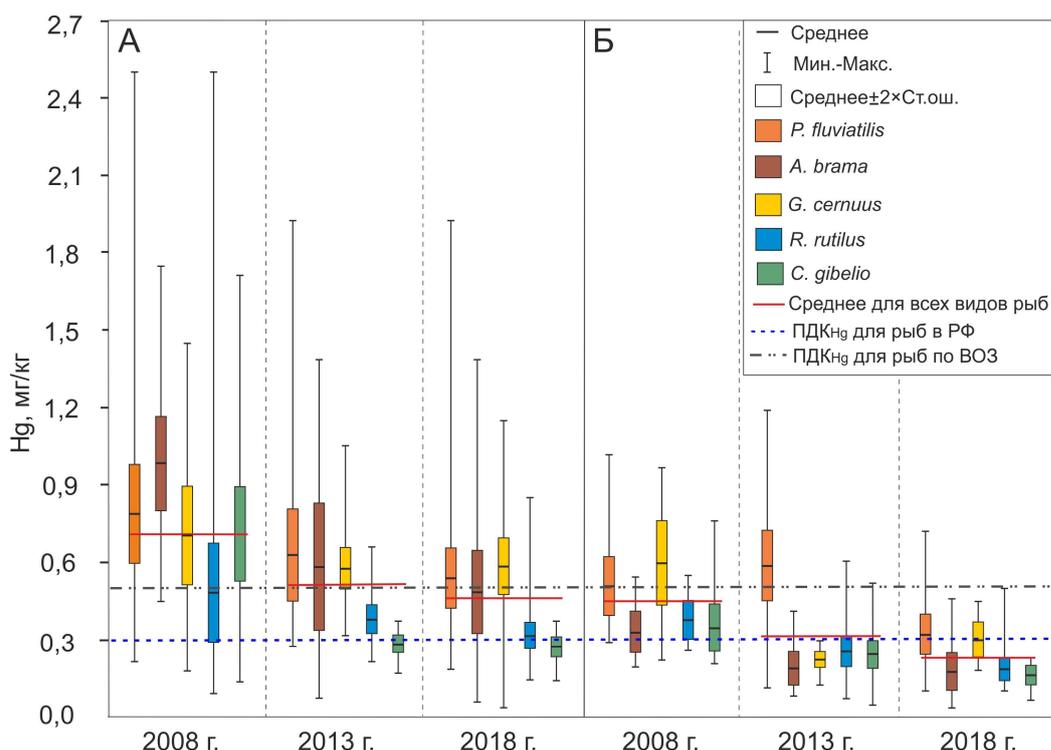


Рисунок 2 – Динамика концентраций ртути (мг/кг влажного веса) в мышечной ткани основных промысловых видов рыб верхней части Братского водохранилища в период с 2008 по 2018 гг.; А – речной участок водохранилища (0–100 км от источника ртутного загрязнения – «Усольехимпром»); Б – Балаганское расширение (100–180 км от источника загрязнения)

Следует отметить значительный разброс значений концентраций ртути в разных видах рыб и в выборках одного вида верхней части БВ. На такое неравномерное распределение концентраций ртути в ихтиофауне могут влиять, как внешние факторы окружающей среды, так и факторы, связанные с экологическими особенностями отдельных видов рыб.

Донные отложения в период резкого снижения поступления техногенной Hg в БВ стали основным источником вторичного загрязнения гидробионтов различных трофических уровней. Распределение концентраций Hg в поверхностном слое донных отложений по акватории Братского водохранилища неравномерно и существенно варьирует как на отдельных участках водоема, так и разные периоды исследований [5]. Это находит свое отражение в значительной вариабельности концентраций ртути в рыбах из определенных участков акватории БВ. Очаговое распределение высоких концентраций ртути в донных отложениях связано с неоднородностью гидрологических условий – глубиной, направлением и скоростью течения, рельефом дна, влияющих на процессы седиментации. В свою очередь, ведущую роль в изменении гидрологических условий в БВ играют сезонные и

межгодовые колебания уровня воды (до 7 м), приводящие к изменению турбулентных процессов, размыву поверхностных донных осадков, высвобождению слоев с высокими концентрациями Hg, десорбции ртути и ее переотложению ниже по течению. В периоды резких изменений уровня воды возрастает поступление биодоступной метилртути в водную среду и трофические цепи гидробионтов.

Основу питания у всех исследованных видов рыб составляют бентосные организмы, т.е. их пищевое поведение в той или иной степени связано с донными осадками, где в анаэробных условиях происходит процесс микробиологического преобразования соединений ртути в мобильную метилированную форму, передающуюся в процессе биомагнификации по пищевым цепям. В то же время, каждый из рассматриваемых видов рыб имеет свои характерные черты пищевого и миграционного поведения. Так, окунь БВ, в отличие от других видов, является бентофагом с элементами хищного питания и, соответственно, занимает более высокий трофический уровень. Увеличение количества звеньев в пищевой цепи окуня за счет молоди рыб, приводит к усилению трофической передачи ртути (рисунок 2). Проведенное ранее изучение изотопного состава ртути в мышцах отдельных особей окуня из речного участка БВ, имеющих сходные биометрические показатели и возраст, показало, что значения масс-независимых изотопов ртути в мышцах окуней могут показывать источник поступления ртути и пищевое поведение отдельных особей рыб [6]. Установлено, что низкие значения $\Delta^{199}\text{Hg}$ в мышцах окуня указывают на преобладание в рационе зообентоса, непосредственно связанного с донными осадками, которые имеют показатели масс-независимых изотопов близкие к 0, высокие значения – напротив свидетельствуют о преимущественном питании зоопланктоном и молодь рыб, имеющих слабую связь с донными отложениями. Такие различия в преобладающих кормовых объектах у разных особей окуня из одной популяции могут являться определяющим фактором высокой вариабельности концентраций ртути у этого вида. В рационе леща и карася БВ доминируют детрит и бентосные организмы – личинки хирономид и олигохеты. Но, при схожем питании этих двух видов, в речном участке водохранилища концентрации ртути в мышцах леща значительно выше, чем у карася (рисунок 2). Основной причиной столь резких различий в аккумуляции Hg, вероятно служат поведенческие особенности этих видов рыб. Лещ круглогодично активно питается, совершая миграции в русловой части водоема на десятки километров. Напротив, карась активен только в период открытой воды и не совершает длительных миграций, поздней осенью он почти перестает питаться и передвигаться до весеннего освобождения водоема ото льда. Соответственно, в отличие от других видов рыб, у карася в зимний период прекращается поступление ртути в организм с объ-

ектами питания, что делает его более адаптивно приспособленным к воздействию токсических веществ. Ёрш, в отличие от других видов рыб данного исследования, круглогодично ведет оседлый образ жизни на дне водоема. Это типичный бентофаг, доминирующим компонентом его питания в БВ являются амфиподы, накапливающие ртуть в больших количествах (0,110 – 0,179 мг/кг вл. веса), чем другие группы зообентоса (0,012 – 0,127 мг/кг). Придонный образ жизни и типично бентосное питание обуславливает наибольший контакт этого вида рыб с загрязненными ртутью донными осадками, и, следовательно, высокие уровни накопления Hg. В питании плотвы БВ помимо зообентоса и зоопланктона, значительную долю занимают макрофиты и сине-зеленые водоросли, накапливающие наименьшие концентрации ртути в сравнении с беспозвоночными, детритом и молодью рыб. Вероятно, это может являться основной причиной меньшей аккумуляции Hg в мышечной ткани плотвы, чем окуня, леща и ерша.

Важной и неотъемлемой составляющей эколого-геохимических исследований ртутного загрязнения промысловых видов рыб, является определение уровней потенциальной опасности интоксикации ртутью местного населения береговой зоны БВ. Для определения риска неканцерогенных эффектов для здоровья человека от употребления исследуемых видов рыб на различных участках БВ и в разные временные периоды, использовались коэффициент целевой опасности THQ [2]. Все расчеты производились на метилртуть, ее среднее содержание в рыбах БВ составляет 93% от общей Hg [6]. Если THQ меньше 1, то ежедневное воздействие на этом уровне вряд ли вызовет какие-либо побочные эффекты в течение жизни человека. И наоборот, население подвергнется риску для здоровья, если соотношение будет равно или больше 1. THQ, рассчитанные для каждого рассматриваемого вида рыб и каждого периода исследований, показали, что в 2008 г. на всех исследованных участках акватории БВ местное население, употребляющее в пищу промысловых рыб может испытывать неблагоприятное воздействие на здоровье (рисунок 3). Особенно это относится к населению, проживающему возле речного участка БВ. Наибольшие показатели риска установлены для жителей районов, прилегающих к г. Усолье-Сибирское и Свирск, где критический уровень риска был превышен для большинства рыб в 2 – 5 раз. В Усольском районе наиболее высокие значения THQ отмечены для плотвы окуня и леща, в Свирском – для окуня, леща и ерша. В последующие годы исследований 2013 – 2018 гг. показатели неканцерогенного риска здоровью населения заметно снизились, но при употреблении большинства видов исследованных рыб они остаются выше предельного уровня (рисунок 3). Для жителей поселков прилегающих к Балаганскому расширению БВ за период исследований неблагоприятное воздействие на здоровье при питании местной ры-

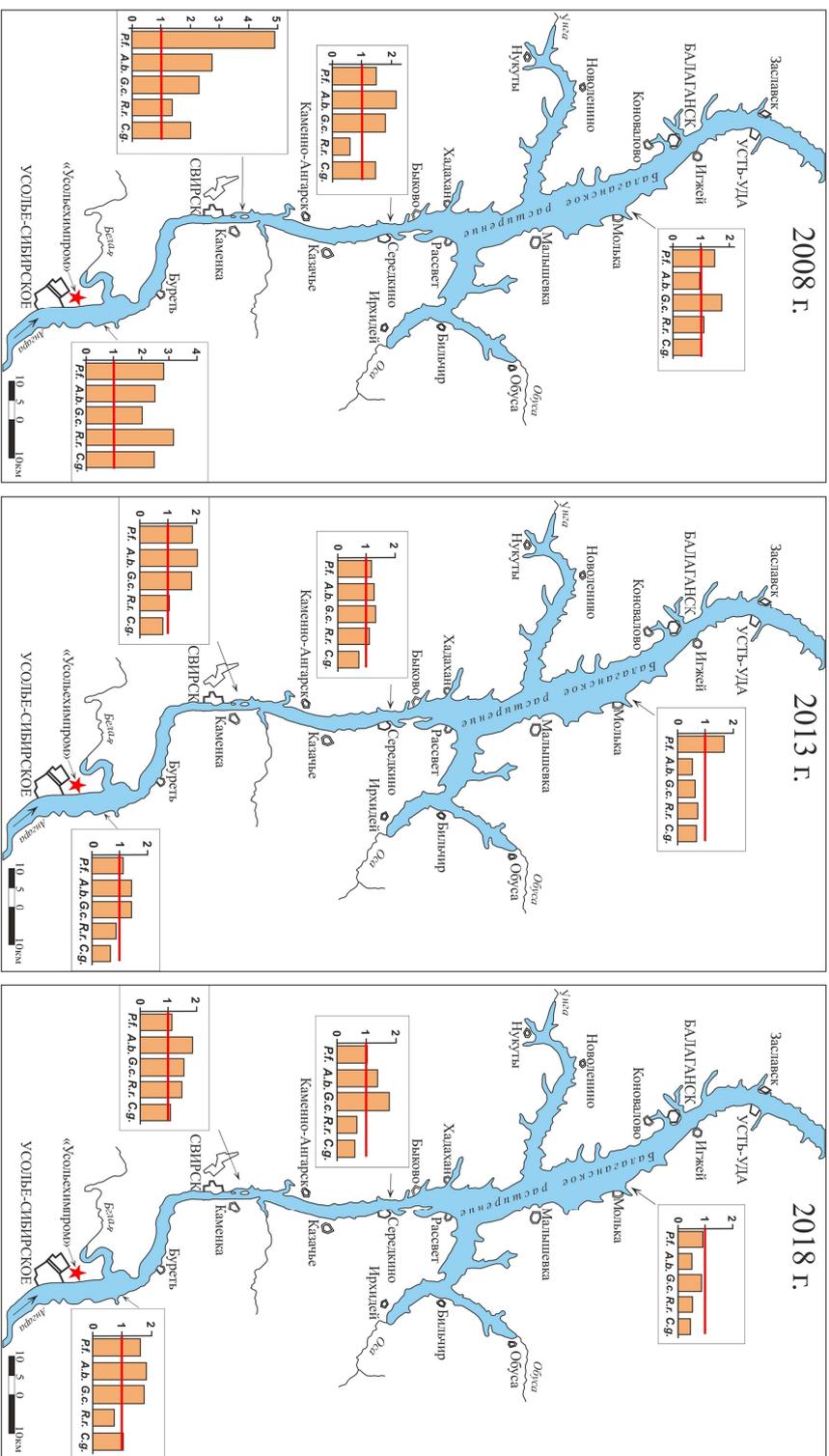


Рисунок 3 – Динамика значений ТНҚ ртуту при употреблении местным населением рыбы из верхней части БВ за период 2008 – 2018 гг.; красной линией на диаграммах обозначен критический уровень ТНҚ; Rf. – *Rutilus rutilus* (плотва), C. g. – *Carassius gibelio* (карась)

бой снизилось от высоких до безопасных уровней (в 2018 г. ТНҚ для всех видов рыб <1). Таким образом, в современный период наблюдается существенное снижение опасности ртутной интоксикации для жителей прибрежных городов и поселков при употреблении в пищу рыбы из верхней части БВ. На большинстве участков БВ как продукт питания безопасно можно использовать карася и плотву. В то же время, нежелательно постоянное употребление

в пищу таких видов рыб, как окунь, лещ и ерш из речного участка БВ, это может привести к негативным последствиям для здоровья.

1.4 Выводы

Выполнено обобщение результатов долговременного эколого-геохимического мониторинга ртутного загрязнения экосистемы Братского водохранилища. По вертикальным профилям концентраций ртути в донных осадках БВ четко выделяются периоды, отражающие долю антропогенной составляющей: заполнение водохранилища и интенсивность работы предприятия «Усольехимпром». Определено, что работа цеха ртутного электролиза обусловила формирование протяженной зоны загрязнения (более 180 км) донных осадков БВ. Интенсивность накопления токсиканта связана, в большей степени, с гидрологическими параметрами, в частности скорости осадконакопления водохранилища. После остановки цеха ртутного электролиза и последующего полного прекращения работы предприятия «Усольехимпром» в БВ донные отложения формируются из терригенной взвеси с более низкими концентрациями ртути, которые, однако, на порядок превышают фоновые концентрации.

