

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)
Рег № НИОКТР 121041500059-6
Инв. № _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН

Д. Г.-М.Н.

А.Б. Перепелов

«24» января 2023 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

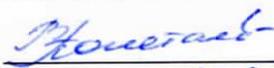
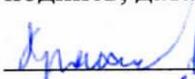
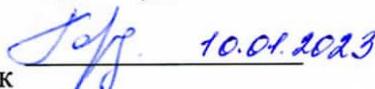
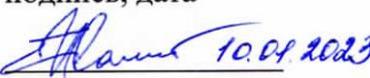
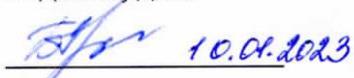
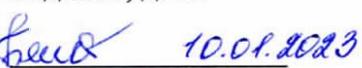
Протокол Ученого совета ИГХ СО РАН
№ 1 от «23» января 2023 г.

Руководитель темы
доктор географических наук

 10.01.2023 Е.В. Безрукова
(подпись, дата)

Иркутск 2022

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ:

Руководитель темы, гнс.,	 10.01.2023	Е. В. Безрукова (реферат, введение, разделы 4.1, 4.2, 4.3, заключение, компиляция отчета)
д-р географич. наук	подпись, дата	
Исполнители:	 10.01.2023	М.В. Пастухов (раздел 1.1)
снс, канд. биол. наук	подпись, дата	
снс, канд. геол.-мин. наук	 10.01.2023	В.И. Полетаева (раздел 1.1)
	подпись, дата	
нс, канд. геол.-мин. наук	 10.01.2023	М.А. Крайнов (раздел 4.2, оформление отчета по ГОСТу)
	подпись, дата	
снс, канд. геол.-мин. наук	 10.01.2023	О.Н. Гордеева (раздел 1.1)
	подпись, дата	
нс, канд. геол.-мин. наук	 10.01.2023	Е.В. Иванов (раздел 4.3)
	подпись, дата	
мнс, канд. геол.-мин. наук	 10.01.2023	Б.А. Баенгуев (раздел 1.3.2)
	подпись, дата	
снс, канд. мед. наук	 10.01.2023	Е.А. Мамонтова (раздел 2)
	подпись, дата	
снс, канд. биол. наук	 10.01.2023	А.А. Мамонтов (раздел 2)
	подпись, дата	
внс, д-р. геол.-мин. наук	 10.01.2023	В.И. Гребенщикова (раздел 3)
	подпись, дата	
мнс	 10.01.2023	Е.В. Волчатова (раздел 4.1)
	подпись, дата	
снс, канд. геол.-мин. наук	 10.01.2023	Г.А. Белоголова (раздел 1.3.2)
	подпись, дата	

Ключевые слова: научно-исследовательская работа, заключительный отчет.

РЕФЕРАТ

Отчет 61 с., 1 кн., 29 рис., 1 табл., 68 источников, 2 прил.

ПРИРОДНАЯ СРЕДА, ПРИБАЙКАЛЬЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОХИМИЯ, ПОЧВА, МОНИТОРИНГ, АБИОТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ, ТЕХНОГЕННАЯ НАГРУЗКА, ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК, ОЗ. БАЙКАЛ, ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, РТУТЬ, ПОЛИХЛОРИРОВАННЫЕ БИФЕНИЛЫ, ХЛОРООРГАНИЧЕСКИЕ ПЕСТИЦИДЫ, АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ, СНЕГ, ЛАНДШАФТЫ, КЛИМАТ, ПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕН

Объектами исследования были снежный покров, почвы промышленных городов Приангарья, высшая наземная растительность о. Ольхон, химический состав воды в оз. Байкал и истоке р. Ангары, донные отложения озер Байкальского региона.

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

В результате изучен микроэлементный состав твердой фазы снегового покрова гор. Ангарск, выделены элементы-индикаторы загрязнения отдельных типов производств, оценен экологический риск. Проведена оценка загрязнения техногенных почв свинцом и изучен механизм его миграционной подвижности в грунтах и почвах территории бывшего металлургического завода гор. Свирска. Определены содержания ХОП и ПХБ в разных растительных сообществах в фоновом районе о. Ольхон. Установлена взаимосвязь концентраций ХОП и ПХБ в древесной, кустарниковой и травянистой растительности с концентрациями в почвах. Выявлены возможные причины ежегодных изменений химического состава воды истока р. Ангары за последние 72 года для макрокомпонентов и за последние 17 лет для микрокомпонентов. Реконструирована история природной среды центральной части Окинского плато за последние 8600 лет. Выявлены ее особенности, важные для оценки перспективности озер и их бассейнов в горах Восточного Саяна для потенциального устойчивого развития в рамках образовательных, туристических, геозащитных, сельскохозяйственных проектов.

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 Закономерности трансформации химического состава абиотических компонентов природно-техногенных экосистем в зависимости от степени техногенной нагрузки	9
1.1 Введение.....	9
1.2 Материалы и методы.....	9
1.3 Результаты и обсуждение.....	10
1.3.1 Потенциально токсичные микроэлементы в снеговом покрове гор. Ангарск: источники, миграция, оценка загрязнения и экологического риска	10
1.3.2 Оценка загрязнения свинцом почвенного покрова территории бывшего Ангарского металлургического завода после его ликвидации	15
1.4 Выводы.....	18
2 Исследование особенностей распределения ПХБ и ХОП в наземной растительности в фоновом районе (о. Ольхон).....	19
2.1 Введение.....	19
2.2 Материалы и методы.....	20
2.3 Результаты и обсуждение.....	21
3 Разнонаправленная динамика изменения химического состава воды истока р. Ангары (сток Байкала).....	27
3.1 Введение.....	27
3.2 Материалы и методы.....	28
3.3 Результаты и обсуждение.....	30
3.3.1 Макрокомпонентный состав воды.....	30
3.3.2 Микроэлементный состав воды.....	32
3.4 Заключение.....	35
4 Пространственно-временная изменчивость природной среды Восточной Сибири в плейстоцене-голоцене.....	35
4.1 Ландшафтно-климатические изменения в центральной части Окинского плато (Восточный Саян) в среднем-позднем голоцене	35
4.1.1 Введение.....	35
4.1.2 Материалы и методы.....	36