Пространственно-временная динамика концентраций ртути в промысловых рыбах БВ указывает на постепенную нормализацию экологической обстановки в водоеме. За период 2008–2018 гг. концентрации ртути в рыбах в среднем снизились на 42%. Установлено, что определяющими факторами аккумуляции Hg в рыбах являются периодические изменения гидрологических условий водоема, влияющие на вторичное поступление ртути в водную среду и трофические цепи гидробионтов, а также, индивидуальные особенности биологии и экологии разных видов рыб. Экологическая опасность ртутной интоксикации жителей прибрежных населенных пунктов при употреблении промысловых рыб БВ значительно снизилась за 10-летний период. В то же время, на речном участке БВ постоянное употребление местных видов рыб может привести к неблагоприятным последствиям для здоровья населения. В связи с этим, необходимо обеспечить регулярный мониторинг загрязнения ртутью донных осадков и рыб БВ, для своевременного предупреждения развития негативных экологических ситуаций и принять соответствующие меры для контроля и защиты здоровья населения. Это становится наиболее актуальным в период демеркуризации техногенных отходов предприятия «Усольехимпром».

2 Оценка загрязнения почв мышьяком территории АМЗ гор. Свирска и факторы, влияющие на аккумуляцию и миграцию ртути в почвах территории бывшего металлургического и хлорорганического заводов Прибайкалья

2.1 Введение

Изучение поведения тяжелых металлов и мышьяка в техногенных объектах и факторов, влияющих на аккумуляцию и миграцию токсичных элементов в техногенных экосистемах, имеют высокую актуальность. В настоящее время в этой области остается много вопросов, требующих дальнейшего исследования. Это касается закономерности трансформации соединений тяжелых металлов и мышьяка в условиях техногенеза под воздействием многочисленных факторов: рН среды, органического вещества, величины концентрации металлов и их формы соединений в почве, вида почвенных бактерий, и процессов их биопленкообразования. Эти факторы могут влиять на миграционную активность мышьяка и тяжелых металлов в системе «почва – растение» и далее – на пищевую цепь животных и человека.

Цель исследований заключалась в эколого-геохимической оценке загрязнения мышьяком почвенного покрова территории бывшего АМЗ после его ликвидации и в изучении особенности миграции ртути в почвах территории бывшего металлургического и хлорорганического заводов Приангарья. Одной из задач исследований являлось изучение влияния As, Pb, и Cd на выживание и образование биопленок у некоторых сапротрофных микроорганизмов.

2.2 Объекты и методы

Исследования основаны на изучении особенности загрязнения техногенных почв мышьяком Ангарского металлургического завода (АМЗ), работавшего с 1934–1949 гг. и выпускавшего мышьяк для оборонной промышленности. На территории его промплощадки находилось около 140 тыс. тонн арсенопиритовых огарков в течение более 60 лет, что представляло большую угрозу здоровью для местного населения. В 2015 году была проведена ликвидация отвалов, строений завода и рекультивация техногенных почв на отдельном участке. Для оценки пространственного распределения мышьяка в поверхностном слое почвы на территории были опробованы 70 площадок на приблизительно равном удалении друг от друга. Пробы почв отобраны из верхнего горизонта 15–20 см. Также проведено изучение двух почвенных разрезов на глубину 70 см на территории бывших мышьяковистых отвалов и в пределах бывшего здания завода АМЗ.

На исследуемой территории условно выделены три участка: №1 – территория, бывших мышьяковых отвалов, участок №2 – территория, где непосредственно располагались

строения АМЗ и 3-й участок – окрестности основной зоны загрязнения. Эти участки отличаются источниками загрязнения. Пробы анализировали атомно – адсорбционный методом и РФА. Изучение распределения и миграции ртути в почве проведено в окрестностях хлор-органического предприятия УХП, а также вблизи АМЗ. В окрестностях УХП исследованы почвы вблизи и на удалении от ЦЭ и ШН, сельскохозяйственные почвы города и в 30 км от него. В окрестностях АМЗ изучены техноземы вблизи техногенных отвалов, лесные и сельскохозяйственные почвы города и на удалении от него. Почвы отбирали из верхнего гумусового горизонта, сельскохозяйственные на глубину пахотного горизонта. Концентрации Hg во всех экспериментах измеряли атомно-адсорбционным методом на спектрометре «РА-915+» (Россия). Изучение матрикса биопленок, образованных под воздействием тяжелых металлов и мышьяка, проводили на основе выращивания биопленки на покровных стеклах в чашках Петри с последующим микроскопированием. Визуализацию биопленок на покровных стеклах проводили с использованием микроскопа Axio Observer Z1 (Carl Zeiss, Германия). При изучении сорбции тяжелых металлов и мышьяка микробными биопленками, надбиопленочную жидкость анализировали методом ISP-MS.

2.3 Результаты исследований

2.3.1 Оценка загрязнения мышьяком почвенного покрова и технозёмов территории бывшего АМЗ после его ликвидации

Закономерности распределения содержания As в почвах в пределах выделенных участков показаны на рисунке 4 и в таблице 1. Почвы исследованной территории на поверхности характеризуются высоким содержанием мышьяка, значительно превышающим предельно допустимые концентрации. Максимальное накопление мышьяка установлено в почвенном грунте отвала на участке № 1 и в зоне его влияния в центральной части территории (рисунок 1). Распределение As здесь характеризуется высоким стандартным отклонением, что указывает на неоднородное его распределение (таблица 1). На этом участке наблюдается большой диапазон значения рН от 3,0 до 8,0 и высокие концентрация $C_{орг}$ до 13,5%, связанного с огарками. На участке 2, к северу от первого участка, установлены не очень высокие концентрации As после рекультивации почвенного грунта, так как здесь были проведены дополнительные работы по внесению удобрений с чистой почвой и известковистого раствора, после удаления остатков завода [7].

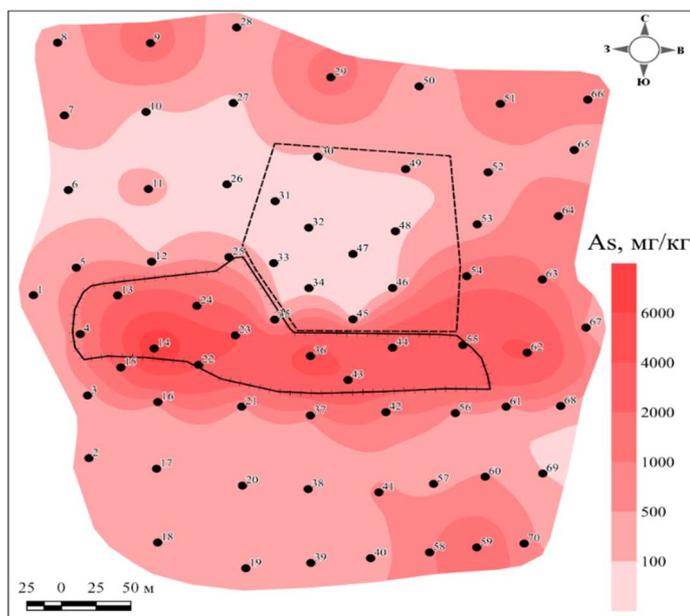


Рисунок 4 – Схема распределения концентраций As (мг/кг) в почве на территории бывшего АМЗ после его ликвидации (ПДК As - 10 мг/кг)

Таблица 1 – Распределение концентраций As в почве, мг/кг

№ участка	Количество проб	Мин.	Макс.	Среднее	Стандартное отклонение
1	18	43	8394	2424	2269
2	15	11	1400	177	352
3	37	19	4550	586	788

По данным ранее проведенных исследований, концентрации мышьяка в почвах на территории мышьяковистых отвалов достигали 21400 мг/кг, а на территории построек АМЗ до 36700 мг/кг, тогда как сейчас максимальная концентрация As в почве значительно ниже (таблица). После ликвидации отвалов осталась их корневая часть. Это видно по распределению As по почвенному профилю № 1 (рисунок 5). Содержание As с поверхности и до глубины 40 см остается очень высоким. Далее снижается, а на глубине 60–70 см концентрация As возрастает. Причиной этому служит, развитый на глубине глинистый природный горизонт, который создает геохимический барьер, способствующий иммобилизации подвижных концентраций мышьяка до 259 мг/кг.

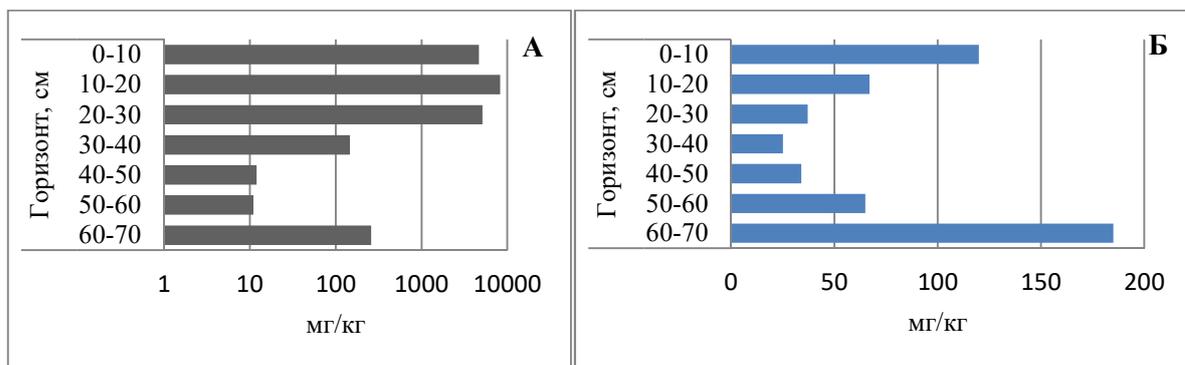


Рисунок 5 – Распределение содержания As (мг/кг) в почвенном профиле участка 1 – А и участка 2 – Б

Такая же тенденция, при меньших концентрациях As, наблюдается и в почвенном профиле на месте бывших строений АМЗ участка 2 (рисунок 5).

Большую роль в миграции As по вертикальным разрезам могло играть также изменение рН и органического вещества. В почвах разрезов прослеживалось снижение кислотности почв и количество $C_{орг}$ на глубину. Анализ взаимодействия этих параметров с концентрацией мышьяка в почвах на основе полиномиальных регрессионных уравнений по разрезу 1 показал закономерное их взаимодействие (рисунок 6).

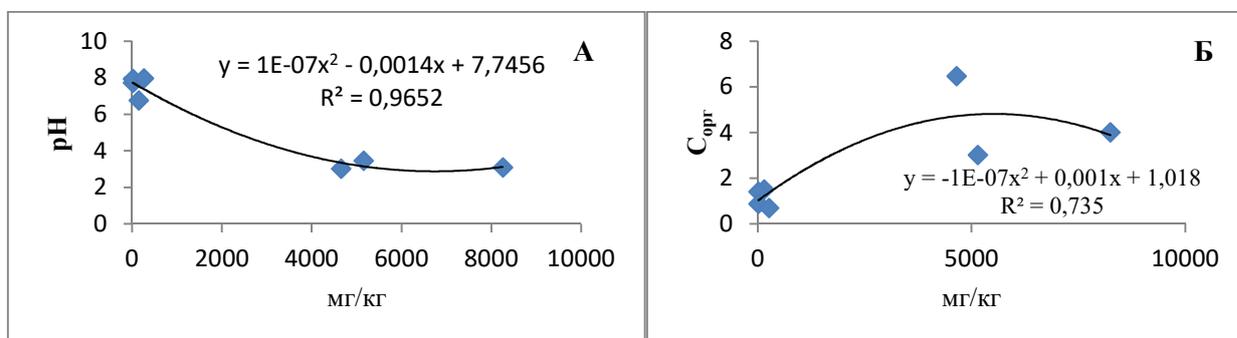


Рисунок 6 – Зависимость концентраций As мг/кг в почве от рН (А), от содержания $C_{орг}$ (Б) в разрезе 1

Таким образом, формы соединений As и его миграционная подвижность может зависеть от рН и $C_{орг}$. Фазовое состояние соединений As и физико-химические свойства почв, а не только общая его концентрация, могут значительно влиять на подвижность, биодоступность и токсичность As. Эти процессы проанализированы с помощью последовательной поэтапной экстракции техногенных почв. Были выделены соединения As, показанные на рисунке 7. Видно, что мышьяк на участке 1 в почвенном грунте отвала концентрируется, в ос-

новном, в слабо подвижных фракциях легко разрушаемых минералов. Вдали от основной зоны загрязнения проявлены дерново-карбонатные почвы с выраженным гумусовым горизонтом и дисперсным материалом, привнесенным из отвала. Значения рН здесь повышены до 7,1 - 8,0.

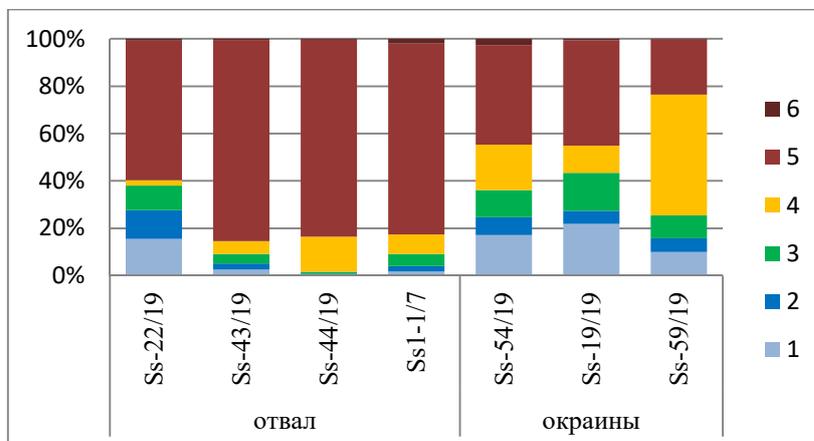


Рисунок 7 – Распределение концентраций As по фракциям (процент от суммы фракций); фракции: 1 – легкообменная, 2 – карбонатная, 3 – органическая, 4 – гидроксидов-Fe, 5 – легко разрушаемых минералов, 6 – остаточная

Соединения мышьяка в этой зоне, представленные дисперсной фракцией, могут быть более подвижны, поэтому сорбируются карбонатами, органическими соединениями и гидроксидами – Fe. Известно, что многие соединения мышьяка легко растворимы, но интенсивность миграции As в почвах может быть невелика из-за активной сорбции его гидроксидами железа, органическими веществами и некоторыми глинистыми минералами [8], что наблюдается и на изученной территории.

2.3.2 Факторы аккумуляции и миграции ртути в почвах территории бывшего металлургического и хлорорганического заводов Прибайкалья

Изучены валовые концентрации Hg (рисунок 8). В почвах территории УХП вблизи ШН концентрации Hg могут составлять 1,6–295 ПДК (ПДК Hg в почвах – 2,1 мг/кг), вблизи отвалов АМЗ максимальная концентрация Hg составляет 2,2 ПДК. Общей закономерностью распределения Hg в почвах является снижение ее концентраций по мере удаления от основных источников загрязнения УХП и АМЗ до концентраций, не превышающих ПДК, но превышающих региональный фон (0,02 мг/кг). Этому способствует атмосферный перенос паров Hg, загрязненных частиц при ветровой и механической эрозии. Ртуть накапливается в основ-

ном в верхних слоях почв, где более высокое содержание гумуса. Именно органическое вещество почв является одним из факторов, регулирующих миграцию и аккумуляцию Hg в почвах.

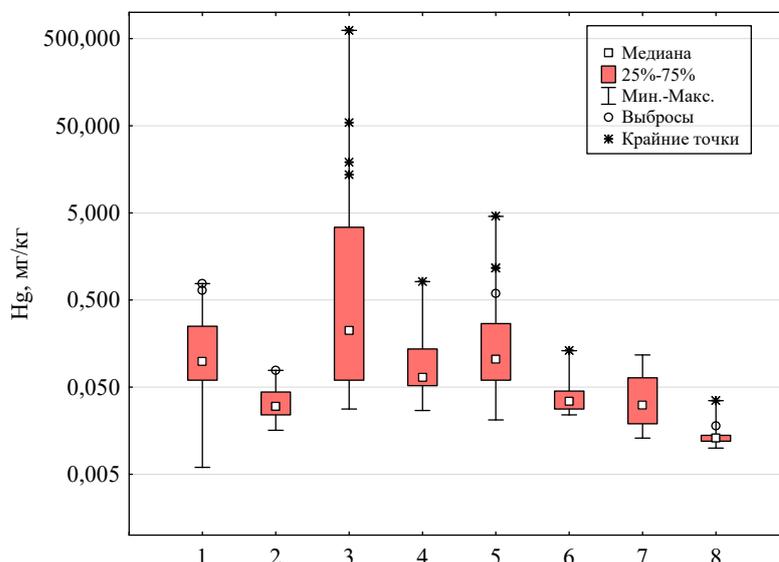


Рисунок 8 – Распределение валовых содержаний ртути в почвах, мг/кг: 1–4 – УХП, 5–8 – АМЗ. 1 – окрестности УХП, 2 – 30 км от УХП, 3 – вблизи ШН, 4 – на удалении от ШН, 5 – промплощадка АМЗ, 6 – дачи, 7 – окрестности города, 8 – 15 км от города

Эксперимент по фракционированию соединений Hg (рисунок 9) показал, что ртуть в почвах окрестностей УХП и в 30 км от него находится преимущественно в органической F3 и прочносвязанной F4 фракциях, а вблизи ШН – в сульфидной и прочносвязанной F4. В почвах вокруг АМЗ также установлено преобладание прочносвязанных F4 и сульфидных F5 форм ртути. Концентрации Hg в мобильных фракциях всех изученных почв – водо- F1 и кислоторастворимой F2 – низкие.

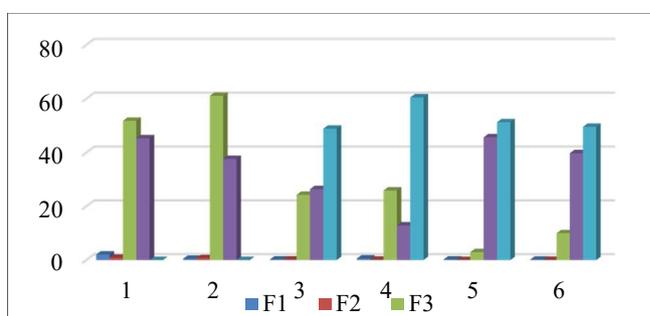


Рисунок 9 – Формы нахождения ртути в почвах, %: 1–2 – окрестности УХП, 3–4 – вблизи ШН, 5–6 – промплощадка АМЗ. F1-F5 – фракции.

Высокое содержание ртути в сульфидной и прочносвязанной фракциях почв вблизи ШН обусловлено использованием специальных реагентов для связывания Hg в период работы цеха ртутного электролиза УХП. Такие меры предупредили распространение Hg в почвах, так сульфиды, обладают низкой растворимостью и, следовательно, слабым потенциалом миграции в почвах. Увеличение минеральных соединений Hg в почвах окрестностей АМЗ связано с присутствием труднорастворимых сульфидных частиц огарков.

2.3.3 Влияние As, Pb, Cd на особенности образования биопленок почвенными микроорганизмами и их выживание

Исследование проведено на основе экспериментов с использованием штаммов сапротрофных микроорганизмов. Почвенные ризосферные бактерии способны образовывать биопленки на поверхности корней растений. В качестве источника тяжелых металлов и мышьяка использовали водные растворы солей метаарсенита натрия, ацетата кадмия и нитрата свинца. Описание подробной методики и результатов эксперимента приведена в статье [9]. В результате исследований установлены закономерности, связанные с механизмами токсического действия растворов солей As, Pb и Cd, на формирование биопленок бактерий (*Bacillus megaterium* var *phosphaticum*, *Bacillus mucilaginosus*, *Pectobacterium carotovorum* ssp. *carotovorum* и *Escherichia coli*), изменение их клеточных форм и выживаемость бактерий. Растворы солей Cd обладали максимальной токсичностью и подавляли образование биопленок практически во всех взятых концентрациях, а соли As и Pb могли стимулировать этот процесс.

Установлено, что при одинаковых начальных концентрациях As, Pb и Cd в исходной среде культивирования происходит значительное снижение содержания металла в растворе над микробной массой штаммов *B. mucilaginosus* и *B. megaterium*, что указывает на иммобилизацию химических элементов микробной массой. Это может быть обусловлено также их сорбцией в матриксе биопленки. Наблюдается иммобилизация тяжелых металлов из растворов за счет их связывания с матриксным веществом биопленок и полимерными органическими соединениями, образующимися при споруляции бактерий (рисунок 10). Это может повышать толерантность бактерий к высоким концентрациям тяжелых металлов. Штамм *Bacillus megaterium* var *phosphaticum* оказался наиболее устойчивым к высоким концентрациям As и мог влиять на образование структурированных колоний бактериальных клеток сотовой конструкции (рисунок 10, фото 2).

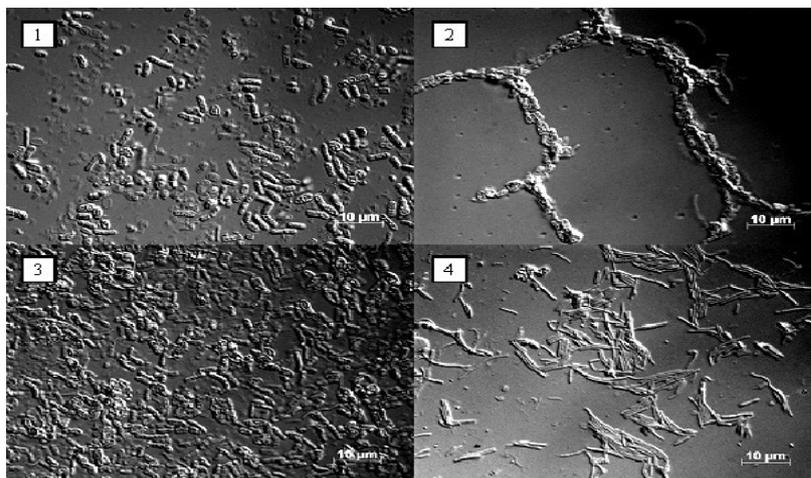


Рисунок 10 – *Bacillus megaterium*: 1 – контроль; 2 – метаарсенит натрия 25 мг/л; 3 – нитрат свинца 25 мг/л; 4 – ацетат кадмия 2,5 мг/л. ($\times 100$)

2.4 Выводы

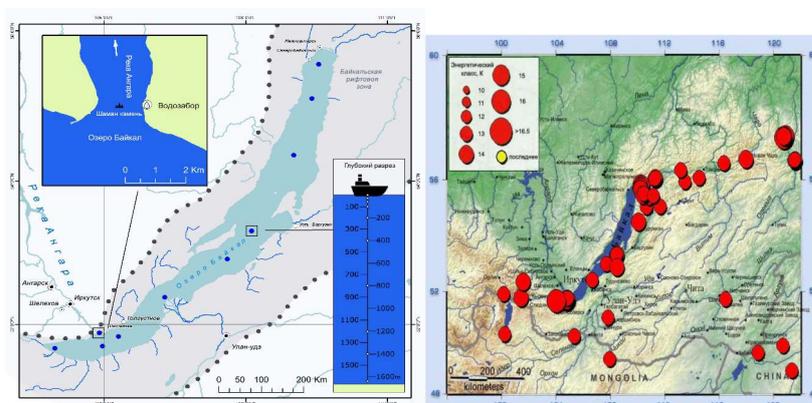
Территория АМЗ остается опасной зоной для проведения непосредственно на ней какой-либо хозяйственной деятельности. Находящийся на глубине глинистый горизонт почв служит мощным геохимическим барьером для проникновения остатков As и тяжелых металлов в подземные воды и попадание их в р. Ангару. Установлена иммобилизация Hg в органической, прочносвязанной и сульфидной фракциях, что свидетельствует о слабой ее подвижности в почвах. Полученные результаты экспериментов с почвенными бактериями подтвердили ранее проведенные исследования о возможности использования штаммов *B. megaterium* и *B. mucilaginosus* для поддержания продуктивности почвы, а также для разработки биотехнологий для биоремедиации почв, загрязненных мышьяком. Изучение взаимодействий тяжелых металлов и биопленок может быть полезно для управления жизнью естественных популяций микроорганизмов, а также в области нанотехнологий и биотехнологий, связанных с восстановлением почв, растениеводством и медициной.

3 Природные аномальные изменения в воде Байкальской экосистемы

3.1 Введение

Известно, что катастрофические изменения в окружающей среде могут быть вызваны не только техногенными, но и природными катаклизмами. Такие события наблюдались ранее, а также в последние годы в Байкальском регионе в районе озера Байкал и его окружения. Крупнейшее в России озеро Байкал содержит 20% мировых запасов поверхностной пресной воды и включено в объекты Всемирного природного наследия, охраняемого ЮНЕ-

СКО. Озеро находится в Байкальской рифтовой зоне (рисунок 11), которая протягивается из западной Монголии вдоль оз. Байкал к южной Якутии и выделяется повышенным уровнем сейсмичности.



А

Б

Рисунок 11 – Схема отбора проб воды в Байкальской водной экосистеме (А) и землетрясения в Байкальской рифтовой зоне (Б)

В районе Байкала установлена неустойчивость напряженно-деформированного состояния литосферы, проявляющаяся в довольно частых землетрясениях (более 1000 в год) и геодинамических подвижках земной коры. Средняя мощность земной коры в Байкальской рифтовой зоне составляет около 45 км, но под оз. Байкал её толщина уменьшается до 36 км, а Южно-Байкальская впадина выделяется резким уменьшением мощности коры, максимальной раздробленностью фундамента, большим количеством разнонаправленных разломов и землетрясениями различной интенсивности (рисунок 11). Именно в этом районе (пос. Листвянка) с 1997 года Институт геохимии СО РАН проводит основные мониторинговые исследования химического состава воды в оз. Байкал и его стоке – истоке реки Ангары.

К настоящему времени собрана аналитическая информация примерно по 700 пробам воды Байкальской водной экосистемы (вода Байкала, истока Ангары и некоторых притоков Байкала) (рисунок 11). Особый интерес представляет исследование содержания ртути в воде, что связано как с ее специфическими химическими свойствами и высокой биоактивностью, так и с возможностью поступления ртути из разломов Байкальского рифта [10-12].

3.2 Материалы и методы

Химический анализ воды на определение ртути выполнен в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии СО РАН. Содержание ртути в воде про-

водится атомно-абсорбционным методом с непламенным определением паров восстановленной атомарной ртути на приборе РА-915+ с приставкой РП-91. Контроль точности измерений прибора осуществлялся путем ежегодного тестирования и регулировки прибора предприятием изготовителем (ЛЮМЭКС, гор. Санкт-Петербург). В истоке Ангары с 1997 по 2006 г. отбор проб и анализ воды осуществлялся подекадно, а с 2006 по 2021 годы – ежемесячно. Перерыв в опробовании приходится на период 2014–2016 гг.

3.3 Результаты и обсуждение

На графиках вариаций во времени концентраций ртути в воде видно, что самые значительные максимумы и повышенный разброс данных наблюдался в 1997-2000 гг. (рисунок 12). Этот период П.В. Коваль назвал «ртутным дыханием Байкала» [10]. В последующие 2001–2006 годы волатильность данных постепенно уменьшается, и имеются отдельные максимумы содержания ртути в 2002, 2004 и 2006 годах. С 2007 года наблюдается низкий уровень ртути в воде, разброс данных минимален и на общем квазистационарном фоне видны небольшие максимумы в 2007, 2009 и 2012 годах. Для оценки значимости указанных максимумов определено среднее значение содержания ртути и его стандартное отклонение за полный период времени 1997–2013 гг. и за квазистационарный период 2007–2013 гг. Среднее содержание ртути по общей выборке данных 1997–2013 гг. равно 0,0025 мкг/л при стандартном отклонении $\sigma=0.0037$ мкг/л. Эти оценки позволяют детерминировать линией “2 сигма” на рисунке 12 отдельные максимумы и группы максимумов концентрации ртути на уровне значимости не ниже 0,05 в период 1997–2006 годы. Среднее содержание ртути по выборке данных 2007–2013 гг. равно 0,0007 мкг/л при стандартном отклонении $\sigma=0,0006$ мкг/л, что

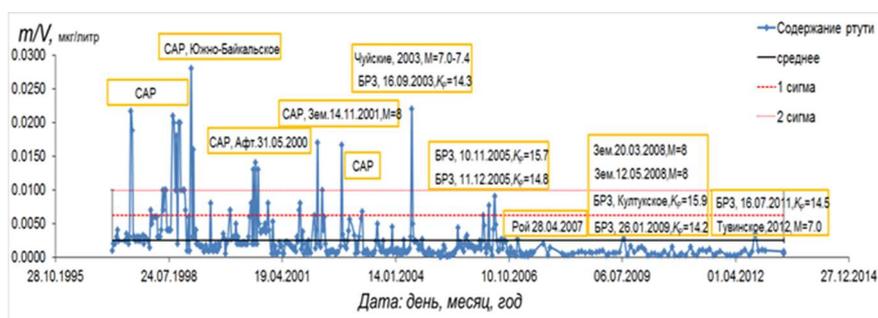


Рисунок 12 – Источники сильных геодинамических воздействий, сформировавших значимые максимумы содержания ртути в воде истока Ангары [11, 12]

позволяет детерминировать линией “2 сигма” в 2007, 2009 и 2012 годах максимумы концентрации ртути на уровне значимости не ниже 0,05.

Максимальный уровень и повышенная изменчивость содержания ртути в 1997–2000 гг. совпадают с активизацией землетрясений в южной части Байкальской рифтовой зоны (на расстоянии 26 км от пункта отбора воды) [11, 12]. Эти факторы послужили главной мотивацией для сопоставления времени активизации структур рифтогенеза и реализации сильных землетрясений со значимыми максимумами содержания ртути в воде истока р. Ангара. Известно, что сильные геодинамические воздействия на метастабильную разломно-блочную литосферу Байкальского рифта могут приводить к кратковременному раскрытию локальных участков шовной зоны глубинных разломов и вызывать изменения флюидного режима. Шовные межплитные границы имеют каналы повышенной флюидопроводности, которые способны дренировать “аномальную” низкоскоростную мантию, имеющую флюидную природу [13]. Флюидизация верхних частей мантии способствует их плавлению с приращением объема, чему содействует также снижение всестороннего давления при раскрытии локальных участков зоны краевого шва. Это, в свою очередь, приводит к активизации рифтогенеза, инверсиям осей напряжений в литосфере Байкальской рифтовой зоны, реализации сильных землетрясений и к возможному вскипанию и дегазации ртути с быстрым подъемом на поверхность по зонам раскрытых (вертикальных) разломов.

При проверке возможной связи повышенного содержания ртути в воде с динамическим воздействием от сильных землетрясений были приняты во внимание сейсмические события различных магнитуд, произошедшие с 1997 по 2013 гг. на разном удалении от истока р. Ангара и последние землетрясения в 2018–2020 гг.

График среднего по годам содержания ртути имеет понижающийся во времени тренд (рисунок 12). Величина стандартного отклонения изменяется от 0,0059 мкг/л до 0,00014 мкг/л, что указывает на кардинальное различие динамики процесса в начале (сильные флуктуации, процесс неустойчив) и в конце мониторинга (слабые флуктуации, процесс квазистационарен). Осредненные данные аппроксимируются степенной зависимостью и при показателе степени -0,82 имеют высокий коэффициент корреляции $\rho \approx 0,84$. При экстраполяции графика в сторону уменьшения временного периода происходит рост уровня содержания ртути: на временном интервале месяц и полмесяца прогнозные значения содержания ртути составляют около 0,36 мкг/л и 0,64 мкг/л. Однако эти оценки указывают на то, что при мощном геодинамическом воздействии в локальных областях флюидной разрядки разломов содержание ртути кратковременно может быть значительно выше предельно допустимых concentra-

ций для водоемов рыбохозяйственного использования (0,01 мкг/л) и водоемов питьевого водоснабжения (0,5 мкг/л). Фоновое содержание ртути в воде Байкала $\leq 0,0005$ мкг/л.

Возможно, что такое явление соответствует действительности, так как случаи массовой гибели нерпы в отдельных местах Южно-Байкальской впадины описаны в прессе.

Анализ ртути в воде Байкальской экосистемы после перерыва в 2014–2016 гг. был продолжен в 2017–2020 гг. (рисунок 13). Геодинамические подвижки и землетрясения фиксировались в 2017–2020 гг. и ощущались жителями Иркутска. В 2017 г. на берегах Байкала была найдена погибшая нерпа (рисунок 14).

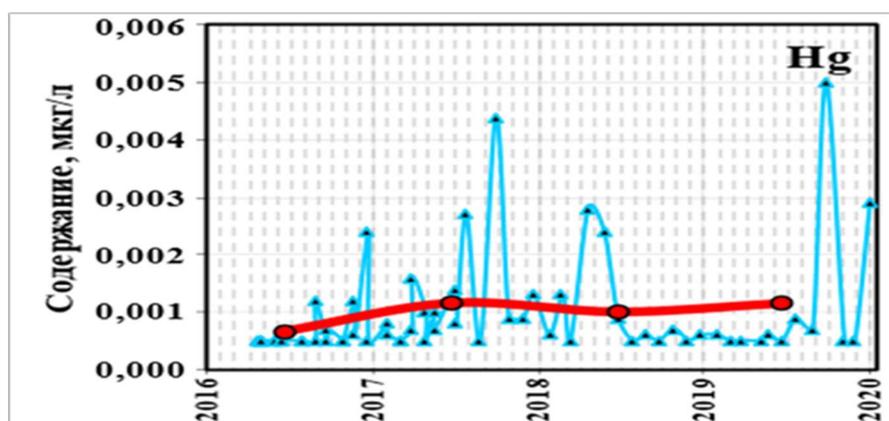


Рисунок 13 – Распределение концентраций ртути в воде истока Ангары в 2017–2020 гг. (синие треугольники – ежемесячные данные, красные – среднегодовые)

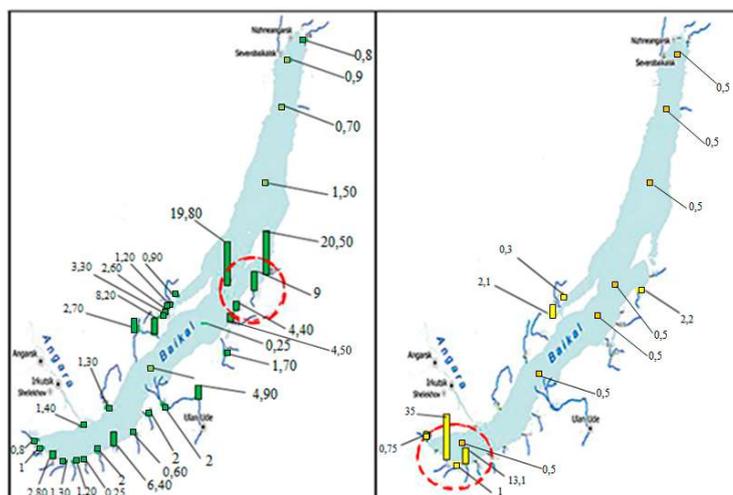


Рисунок 14 – Распределение концентраций ртути ($n \cdot 10^{-3}$) в воде Байкала, в истоке Ангары и в устьях притоков весной 25 мая 2018 г. (зеленые столбики) и осенью 27 августа 2018 г. (желтые столбики), близко совпадающее по времени к происходящим землетрясениям и найденной на берегах Байкала погибшей нерпы (красный пунктир)

3.4 Выводы

Таким образом, установлено, что все значимые максимумы содержания ртути в воде являются откликами на сильные геодинамические воздействия. Прогнозные оценки тренда среднегодового содержания ртути указывают на возможность существенного повышения концентрации ртути в локальной области флюидной разрядки разлома при мощном геодинамическом воздействии. В качестве механизма реализации предположено, что раскрытие локальных областей глубинных разломов при сильном геодинамическом воздействии приводит к декомпрессии со вскипанием, дегазацией ртути и быстрым подъемом на поверхность по зонам раскрытых разломов. Проведенные исследования показали, что состояние и сохранение воды Байкальской водной экосистемы зависит и от природных катаклизмов. Последние землетрясения были в сентябре и декабре 2020 г. и отразились повышением ртути в воде истока Ангары (рисунок 13). В связи с этим необходимо продолжение постоянных геохимических и геодинамических исследований в мониторинговом режиме.

4 Обобщение текущих и ретроспективных результатов анализа ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе южного Прибайкалья и планктона южного Байкала

4.1 Введение

Полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды входят в группу стойких органических загрязнителей и подпадают под действие Стокгольмской, Роттердамской и Базельской конвенций, подписанных и ратифицированных Россией. СОЗ чрезвычайно устойчивы в окружающей среде, способны воздушным и водным переносом транспортироваться за сотни и тысячи километров от мест их применения или синтеза, оказывают негативное воздействие на живые организмы [14]. В настоящее время список СОЗ состоит из 30 различных соединений и их классов.

Первые исследования СОЗ в Байкале начаты в начале 80-х годов прошлого века [15] и продолжаются по настоящее время. Наиболее исследованными являются представители высших трофических уровней (байкальская нерпа, омуль, реже голомянки). Показано уменьшение концентраций СОЗ с юго-запада на северо-восток, а также исключительно высокая значимость соединений группы ПХБ и ДДТ для Байкала [16–19]. Для долговременных наблюдений СОЗ в Байкале до настоящего времени использовалась байкальская нерпа. Полученные данные дают общее представление о состоянии озера в отношении СОЗ. Для того чтобы получить представление о процессах, происходящих с СОЗ по котловинам и по годам требуется наблюдения за гидробионтами, накапливающими токсиканты, в течении месяцев

или одного, двух лет. Используя для этих намерений зоопланктон, можно получить список разовых измерений за много лет и иметь представление о процессах, формирующих общий фон загрязнения по котловинам

Для контроля выполнения обязательств по Стокгольмской конвенции по СОЗ 2001 года, на встрече сторон Конвенции было рекомендовано проводить многолетние исследования в некоторых объектах окружающей среды, включая атмосферный воздух [14]. Первые исследования ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе в городах Прибайкалья (Иркутск, Ангарск, Байкальск, Усолье-Сибирское) получены с использованием метода активного пробоотбора воздуха в конце 1980-х гг. [20] и в акватории Байкала и в Иркутске и Листвянке в 1991 г. [21, 22]. В 2008–2009 гг. в рамках международного гранта РФФИ-ГФЕН сотрудниками ИГХ СО РАН начаты исследования с использованием метода пассивного пробоотбора в населенных пунктах Азиатской территории России, включая Иркутскую область [23, 24].

Цель настоящей работы: изучить временные изменения содержания ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе южного Прибайкалья и планктона южного Байкала.

4.2 Материалы и методы

Пробы планктона отбирались планктонными сетями (мельничный газ №70) сотрудниками института биологии Иркутского государственного университета с 1979 г. и нами в ходе ежемесячных наблюдений 2003–2004 гг. на стационарной точке в 12 км на юг от мыса Половинный в южном Байкале. Преобладающими компонентами планктона были ракообразные: *Epischura baikalensis* и *Cyclops kolensis*. Пробоподготовка включала в себя лиофилизацию отобранных проб в количестве до 100 г сырого веса, измерение содержания липидов весовым методом. Процедуры очистки включали в себя очистку от липидов гелепроникающей хроматографией и других мешающих примесей, на гибридной колонке, состоящей из слоев окиси алюминия и силикагеля активированных перед этим в токе высокочистого азота в муфельной печи. Более подробно методика изложена в работе [19].

Исследования ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе проводились с использованием метода пассивного воздушного пробоотбора [25]. Пробоотборники устанавливаются с осени 2010 г. по настоящее время на двух станциях: в рекреационной зоне гор. Иркутска (город) и в садоводстве Шелеховского района (условно пригород, ~30 км от Иркутска). Время каждого периода постановки пробоотборника составляло в среднем 65 дней на обеих станциях. После экспонирования диски-картриджи хранились при температуре -20°C и анализировались по методу, включающему экстракцию метиленом хлористым в аппаратах Сокслетта в течении 8

ч, очистку на колонке с окисью алюминия, силикагелем и сульфатом натрия ($Al_2O_3 - SiO_2 - SiO_2 + H_2SO_4 - Na_2SO_4$), выпаривание на роторном испарителе с доупариванием в токе азота [23]. Для контроля качества анализа и пробоотбора использован метод полевых и лабораторных бланков. При расчетах концентрации CO_3 в воздухе проводили коррекцию по бланку, также использовали программу расчета [26]. Во всех пробах определяли 39 конгенов ПХБ, а также пестициды pp' -ДДТ и его метаболиты pp' -ДДД, pp' -ДДЭ, α - и γ -ГХЦГ и ГХБ. Анализ проводился с использованием газового хроматографа HP 5890 series II оборудованного электрозахватным детектором. Статистическая обработка результатов проведена с использованием программы STATISTICA'6.0.

4.3 Результаты и обсуждения

Планктон южного Байкала. Было получено, что с 1979 по 2004 гг. содержание CO_3 в зоопланктоне Южного Байкала сильно менялось год от года и от компонента к компоненту. В 1982, 1984, 1988, 1993, 1997 годах отмечались высокие значения отдельных CO_3 (рисунок 15).

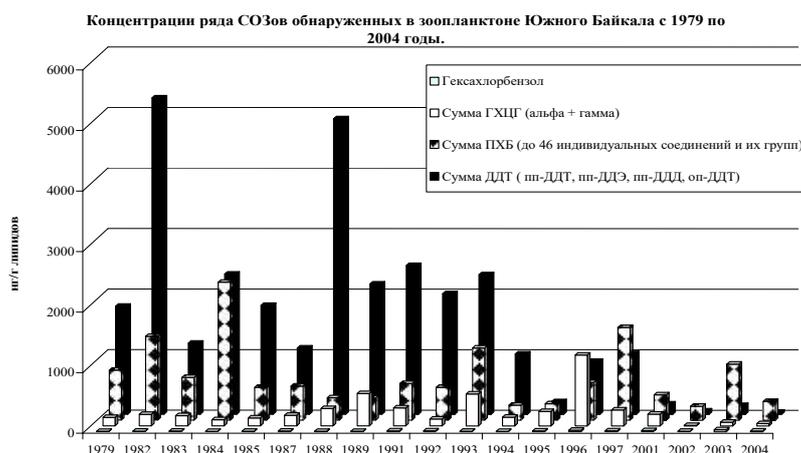


Рисунок 15 – Концентрации ряда CO_3 , обнаруженных в зоопланктоне Южного Байкала с 1979 по 2004 гг.

Сравнивая долговременные тренды изменений концентраций CO_3 с 1979 по 2017 годы в разных представителях байкальской фауны, есть все основания полагать, что максимальное воздействие CO_3 на Байкал пришлось на 80-е годы прошлого века, а последние 20 лет в южном Байкале ситуация существенно не меняется. ГХЦГ практически перестали определяться в пробах биоты озера, а концентрации ПХБ и ДДТ не имеют каких-либо тен-

денций к изменению и находятся на том минимальном уровне, которое было определено в 2000–2004 годах. Планктон Байкала способен сравнительно быстро реагировать на изменение концентрации стойких органических загрязнителей в воде. Время установления равновесных концентраций со средой обитания составляет не более месяца, а может быть и меньше (рисунок 16).

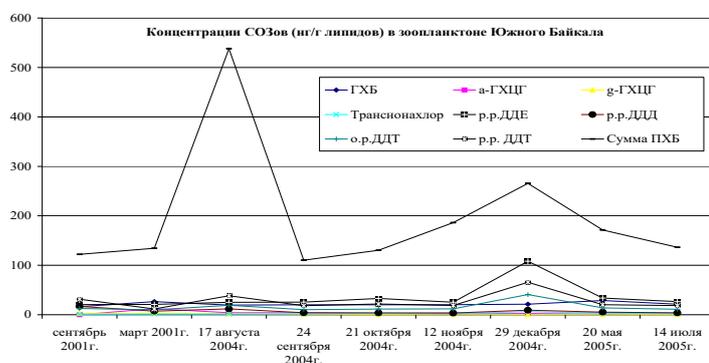


Рисунок 16 – Пример залпового поступления ПХБ в августе 2004 года; уже через месяц наблюдается 5 кратное уменьшение концентраций

Разница концентраций между сезонами максимальна между августом–сентябром и мартом, составляя до 3 крат. Наивысшие концентрации приходятся на период наименьшей численности планктона в подледный период. В виду высокой чувствительности на присутствие СОЗ в водах озера, любая значительная техническая авария, происходящая с выбросом СОЗ в Байкал, может быть зафиксирована обнаружением высоких концентраций СОЗ в планктоне, как это показано на рисунке 16. Тем не менее, если прекратится поступление загрязняющих веществ в водоем, концентрации СОЗ в планктоне так же будут понижаться за счет разбавления и перехода СОЗ по трофической сети. Таким образом, для целей мониторинга анализ СОЗ в планктоне может быть применен только для текущего определения ситуации. Те значительные межгодовые колебания концентраций СОЗ, что были обнаружены нами в архивных пробах планктона, в сумме дают некоторое представление о процессах поступления СОЗ в Байкал, тем не менее, понять, как и какой силы происходит отклик на поступившее загрязнение, можно только используя для мониторинга гидробионты более высоких трофических уровней. И эти работы должны будут привести нас к комплексному пониманию процессов миграции СОЗ в экосистеме озера Байкал.

Проведенные исследования СОЗ в атмосферном воздухе гор. Иркутска и в 30 км от гор. Иркутска в Шелеховском районе (условно – пригород гор. Иркутска) с 2010 г. показали,

что полученные уровни CO₃ сравнимы или ниже, чем в воздухе других промышленных городах и удаленных районах России и в других регионах мира [27, 28]. Содержание ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе в г. Иркутске и его пригороде) значительно ниже гигиенических нормативов в атмосферном воздухе, принятых в России (ДДТ – 0,001, ГХБ – 0,013, ГХЦГ – 0,001 и ПХБ – 1 мг/м³ [29, 30]. Концентрации ПХБ и ХОП в воздухе в рекреационной зоне г. Иркутска выше, чем в воздухе пригорода ($p < 0,05$).

Сравнение современных результатов исследования с полученными ранее данными [20, 21] показало следующие изменения концентраций в гор. Иркутске:

– концентрации α - и γ -изомеров ГХЦГ в 2010-х гг. в 80 (15–30) и 310 (9–24) раз, соответственно ниже найденных в 1991 г., и сравнимы с полученными в 2008–2009 гг. (рисунок 17). Соотношение изомеров α/γ -ГХЦГ также несколько снизилось (4,6 в июне 1991 и 3,6 - медиана для 2010-х гг. и 2,7 (2,3–3,3) в мае-июне-июле 2010х гг.);

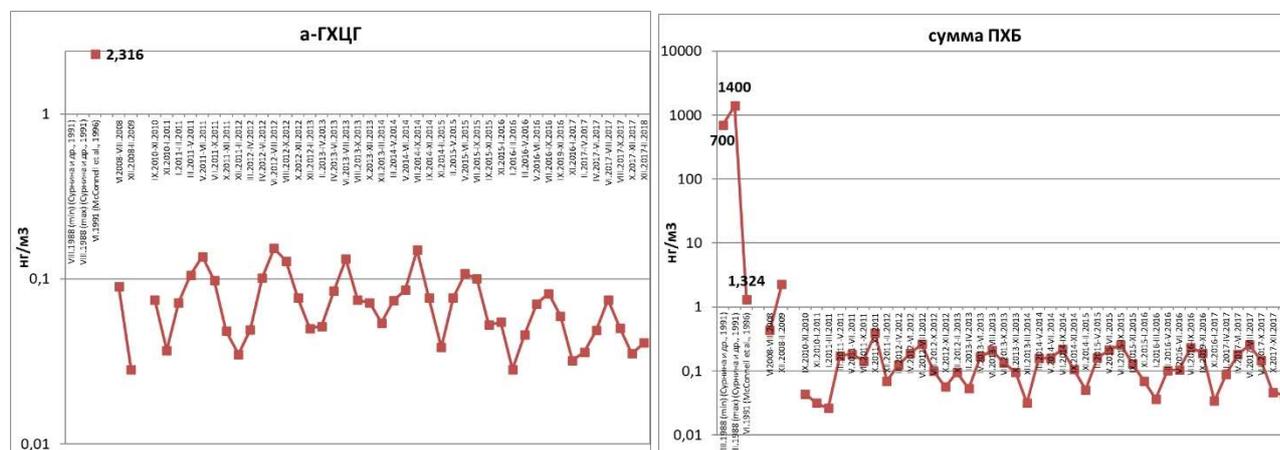


Рисунок 17 – Изменение концентраций α -ГХЦГ и суммы ПХБ в атмосферном воздухе г. Иркутск с 1980-х гг.

– концентрации pp' -ДДТ и pp' -ДДЭ в воздухе в период май-июль в отдельные годы первой половины 2010-х гг. были выше в 2–3 раза, чем в июне 1991 г. [21], а к середине 2010-х гг. снизились и стали сравнимыми с ними;

– содержание ПХБ в 2010-х гг. по сравнению с величинами в конце 1980-х гг. уменьшились на 4–5 порядков, а концентрации ПХБ в мае-июле в 2010-х гг. сравнимы с уровнями в июне 1991 г. (рисунок 17). В 2010–2011 гг. концентрации ПХБ несколько выше, чем в последующие года, а также нарушена сезонная закономерность распределения, что, вероятно, обусловлено влиянием временного повышения концентраций на значительной территории Азии в 2008–2010 гг., выявленного в аналогичных исследованиях CO₃ в атмосферном возду-

хе на станциях в северном Прихубсугулье [31], в азиатской территории России [23] и в Китае [32];

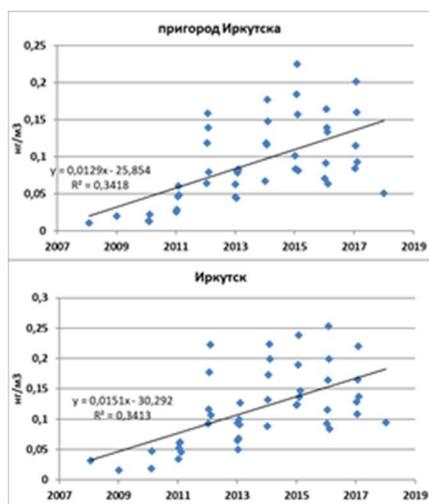


Рисунок 18 – Изменение концентраций ГХБ в атмосферном воздухе южного Прибайкалья (нг/м³)

– определение ГХБ в воздухе в 1980–1990-х гг. не проводили, поэтому рассматриваем изменения концентраций ГХБ только с 2008–2009 гг. За данный промежуток времени для ГХБ, в отличие от остальных изученных СОЗ, отмечено достоверное постепенное увеличение концентраций в воздухе на обеих станциях ($p < 0,05$) (рисунок 18).

При рассмотрении внутригодовой изменчивости распределения ПХБ и ХОП данные за 2011 г. были исключены, т.к. в это время еще отмечено остаточное влияние эпизода временного повышения концентраций СОЗ в атмосферном воздухе на значительной территории Азии неизвестного происхождения (рисунок 19).

В последующие года прослеживается хорошо выраженная сезонная закономерность распределения концентраций ПХБ и ХОП (рис. 19), обусловленная влиянием температурного фактора. Цикл изменений практически для всех изученных соединений составляет 5,5-6 периодов постановок пассивных воздушных пробоотборников, что соответствует циклу ~ 1 год. В теплое время года концентрации повышаются в результате испарений с поверхностей и атмосферного переноса с территорий, где эти вещества еще используются. В холодное время испарение с поверхностей и атмосферный перенос значительно снижается, что, соответственно, уменьшает концентрации ПХБ и ХОП в воздухе.

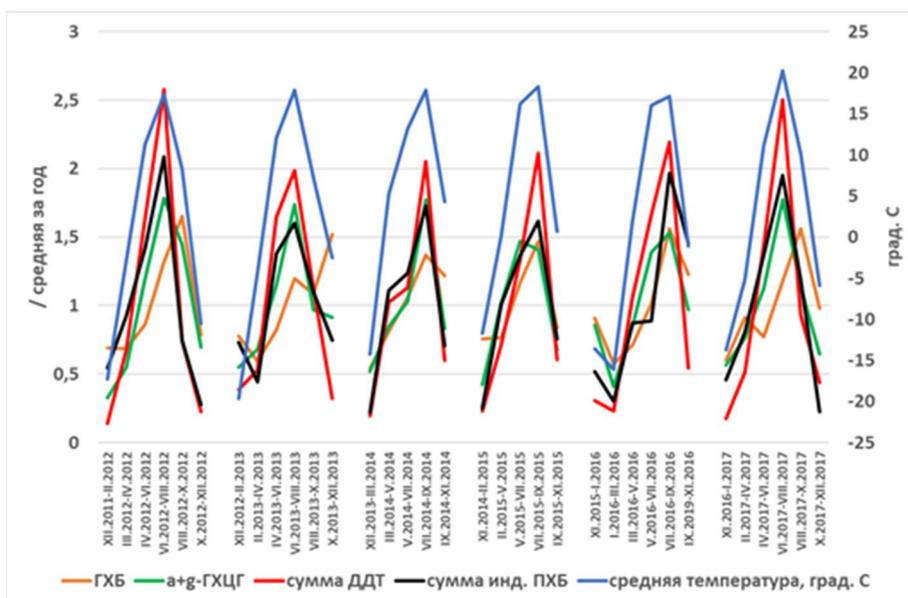


Рисунок 19 – Внутригодовая изменчивость ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе в гор. Иркутск (относительные величины: концентрации отнесены к средней за соответствующий год) и средняя температура воздуха в период постановки пробоотборников (°С)

4.4 Выводы

1. Обобщены данные содержания СОЗ (ПХБ, ДДТ, ГХЦГ) в южном Байкале с 1979 по 2004 гг. Найдено, что использование планктона для мониторинговых целей возможно только для оценки состояния системы в период, не превышающий месяца. Межгодовые и межсезонные колебания находятся в пределах пятикратных величин. Межгодовые колебания связаны с общим поступлением СОЗ в текущий год, межсезонные, дополнительно с динамикой численности планктона. При увеличении численности зоопланктона концентрации СОЗ падают (август–сентябрь), в ледовый период (март) минимального развития планктона возрастают до максимальных величин. Наивысшие концентрации СОЗ в планктоне южного Байкала пришлись на 1980-е годы и достигали 1,67 мкг ПХБ на 1 грамм липидов, 3 мкг *pp'*-ДДТ на 1 грамм липидов. Все поступление ПХБ и ДДТ происходило исключительно от локальных источников.

2. Проведенные исследования ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе в южном Прибайкалье показали, что полученные уровни изученных соединений в 2010-х гг. сравнимы или ниже, чем в воздухе других промышленных городах и удаленных районах России и в других регионах мира. Концентрации ПХБ и ГХЦГ в атмосферном воздухе южного Прибайкалья значительно снизились с конца 1980-х гг. В 2010-х гг. концентрации всех исследованных ПХБ и ХОП, кроме ГХБ, или незначительно снижались, или оставались на примерно одном уровне. Концентрации ГХБ за этот же период достоверно повышаются. Отмечена циклич-

ность во внутригодовых изменениях концентраций ПХБ и ХОП, связанная с влиянием температурного фактора.

5 Пространственно-временная изменчивость экосистем и климата Восточной Сибири в позднем плейстоцене-голоцене

5.1 Особенности седиментогенеза в оз. Хикушка (Окинское плато)

5.1.1 Введение

Оз. Хикушка является каровым, проточным озером и находится в верховьях пади Хи-Гол (абс. выс. 1956 м), (Рисунок 20). Площадь его водной поверхности составляет 0,3 км², глубина достигает 42 м. Котловина оз. Хикушка имеет крутые скалистые склоны, основания которых покрыты коллювиальными шлейфами и курумами, спускающимися в озеро. Грубо-обломочные породы на дне водоема быстро замещаются глинистыми отложениями. Цель исследований – изучение вещественного состава, ассоциаций и кристаллохимических характеристик глинистых минералов в донных осадках оз. Хикушка для реконструкций условий осадконакопления в позднем плейстоцене - голоцене.

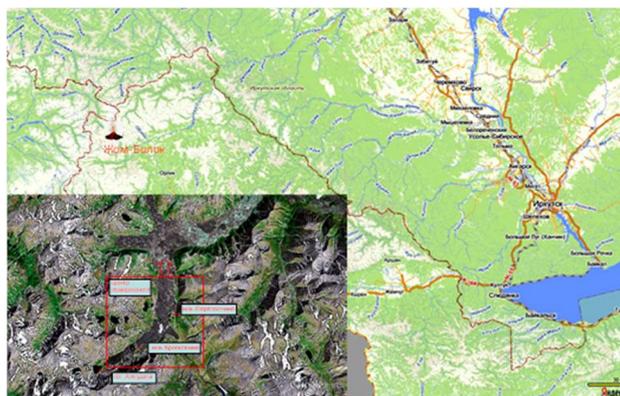


Рисунок 20 – Местоположение оз. Хикушка в пределах Жомболокского вулканического района, Восточный Саян

5.1.2 Материалы и методы

Керн донных отложений длиной 124 см отобран с глубины 32 м в центре озера керноотборным устройством ударно-канатного типа UWITEC (Австрия). Разрез донных отложений имеет двучленное строение. В интервале 88–124 см залегают однородные алеврито-глинистые осадки светло-оливкового цвета с соотношением фракций: мелкий алеврит – 45–50% и пелит – 50–55%. Выше по разрезу (0–88 см) залегает толща глинистых алевритов, насыщенных диатомеями, цвет осадков – от светло-серого до серого, текстура массивная.

Для оценки возраста отложений были получены пять AMS¹⁴C датировок по общему органическому веществу в лаборатории радиоуглеродного анализа в гор. Познань (Польша). Датировки показывают, что вскрытый разрез донных отложений оз. Хикушка формировался в последние 13800 лет [33].

Литолого-минералогические исследования донных отложений озера проводились комплексом методов, включающим рентгеновскую дифрактометрию (XRD), ИК-спектроскопию, лазерную гранулометрию, рентгенофлуоресцентный анализ, сканирующую электронную микроскопию, выполненных в «ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН» Института геологии и минералогии СО РАН, гор. Новосибирск. Интервал опробования составил 3 см. Рентгеновские исследования (XRD анализ) проводились на дифрактометре ARL X'TRA (излучение Cu K α).

5.1.3 Результаты и обсуждение

Детальное изучение состава образцов донных отложений методом СЭМ подтвердило, что преобладающими минералами в них являются полевые шпаты (битовнит, андезин, олигоклаз и, в меньшей степени, калиевый полевой шпат), кварц, амфибол (актинолит), хлорит с переменным содержанием Fe и Mg, в подчиненном количестве присутствуют мусковит, встречаются биотит, пироксен (авгит), эпидот. Акцессорные минералы представлены апатитом, ильменитом, титанитом, цирконом, магнетитом. Отмечаются срастания зерен ильменита, титанита, рутила, изредка – монацита, пирита, торита

Результаты комплексного изучения донных отложений оз. Хикушка позволили выделить 5 стадий эволюции озера.

Стадия I (124-88 см, 13800-11700 л.н.) характеризует начало формирования оз. Хикушка. В осадках накапливаются аутигенные тонкодисперсные (размеры доменов 4–15 слоев) глинистые минералы – иллит и смешанослойный иллит-сметтит (до 50% от суммы слоистых силикатов) и Fe,Mg-хлорит, что подтверждается повышенным содержанием Fe₂O₃ в образцах. В стадию II (88–62 см, 11700–10000 л.н.) с наступлением голоценового потепления в озере начинают накапливаться биогенно-терригенные илы. К этому времени ледник растаял, и основными источниками питания озера стали стекающие с обрамления озера талые и дождевые воды. Изменение режима питания привело к снижению уровня воды в озере. Эта стадия характеризуется благоприятными условиями для развития экосистемы водоема, в которой повысилось содержание SiO₂_{био}, среди слоистых силикатов стали преобладать Mg,Fe-хлориты и хлорит-сметтиты - продукты выветривания коренных пород обрамления озера.

Такие изменения согласуются с общим потеплением климата северного полушария и наступлением более теплых летних сезонов из-за орбитально-обусловленного повышения летней инсоляции. В стадию III (10000-6000 л.н.) происходит снижение концентраций $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ (рисунок 21), что предполагает формирование менее продуктивной системы оз. Хикушка. Растет содержание хлорит-сметкита и хлорита (до 55% от суммы слоистых силикатов). Эта стадия характеризуется максимальной активностью влажного азиатского муссон, повышается общее увлажнение [34], что приводит к выпадению обильных зимних осадков и охлаждению вод озера. В стадию IV (6000–3000 л.н.) озеро постепенно мелеет, за счет лучшего прогрева толщи воды создаются благоприятные условия для образования биогенного кремнезема и аутигенного минералообразования. Стадия V (позднее 3000 л.н.) характеризуется более суровой природно-климатической обстановкой, чем предыдущая. В осадках отмечается высокое содержание иллита и хлорита (~55% от от суммы слоистых силикатов). Следует отметить, что, судя по росту содержания в разрезе TiO_2 и P_2O_5 , эта стадия совпадает с последним этапом вулканической активизации в Жомболокском районе [35].

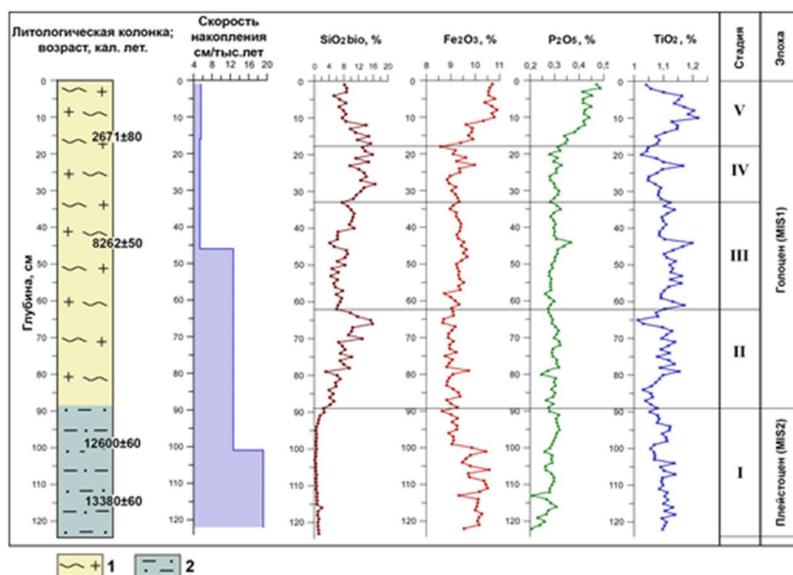


Рисунок 21 – Литологическая колонка донных отложений озера, значения калиброванного возраста, скорости осадконакопления, распределения ряда элементов ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$, Fe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5), климатические стадии: 1 - биогенно-терригенный ил; 2 – однородные алевритоглинистые осадки

5.1.4 Выводы

Проведенные исследования позволили установить, что позднеплейстоцен-голоценовое осадконакопление в высокогорном оз. Хикушка находилось под влиянием как

климатических, так и геологических факторов. Климат контролировал деятельность ледников, колебания уровня озера, биопродуктивность бассейна. Геологические факторы включают состав пород водосбора и позднечетвертичный вулканизм. Показано, что значимыми источниками информации об изменениях обстановок осадконакопления в оз. Хикушка послужили ассоциации слоистых силикатов, их соотношения в разрезе и кристаллохимические характеристики, а также содержание биогенного кремнезёма и некоторые геохимические индикаторы.

5.2 Первые свидетельства катастрофического паводкового события в озере Номто-Нур (Восточный Саян) в позднем голоцене

Цель исследований - реконструкция гидрологического режима оз. Номто-Нур в позднем голоцене. Для этого были решены следующие задачи: измерен гранулометрический состав, магнитная восприимчивость, содержание общего органического вещества как процент потерь при прокаливании при 550°C, рассчитаны влажность и плотность отложений (рисунок 22).

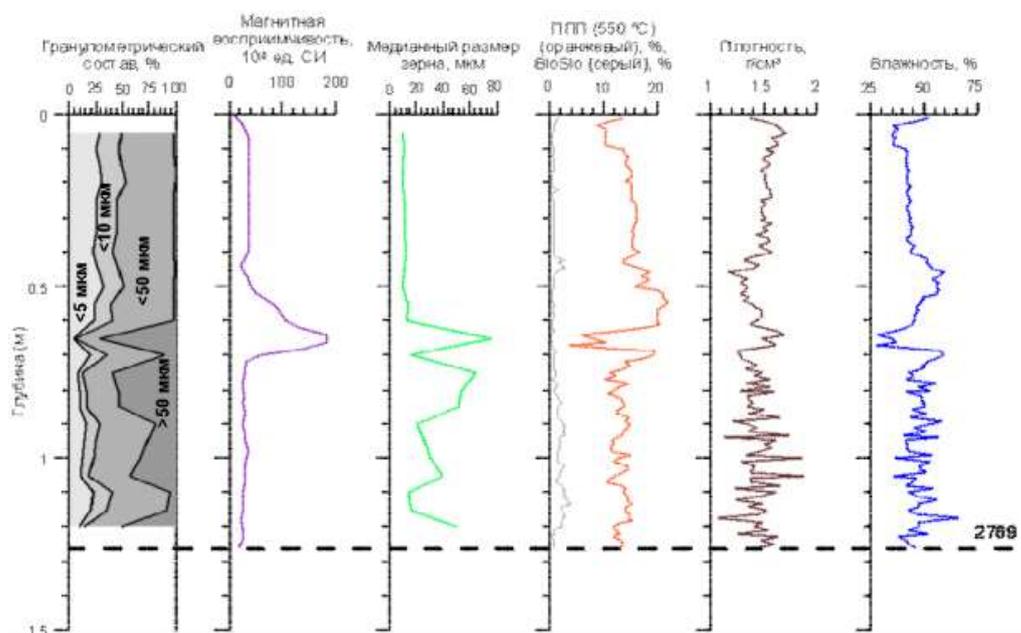


Рисунок 22 – Распределение изученных параметров в керне донных отложений оз. Номто-Нур; более тёмный фон на графике гранулометрического состава соответствует более крупным фракциям

Озеро Номто-Нур расположено в болотистой пойме р. Сенца и имеет связь с основным руслом реки через небольшую протоку. Калиброванное значение возраста основания

128-сантиметрового керна составило 2769 кал. лет, означая, что это озеро образовалось во второй половине позднего голоцена. Результаты гранулометрического анализа стали основой выделения четырех наиболее значимых размерных фракций отложений: <5 мкм (мелкая пелитовая), 5–10 мкм (крупная пелитовая), 10–50 мкм (мелкоалевритовая), >50 мкм (крупноалевритовая с мелкозернистым песком).

Повышенное содержание частиц крупноалевритовой-мелкопесчаной фракции и, соответственно, медианного размера зерен, а также значений $\text{SiO}_{2\text{био}}$ в отложениях нижней части керна, 128–70 см (рисунок 22) может предполагать существование относительно продуктивной мелководной озерной системы с активным гидрологическим режимом из-за почти постоянной связи с рекой из-за относительно высокого уровня речных вод. Вероятно, точка бурения, которая сейчас находится почти в центре озера, тогда могла находиться в его литоральной части. Возможно, что в весенне-летние сезоны воды р. Сенцы могли способствовать привносу в озеро (в точку бурения) крупноразмерных частицы (>50 мкм, рисунок 22).

На графиках (рисунок 22) видно характерно резкое проявление кратковременного события на глубине 70–65 см. Ему соответствует многократный (почти в шесть раз) и быстрый рост величин магнитной восприимчивости, медианного размера зерна, содержания частиц крупноалевритовой-мелкопесчаной фракций на фоне снижения значений ППП и влажности. Подобное изменение характеристик донных отложений оз. Номто-Нур в интервале 70-65 см может свидетельствовать о крупном, возможно, катастрофическом паводковом событии, изменившем характер питания озера.

Предполагаемое во время формирования слоя 70–65 см наводнение привело к размыву в русле р. Сенца и разовому вбросу в озерные отложения тонкозернистых песков размером более 50 мкм, включавших большой объем магнитосодержащих пород, что, вероятно, и стало причиной многократного повышения МВ отложений.

Позднее паводкового события в интервале 65–0 см происходила аккумуляция более мелкой, чем до наводнения, фракции мелко- и среднеалевритовых илов с несколько более высоким или почти таким же, как и до наводнения, содержанием ППП и более низким – биогенного кремнезема $\text{SiO}_{2\text{био}}$. Повышенное содержание глинистой фракции (менее 10 мкм) в отложениях интервала 65-0 см могло быть обусловлено существованием в это время спокойного, близкого к застойному гидродинамического режима, отсутствием связи озера с рекой (отсутствием крупных паводков). Повышенное содержание глинистой фракции могло приводить к ухудшению условий освещенности (фотосинтеза) для развития кремнистых организмов (диатомовых водорослей) и, соответственно, снижению $\text{SiO}_{2\text{био}}$.

В результате проведенных исследований удалось с использованием комплексного изучения донных отложений пойменного озера впервые для бассейна р. Сенца выявить седиментационные признаки крупного наводнения. Дальнейшие исследования отложений таких озер приведут к более глубокому пониманию причин их формирования и, в целом, особенностей развития речных систем Восточного Саяна в условиях менявшегося режима увлажнения этой территории.

5.3 Изменения природной среды и климата в позднеледниковье и голоцене на территории Монголии и в Байкальском регионе: систематический обзор результатов изучения

Комплексный анализ осадочных летописей позднего квартера в целях реконструкции глобальных и региональных изменений природной среды и климата является одним из наиболее актуальных направлений в современных исследованиях в сфере наук о Земле. На территории Внутренней Азии сосредоточены уникальные разрезы четвертичных отложений, в т.ч., непрерывные, хранящие информацию об изменениях природной среды за длительные интервалы времени. Их активное исследование ведется уже многие десятилетия и к настоящему моменту накоплен огромный массив по большей части разрозненных данных, требующих соответствующего обобщения.

Целью настоящей работы было выполнение систематического обзора опубликованных за последние 50 лет в открытой печати (более 200 литературных источников) результатов изучения динамики природной среды и климата в позднеледниковье и голоцене на территории Монголии и в Байкальском регионе. В анализ были вовлечены стратиграфические, палинологические и палеонтологические материалы, полученные при палеогеографических исследованиях 94 озерных, аллювиальных и субэральных осадочных архивов с надежно геохронологически обоснованным возрастом отложений. Одной из ключевых задач работы было составление унифицированной базы радиоуглеродных датировок из опорных разрезов рассмотренной территории.

В результате были выделены и охарактеризованы важнейшие этапы развития природной среды и климата Монголии и Байкальского региона за последние 15 тысяч лет. Обобщены результаты изучения динамики уровней озерных водоемов Монголии в позднеледниковье и голоцене, описаны общие черты их истории развития. Прослежены пространственные и временные изменения в структуре растительных и животных сообществ рассмотренного региона, отмечены основные тренды их трансформации. Приведена новая биостратиграфиче-

ская схема развития природных условий Монголии в позднечетвертичное время, которая, с одной стороны, согласуется с единой климатической природой изменений, обусловленных глобальными атмосферными циркуляционными процессами, с другой стороны - подчеркивает значение территории Монголии, как переходной климатической зоны от аридного климата пустынь Северного Китая к субгумидным условиям юга Восточной Сибири. Отдельное внимание уделено анализу массового исчезновения ряда основных представителей так называемого мамонтового фаунистического комплекса (мамонта, шерстистого носорога, пещерного льва, пещерной гиены и большерогого оленя). Показаны особенности формирования и распада дисгармоничных фаун – широко распространенных в позднем плейстоцене парадоксальных сообществ млекопитающих, в которых тундровые виды, ныне населяющие приполярные районы, совместно обитали на территории Байкальского региона с представителями аридных полупустынь.

Таким образом, на основе систематического анализа опубликованных в последние десятилетия результатов палеогеографических исследований территории Байкальской Сибири и Монголии нами была выполнена сводная характеристика развития региональных экосистем в позднеледниковье, раннем, среднем и позднем голоцене, происходящего на фоне глобальных изменений климата. Общая направленность и относительная синхронность изменений водного баланса озер, растительности и животного мира в позднечетвертичное время на внутриконтинентальной части Азии могут быть объяснены только глобальными изменениями циркуляционных процессов в атмосфере, в значительной степени определяемых взаимодействием западного переноса воздушных масс и азиатского (тихоокеанского) муссона.

5.4 Комплексные лито-геохимические исследования донных отложений позднплейстоцен–голоценового возраста озера Хубсугул и их методическое обеспечение

Цель исследования - получение детальной записи геохимического состава донных отложений оз. Хубсугул и интерпретация этой записи в терминах вариаций климата в бассейне озера в финале позднего плейстоцена и в голоцене.

Основным методом исследования был рентгено-флуоресцентный с применением синхротронного излучения (РФА СИ). Аналитические работы проведены на станции синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3 ЦКП в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ СО РАН. Положение нижней границы голоцена определено мето-

дом корреляции шкал биогенного кремнезема в кернах с датированными отложениями с таковыми в кернах с недатированными осадками (biogenic silica на рисунке 23)

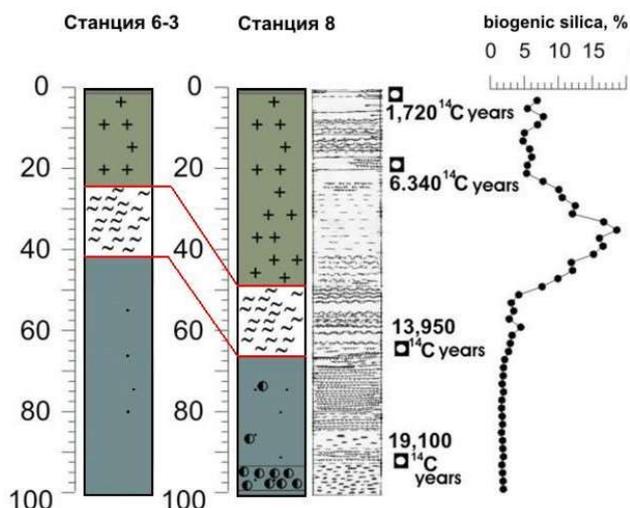


Рисунок 23 – Литологическое строение изученного разреза донных отложений оз. Хубсугул (станция 6-3), необеспеченного на сегодняшний день хронологическим контролем, и разреза станции 8 с надежной возрастной моделью; однотипный литологический состав отложений кернов с обеих станций взят за основу возрастной корреляции обоих кернов до глубины 100 см

Осадки отбирались в депоцентре озера, в точке с теми же координатами отбора кернов донных отложений, где ранее другими исследователями также производилось бурение [36, 37], и для осадочных отложений которых имеются результаты палинологического, альгологического (диатомовые водоросли) анализа, макро-элементного состава (ТОС, ТОН, ^{13}C). На рисунке 23 представлено литологическое строение отложений из керна. Надежная возрастная модель и литологическое описание осадков из керна станции 8 [36, 37] позволили провести возрастную корреляцию полученных разрезов. В литологическом отношении осадки обеих станций сложены диатомовыми илами в верхней части. Далее следует слой ила, насыщенный карбонатным материалом, индикатором которого служит содержание Sr (выделен красными рамками на рисунке 23), далее, вплоть до основания разреза, следует алевритистая глина, насыщенная вкраплениями гидротроилита. Длина обоих кернов почти одинакова (станция 6-3 – 171 см, станция 8 – 172 см).

В результате проведенных работ получены высокоразрешающие записи (каждый миллиметр) распределения элементов: K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ba, W, Pb, Th, U. На рисунке 24 приведены избранные элементы, наиболее информативно отражающие изменения природной среды бассейна оз. Хубсугул в

финале позднего плейстоцена и в голоцене. Индикативное поведение Вг и Sr свидетельствуют о высоком качестве полученных данных. Так, поведение Вг, связанного с поступлением в водоем общего органического вещества с водосборного бассейна озера, может рассматриваться в качестве индикатора биопродуктивности водоема.

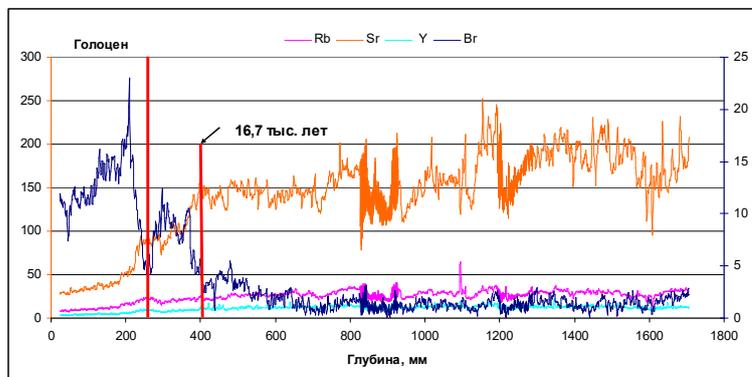


Рисунок 24 – График распределения избранных геохимических показателей изменения природной среды в донных отложениях оз. Хубсугул (станция 6-3); граница между поздним плейстоценом и голоценом показана вертикальной сплошной красной линией; возрастная отметка в 16,7 тыс. л.н. определяет начало позднеледникового времени

Ранее установлено [38], что, как правило, характер поведения шкалы Вг в донных отложениях оз. Хубсугул практически полностью совпадает с кривой распределения биогенного кремнезема ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$). Поэтому, резкое повышение содержания Вг в осадках ст. 6-3 может служить надежным маркером начала интенсивного поступления в озеро общего органического вещества и формирования высокопродуктивной озерной системы в наступлении межледниковых условий голоцена. Поведение Sr свидетельствует о росте поступления терригенной фракции в донные отложения в плейстоцене по мере снижения объемов органического вещества.

На рисунке 25 по распределению К, Са фиксируется повышенное поступление в озеро обломочного материала породообразующих минералов (полевой шпат, плагиоклаз) в финале позднего плейстоцена. Поведение Тi свидетельствует об условиях выветривания на водосборной площади. Так как в ледниковых условиях поступление пелитовой компоненты является величиной относительно постоянной, распределение Тi изменяется незначительно, демонстрируя поступление слабовыветрелой фракции [39].

Вариации представленных элементов и предварительная возрастная корреляция позволяют методом линейной регрессии рассчитать возрастную модель отложений в керне ст. 6-3 до возрастной границы ~ 16,7 тыс. лет. Наличие резких и коротких интервалов в измене-

нии моделей аккумуляции показанных на рисунке 25 элементов в интервале времени моложе 16.7 тыс. л.н. и началом голоцена позволяет сделать вывод, что планируемое AMS¹⁴C датирование отложений в керне ст. 6-3 станет основой выделения стадиально–интерстадиальных переходов позднего плейстоцена.

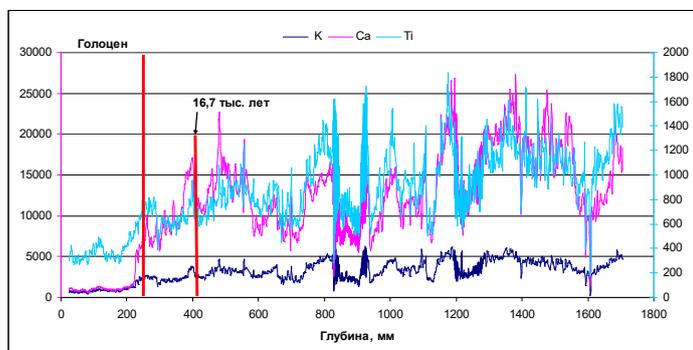


Рисунок 25 – График распределение избранных геохимических показателей изменения природной среды в донных отложениях оз. Хубсугул (станция 6-3); остальные условные обозначения те же, что и на рисунке 24

Распределение железа и марганца в отложениях керна станции 6-3 представленное на рисунке 26, как и для озера Байкал, напрямую связано не только с концентрациями этих элементов в осадке, но и в поровых водах [40]. Процесс аккумуляции этих элементов контролируется окислительно-восстановительными (редокс) условиями, связанными с Fe-Mn окисляющими бактериями в момент прохождения редокс границы при седиментогенезе. Немаловажную роль в этом процессе занимает скорость осадконакопления и размерность частиц осадка, поскольку от этого зависит мощность окислительного слоя. Чем выше скорость осадконакопления, тем, как правило, крупнее тонкая фракция (матрикс) осадка и тем, соответственно, тоньше окислительная зона [41]. В осадках озера Хубсугул постепенное снижение концентраций Fe, Mn позднего плейстоцена к голоцену свидетельствует о потенциальной возможности выделения границы переходов от потеплений к похолоданиям с учетом изменения скорости осадконакопления и размерности частиц осадка.

Для дальнейших детальных лито-геохимических исследований кернов донных отложений озер, в частности редкоземельной группы элементов, авторами отчета отрабатывается методическая база для проведения исследований на станции СИ на накопителе ВЭПП-4М ЦКП в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ СО РАН. Для анализа образцов используется методика измерения концентраций редкоземельных элементов и тяжелых платиноидов в геологических образцах [42]. Для оценки показателей качества

данной методики при анализе геологических образцов были использованы государственные стандартные образцы (ГСО) метаморфического сланца ССЛ-1 и щелочной агпаитовый гранит СГ-3 (Каталог стандартных образцов ИГХ СО РАН, 2013). Выбор стандартных образцов осуществлялся исходя из схожести их составов с составами проб анализируемых объектов.

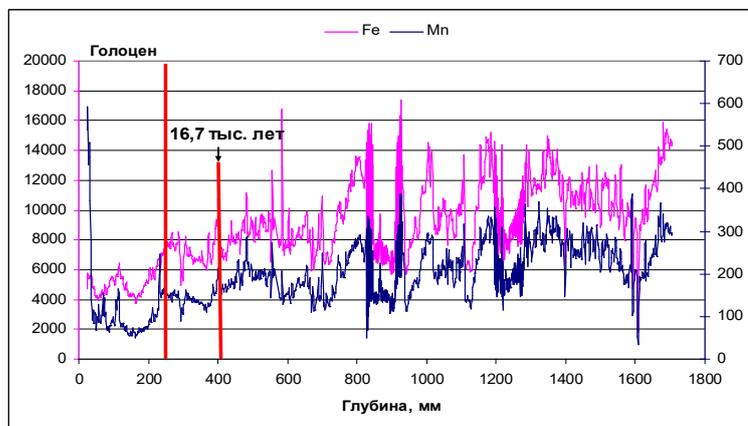


Рисунок 26 – График распределение избранных геохимических показателей изменения природной среды в донных отложениях оз. Хубсугул (станция 6-3); остальные условные обозначения те же, что и на рисунке 24

Установлены следующие характеристики состава стандартных образцов. ССЛ-1 – Rb 145 ± 10 мг/кг, Sc 20 ± 2 мг/кг, Sr 40 ± 5 мг/кг, V 107 ± 9 мг/кг, Y 49 ± 4 мг/кг, Yb 5 ± 1 мг/кг, Lu $0,7 \pm 0,5$ мг/кг, Th 12 ± 1 мг/кг, U $3 \pm 0,1$ мг/кг. Для СГ-3 Ge $2,3 \pm 0,1$ мг/кг, Sc $4,6 \pm 0,2$ мг/кг, Sr 7 ± 2 мг/кг, Y 56 ± 4 мг/кг, Yb 6 ± 1 мг/кг, Lu $0,7 \pm 0,5$ мг/кг, Th $7,3 \pm 1$ мг/кг, U $1,85 \pm 0,01$ мг/кг. Данные получены в результате проведенного в ИЯФ СО РАН эксперимента.

Согласно [43] авторами отчета определены метрологические характеристики (оценки повторяемости, правильности, точности и внутрилабораторной прецизионности). В общем случае, как для ССЛ-1, так и для СГ-3 можно отметить, что полученные в результате эксперимента средние значения перечисленных ранее элементов несколько выше аттестованных значений даже в тех случаях, когда условие правильности, установленное по t-критерию, достигается. Полученные результаты в дальнейшем планируется использовать при проведении валидации методики измерений состава горных пород с использованием рентгенофлуоресцентного анализа с синхротронным излучением (апробацию методики предполагается завершить в 2022-23 гг., в зависимости от существующих ограничительных мер). Также планируется определить метрологические характеристики методики РФА СИ с введением набора дополнительных стандартных образцов состава и оценить возможность рекомендации ис-

пользуемой методики для исследования однородности и при межлабораторных экспериментах, когда аттестуемыми характеристиками являются массовые доли РЗЭ.

Полученные методом РФА СИ распределения элементного состава для верхних горизонтов глубоководных осадков озера Хубсугул позволяют детально и с высоким разрешением реконструировать условия выветривания водосборной площади юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны в позднем плейстоцене – голоцене, рассчитать динамику поступления осадочного материала в водоем, изучить влияние природно-климатических факторов на формирование осадочной толщи при стадийных–интерстадийных переходах.

База стандартных образцов ИГХ СО РАН позволяет провести валидацию методики измерений и дальнейшую апробацию на донных отложениях различных озерных систем. Так как РЗЭ является самой неохваченной метрологическими работами группой элементов для подобных объектов, работы с высококачественными разрезами донных отложений позволят восполнить этот пробел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате реализации плана научно-исследовательских работ 2021 года

– выполнено обобщение результатов долговременного эколого-геохимического мониторинга ртутного загрязнения экосистемы Братского водохранилища. По вертикальным профилям концентраций ртути в донных осадках БВ выделены периоды, отражающие долю антропогенной составляющей;

- установлено, что пространственно-временная динамика концентраций ртути в промысловых рыбах БВ указывает на постепенную нормализацию экологической обстановки в водоеме;

- обоснована необходимость мониторинга загрязнения ртутью донных осадков и рыб БВ для своевременного предупреждения развития негативных экологических ситуаций и принятия соответствующие меры для контроля и защиты здоровья населения;

- доказана опасность территории АМЗ для проведения непосредственно на ней какой-либо хозяйственной деятельности;

- обоснована возможность использования штаммов *B. megaterium* и *B. mucilaginosus* для поддержания продуктивности почвы, а также для разработки биотехнологий для биоремедиации почв, загрязненных мышьяком;

- установлено, что состояние и сохранение воды Байкальской водной экосистемы зависит и от природных катаклизмов. Все значимые максимумы содержания ртути в воде оз. Байкал и истока р. Ангары являются откликами на сильные геодинамические воздействия (землетрясения);

- обнаружено, что использование планктона в водах Южного Байкала для мониторинговых целей содержания СОЗ (ПХБ, ДДТ, ГХЦГ) возможно только для оценки состояния системы в период, не превышающий месяца;

- показано, что уровни ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе в южном Прибайкалье в 2010-х гг. сравнимы или ниже, чем в воздухе других промышленных городах и удаленных районах России и в других регионах мира;

- установлено, что позднеплейстоцен-голоценовое осадконакопление в высокогорных озерах Восточного Саяна находилось под влиянием как климатических, так и геологических факторов;

- показано, что важными источниками информации об изменениях обстановок осадконакопления служат ассоциации слоистых силикатов, их соотношения в разрезе донных отложений и кристаллохимические характеристики;

- выявлены седиментационные признаки крупных наводнений с использованием комплексного изучения донных отложений пойменного озера в бассейне р. Сенца, что привело к более глубокому пониманию особенностей развития речных систем Восточного Саяна в условиях менявшегося режима увлажнения этой территории;

Таким образом, все задачи проекта выполнены полностью. Полученные результаты являются новыми и вносят существенный вклад в понимание современного состояния и динамики эко- и геосистем Восточной Сибири в недавнем прошлом, закономерностей их функционирования, а также причин, вызывающих разномасштабные по времени и амплитуде проявления сдвигов в состоянии региональных эко- и геосистем. Научный уровень выполненной научно-исследовательской работы по проекту соответствует мировому уровню аналогичных исследований.

Полученные результаты важны для реализации современных подходов в региональной системе рационального природопользования.

Результаты имеют очевидную научную новизну, заключающуюся в фундаментальном увеличении суммы наших знаний о понимании современного состояния и динамики эко- и геосистем Восточной Сибири в недавнем прошлом, закономерностей их функционирования и выработке прогнозных рекомендаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Руш Е.А., Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Королева Г.Н., Гапон А.Е., Андрулайтис Л.Д. Экологические технологии: очистка поверхностного стока предприятия «Усольехимпром» // Инженерная экология. – № 5. – 2007. – С. 3–15.
- 2 Chien L.C., Hung T.C., Choang K.Y., Yeh C.Y., Meng P.J., Shieh M.J., Han B.C. Daily intake of TBT, Cu, Zn, Cd and As for fishermen in Taiwan // *Sci. Total Environ.* – 2002. – Vol. 285. P. 177–185.
- 3 Карнаухова Г.А. Литологический состав донных осадков в барьерной зоне «река – водохранилище» (на примере Братского водохранилища) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2015. – Т. 13. – С. 78–87.
- 4 Hakanson L. Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control – A Sedimentological Approach // *Water Research.* – 1980. – V. 14.– № 8. – P. 975–1001.
- 5 Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Tirsikh E.N. Long-term dynamics of mercury pollution of the Bratsk reservoir bottom sediments, Baikal region, Russia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – 2019. – Vol. 321: 012041.
- 6 Perrot V., Eпов V.N., Pastukhov M.V., Grebenshchikova V.I., Zouiten C., Sonke J.E., Donard O.F.X., Amouroux D. Tracing Sources and Bioaccumulation of Mercury in Fish of Lake Baikal – Angara River Using Hg Isotopic Composition // *Environ. Sci. Technol.* – 2010. – Vol. 44. – P. 8030–8037.
- 7 Богданов А.В., Качор О.Л., Федотов К.В., Чайка Н.В. Ликвидация последствий деятельности мышьякового производства горно-перерабатывающей промышленности // *Экология и промышленность России.* – 2014. – № 5. – С. 31–35.
- 8 Kabata-Pendias A Trace Elements in Soil and Plants. (4rd edn.) CRC Press Taylor and Francis Group, LLC. New York. 2011.
- 9 V. A. Bybin, G. A. Belogolova, Yu. A. Markova, M. G. Sokolova, A. V. Sidorov O. N., Gordeeva, V. I. Poletaeva. Influence of Heavy Metals and Arsenic on Survival and Biofilm Formation of Some Saprotrophic Soil Microorganisms // *Water Air Soil Pollut.* – 2021. – Vol. 232: 343.
- 10 Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Андрулайтис Л.Д., Саньков В.А., Гапов А.Е. Ртуть в воде истока Ангары: пятилетний тренд концентрации и возможные причины его вариаций // Доклады Академии наук. – 2003. – т. 389. – №2. – С. 235–238.

- 11 Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Повышенные содержания ртути в воде истока реки Ангара: отклики на геодинамические воздействия и сильные землетрясения // Доклады Академии наук. – 2020. – т. 491. – № 12. – С. 77–81.
- 12 Ключевский А.В., Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Демьянович В.М., Ключевская А.А. О связи сильных геодинамических воздействий с повышением содержаний ртути в воде истока р. Ангара // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 2. – С. 293-311. DOI: 10.15372/GiC2070150
- 13 Артющков Е.В., Летников Ф.А., Ружич В.В. О разработке нового механизма формирования Байкальской впадины // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей. – Новосибирск: Наука. – 1990, С. 367–376.
- 14 Stockholm Convention [электронный ресурс]. – URL: <http://chm.pops.int>
- 15 Бобовникова Ц.И., Ворченко Е.П., Дибцева А.И., Яблоков А.И., Пастухов И.Д. Морские млекопитающие как индикаторы загрязнения фоновых регионов хлорорганическими пестицидами и полихлорированными бифенилами // Региональный мониторинг озера Байкал. Ред. Израэль И. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – С. 49–54.
- 16 Kucklick J.R., Harvey H.R., Ostrom P.H., Ostrom N.E., Baker J.E. Organochlorine dynamics in the pelagic food web of Lake Baikal // Environ. Toxicol. Chem. 1996. – Vol. 15. – P. 1388–1400.
- 17 Nakata H., Tanabe S., Tatsukawa R., Amano M., Miyazaki N., Petrov E.A.. Persistent organochlorine residues and their accumulation kinetics in Baikal seal (*Phoca sibirica*) from Lake Baikal, Russia // Environ. Sci. Technol. – 1995. – Vol. 29. – P. 2877–2885.
- 18 Mamontov A.A., Mamontova E.A., Tarasova E.N., McLachlan M.S. Tracing the Sources of PCDD/Fs and PCBs to Lake Baikal // Environ. Sci. & Technol. – 2000. – Vol.34, # 5. – P. 741-747.
- 19 Mamontov, A., Mamontova, E.A., Tarasova, E.N., Persistent organic pollutants in Baikal seal (*Pusa sibirica*) blubber // Russ. J. Gen. Chem. 2019. – Vol. 89 (13). – P. 2791–2797.
- 20 Сурнина Н.Н., Анохин Ю.А., Кирюхин В.П., Митрошков А.В. Загрязнение воздушного бассейна Приангарья и Прибайкалья полихлорированными бифенилами // Мониторинг состояния озера Байкал. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – С. 54–59.

- 21 McConnell L.L., Kucklick J.R., Bidleman T.F., Ivanov G.P., Chernyak S.M. Air-water gas exchange of organochlorine compounds in Lake Baikal, Russia // *Environ. Sci. Technol.* – 1996. – Vol. 30, № 10. – P. 2975–2983.
- 22 Iwata H., Tanabe S., Ueda K., Tatsukawa R. Persistent organochlorine residues in air, water, sediments, and soil from the Lake Baikal Region, Russia // *Environ. Sci. Technol.* – 1995. – Vol. 29, № 3. – P. 792-801.
- 23 Мамонтова Е.А., Тарасова Е.Н., Мамонтов А.А., Кузьмин М.И., Борисов Б.З., Бульбан А.П., Юрченко С.Г., Лепская Е.В., Левшина С.И., Трегубов О.Д. Стойкие органические загрязнители в атмосферном воздухе некоторых территорий Сибири и Дальнего Востока России // *География и природные ресурсы.* – 2012. – № 4. – С. 40-47.
- 24 Mamontova E.A., Kuzmin M.I., Tarasova E.N., Khomutova M.Yu. The investigation of PCBs and OCPs in air in the Irkutsk Region (Russia) using passive air sampling // *Вестник КазНУ. Серия химическая.* – 2010. – №4 (60). – P. 209–213.
- 25 Shoeib M., Harner T. Characterization and comparison of three passive air samplers for persistent organic pollutants // *Environ. Sci. Technol.* – 2002. – Vol. 36. – P. 4142–4151.
- 26 Harner, T. PUF/SIP Disk Effective Air Volume Calculation for Target Chemicals. Excel Template., 2017.
- 27 Коноплев А.В., Никитин В.А., Самсонов Д.П., Черник Г.В., Рычков А.М. Полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды в атмосфере дальневосточной российской Арктики // *Метеорология и гидрология.* – 2005. – № 7. – С. 38–44.
- 28 Pozo K., Harner T., Wania F., Muir D.C.G., Jones K., Barrie L.A. Toward a global network for persistent organic pollutants in air: results from the GAPS study // *Environ. Sci. Technol.* – 2006. – Vol. 40. – P. 4867–4873.
- 29 ГН 1.2.3111-13. Гигиенические нормативы содержания пестицидов в объектах окружающей среды (перечень). – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России. – 2013. – 161 с.
- 30 ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Стандартинформ. – 2008. – 48 с.
- 31 Mamontova E.A., Tarasova E.N., Mamontov A.A., Goreglyad A.V., Tkachenko L.L. Variations in the concentration of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides

- in air over the Northern Hovsgol Region in 2008–2015 // *Russian Meteorology and Hydrology*. – 2019. – Vol. 44, Issue 1. – P. 78–85
- 32 Hogarth J.N., Seike N., Kobara Y., Habib A., Nam J.-J., Lee J.-S., Li Q., Liu X., Li J., Zhang G., Masunaga S. Passive air monitoring of PCBs and PCNs across East Asia: A comprehensive congener evaluation for source characterization // *Chemosphere*. – 2012. – Vol. 86. – P. 718–726.
- 33 Bezrukova E.V., Kulagina N.V., Amosova A.A., Volchatova E.V., Levina O.V., Shchetnikov A.A., Kerber E.V., Filinov I.A. Late Glacial-Holocene environmental history of the East Sayan Mountains (Southern Siberia, Russia): a paleolimnological study of mountain lakes // *Limnology and Freshwater Biology* 2020 (4): 566-567 DOI:10.31951/2658-3518-2020-A-4-566.
- 34 Mackay A.W., Bezrukova E.V., Leng M.J., Meaney M., Nunes A., Piotrowska N., Self A., Shchetnikov A., Shilland E., Tarasov P., Luo Wang, White D. Aquatic ecosystem responses to Holocene climate change and biome development in boreal, central Asia // *Quaternary Science Reviews*. – 2012. – Vol. 41. – P. 119–131.
- 35 Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Krivonogov S.K. Late Glacial to Holocene volcanism of Jom-Bolok Valley (East Sayan Mountains, Siberia) recorded by microtephra layers of the Lake Kaskadnoe-1 sediments // *Journal of Asian Earth sciences*. – 2019. – Vol. 173. – P. 291–303 DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.01.025
- 36 Prokopenko A.A., Kuzmin M.I., Williams D.F., Gelety V.F., Kalmychkov G.V., Gvozdokov A.N., Solotchin P.A. Basin-wide sedimentation changes and deglacial lake-level rise in the Hovsgol basin, NW Mongolia // *Quaternary International*. – 2005. – Vol. 136. – №. 1. – P. 59–69.
- 37 Prokopenko A.A., Khursevich G.K., Bezrukova E.V., Kuzmin M.I., Boes X., Williams D.F., Abzaeva A.A. Paleoenvironmental proxy records from Lake Hovsgol, Mongolia, and a synthesis of Holocene climate change in the Lake Baikal watershed // *Quaternary Research*. – 2007. – Vol. 68. – №. 1. – P. 2–17.
- 38 Phedorin M.A., Goldberg E.L., Grachev M.A., Levina O.L., Khlystov O.M., & Dolbnya I.P. The comparison of biogenic silica, Br and Nd distributions in the sediments of Lake Baikal as proxies of changing paleoclimates of the last 480 kyr // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2000. – Vol. 448. – №. 1-2. – P. 400–406.

- 39 Young G.M., Nesbitt H.W. Processes controlling the distribution of Ti and Al in weathering profiles, siliciclastic sediments and sedimentary rocks // *Journal of Sedimentary research*. – 1998. – Vol. 68. – №. 3. – P. 448–455.
- 40 Гранина Л.З. Ранний диагенез донных осадков озера Байкал // Новосибирск: Академическое изд-во «Гео». – 2008. – 156 с.
- 41 Гранина Л.З., Захарова Ю.Р., Парфенова В.В. Биогенное накопление железа и марганца в донных осадках Байкала // *Геохимия*. – 2011. – № 11. – С. 1225–1232.
- 42 Методика "Измерение концентраций редкоземельных элементов и тяжелых платиноидов в геологических образцах методом РФА-СИ" (ФГУП «СНИИМ»). – Новосибирск. – 2018.
- 43 ОСТ 41-08-205-04. Стандарт отрасли. Управление качеством аналитических работ. Нормы погрешности при определении химического состава минерального сырья и классификация методик лабораторного анализа по точности результатов. – ФГУП ВИМС. – 2004. – 23 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций 2021 г. по теме исследований

Статьи

- 1 Bezrukova E.V., Shchetnikov A.A., Kulagina N.V., Amosova A.A. Lateglacial and Holocene vegetation and environmental change in the Jom-Bolok volcanic region, East Sayan Mountains, South Siberia, Russia // *Boreas*. – 2021. – Vol. 50. – №4. – P. 935–947. – DOI: 10.1111/bor.12518
- 2 Bybin V.A., Belogolova G.A., Markova Yu.A., Sokolova M.G., Sidorov A.V., Gordeeva O.N., Poletaeva V.I. Influence of Heavy Metals and Arsenic on Survival and Biofilm Formation of Some Saprotrophic Soil Microorganisms // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2021. – Vol. 232. – №8. – 343. – DOI: 10.1007/s11270-021-05288-9
- 3 Gordeeva O., Belogolova G., Pastukhov M. Mercury bioaccumulation by higher plants and mushrooms around chlor-alkali and metallurgical industries in the Baikal region, Southern Siberia, Russia // *Chemistry and ecology*. – 2021. – Vol. 37. – №8. – P. 729–745. – DOI: 10.1080/02757540.2021.1972983
- 4 Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Rukavishnikov V.S., Efimova N.V., Donskikh I.V., Doroshkov A.A. Chemical Contamination of Soil on Urban Territories With Aluminum Production in the Baikal Region, Russia // *Air, Soil and Water Research*. – 2021. – Vol. 14. – P. 1–11. – DOI: 10.1177/11786221211004114
- 5 Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Suslova M.Y. Long-term cyclicality of trace element in the Baikal aquatic ecosystem (Russia) // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2021. – Vol. 193. – №5. – DOI: 10.1007/s10661-021-09021-1
- 6 Khenzykhenova F., Dorofeyuk N., Shchetnikov A., Danukalova G., Bazarova V. Palaeoenvironmental and climatic changes during the Late Glacial and Holocene in the Mongolia and Baikal region: A review // *Quaternary International*. – 2021. – Vol. 605–606. – P. 300–328. – DOI: 10.1016/j.quaint.2021.04.038
- 7 Kobe F., Leipe C., Shchetnikov A.A., Hoelzmann P., Gliwa J., Olschewski P., Goslar T., Wagner M., Bezrukova E.V., Tarasov P.E. Not herbs and forbs alone: pollen-based evidence for the presence of boreal trees and shrubs in Cis-Baikal (Eastern Siberia) derived from the Last Glacial Maximum sediment of Lake Ochaul. – *Journal of Quaternary Science*. – 2021. – Special Issue. – DOI: 10.1002/jqs.3290
- 8 Kostrova S.S., Biskaborn B.K., Pestryakova L.A., Fernandoy F., Baumer M., Meyer H. Climate and environmental changes of the Lateglacial transition and Holocene in

- northeastern Siberia: Evidence from diatom oxygen isotopes and assemblage composition at Lake Emanda // *Quaternary Science Reviews*. – 2021. – Vol. 259. – 106905. – DOI: 10.1016/j.quascirev.2021.106905
- 9 Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Tirskikh E.N. Dynamics of Trace Element Composition of Bratsk Reservoir Water in Different Periods of Anthropogenic Impact (Baikal Region, Russia) // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2021. – Vol. 80. – №3. – P. 531–545. – DOI: 10.1007/s00244-021-00819-1
- 10 Sizykh A., Moritz R., Pastukhov M., Poletaeva V. Vegetation and landscape differentiation of the territory of gold deposit and it's environment (Republic of Sakha, Yakutia, Russia) // *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*. – 2021. – Vol. 11. – №2. – P. 337-342. - DOI: 10.31407/ijees11.220
- 11 Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh L.S., Bezrukova E., Dobrynin D., Timireva S., Rusakov A. and Maksimov F. A multiproxy record of sedimentation, pedogenesis, and environmental history in the north of West Siberia during the late Pleistocene based on the Belaya Gora section // *Quaternary Research*. – 2021. – Vol. 99. – P. 204–222. – DOI: 10.1017/qua.2020.74
- 12 Vike-Jonas K., Gonzalez S.V., Mortensen K., Ciesielski T.M., Farkas J., Venkatraman V., Pastukhov M.V., Jenssen B.M., Asimakopoulos A.G. Rapid determination of thyroid hormones in blood plasma from Glaucous gulls and Baikal seals by HybridSPE®-LC-MS/MS // *Journal of Chromatography B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences*. – 2021. – Vol. 1162. – DOI: 10.1016/j.jchromb.2020.122447

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2021 г. в соответствии с государственным заданием

индикатор	Ед. измерения	Всего
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	единиц	12
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	единиц	12
Количество монографий (глав в монографиях)	единиц	1
Количество публикаций в сборниках конференций	единиц	3
Число тезисов докладов в конференциях	единиц	14