4.1.3 Результаты и их обсуждение.....	39
4.1.4 Выводы.....	42
4.2 Предварительная оценка потенциала записей изменения природной из донных отложений озёр различного генезиса в горах и предгорьях Восточного Саяна	43
4.2.1 Введение.....	43
4.2.2 Материалы и методы.....	43
4.2.3 Результаты и их обсуждение.....	43
4.3 Геохимия терригенного осадконакопления на примере распределения микроэлементов в опорных горизонтах донных отложений озера Байкал	45
4.3.1 Введение.....	45
4.3.2 Материалы и методы.....	46
4.3.3 Результаты.....	46
4.3.4 Заключение.....	49
Заключение.....	50
Список использованных источников.....	52
Приложение А. Список публикаций 2022 г. по теме исследований.....	59
Приложение Б. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2022 г. в соответствии с государственным заданием	61

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР используются следующие определения, 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

АМЗ – Ангарский металлургический завод

АЭХК – Ангарский электролизный химический комбинат

БВ – Братское водохранилище

г – грамм

г. – год

гор. – город

гг. – года

ГХЦГ – гексахлорциклогексан

ДДД – дихлордифенилдихлорэтан

ДДТ – дихлордифенилтрихлорэтан

ДДЭ – 1,1'-дихлор-2,2-бис(*n*-хлорфенил)этилен

ИЮПАК – Международный союз теоретической и прикладной химии

кал. – калиброванный

кг - килограмм

км – километр

л – литр

л.н. – лет назад

м – метр

мг – миллиграмм

мкм – микрометр

нг – нанограмм

о. – остров

ОДК – ориентировочно допустимая концентрация

оз. – озеро

ок. – около

осч – относительно соотношение частей

ПХБ – полихлорированные бифенилы

пос. – поселок

р. – река

РЗЭ – редкоземельные элементы

с.в. – сухой вес

см – сантиметр

СОЗ – стойкий органический загрязнитель

с.ш. – северная широта

ТЭЦ – тепловая электроцентраль

тыс. – тысяча

у.м. – уровень моря

ХОП – хлорорганические пестициды

ЦКП – центр коллективного пользования

ч – час

CF – однофакторный индекс загрязнения

RI – индекс потенциального экологического риска

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 Закономерности трансформации химического состава абиотических компонентов природно-техногенных экосистем в зависимости от степени техногенной нагрузки

1.1 Введение

Наиболее значимой экологической проблемой Байкальского региона является химическое загрязнение окружающей среды предприятиями промышленных городов, где сосредоточена основная часть населения региона. В связи с этим, одним из актуальных и востребованных направлений научных исследований является изучение миграции, накопления, трансформации форм нахождения потенциально токсичных элементов в компонентах природно-техногенных экосистем.

На II этапе выполнения проекта в 2022 г. проведены эколого-геохимические исследования снегового покрова и почв двух промышленных городов Южного Прибайкалья – Ангарска и Свирска, в значительной степени подверженных антропогенной нагрузке. Цели исследований: 1. Идентификация источников химического загрязнения снегового покрова гор. Ангарск и эколого-геохимическая оценка техногенного воздействия на окружающую среду; 2. Оценка степени загрязнения свинцом техногенных почв гор. Свирск, изучение особенностей трансформации форм соединений и подвижности свинца в почвах территории производственных объектов АМЗ после их ликвидации.

1.2 Материалы и методы

Снегогеохимический мониторинг – высокоинформативный процесс, позволяющий дать достаточно точную оценку потенциальной опасности химического загрязнения атмосферы и почв. В представленном исследовании приведены результаты изучения микроэлементного состава твердой фазы снегового покрова одного из наиболее загрязненных городов Иркутской области – гор. Ангарск, расположенного вдоль левого берега р. Ангары. Для исследования выбраны приоритетные элементы-загрязнители снегового покрова – Fe, Al, V, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Mo, U, Hg. Отбор проб проводился в конце сезона устойчивого снегового покрова перед началом подтаивания (февраль–март). Схема отбора проб составлялась с учетом розы ветров и характера рельефа, а также расположения и особенностей основных источников загрязнения. Отобрано 30 проб снегового покрова (по 15 проб в про-

мышленной и селитебной зоне). Отбор и подготовка снеговых проб были выполнены с учетом методических рекомендаций [1, 2].

Исследования, проведенные в гор. Свирск, основаны на изучении особенности загрязнения техногенных почв АМЗ, работавшего с 1934–1949 гг. и выпускавшего мышьяк для оборонной промышленности. На территории его промплощадки находилось около 140 тыс. тонн арсенопиритовых и других сульфидных огарков в течение более 60 лет, что представляло большую угрозу здоровью местного населения. В 2009–2014 годах была проведена ликвидация отвалов, строений завода и рекультивация техногенных почв на отдельных участках. Сделан вывод о безопасности этого объекта [3]. Кроме мышьяка, вторым по значимости загрязнителем, входящим в отходы производства АМЗ, являлся свинец. Пробы почв отобраны из верхнего горизонта 15–20 см на 70 площадках. Также проведено изучение двух почвенных разрезов на глубину до 70 см на территории бывших отвалов и в пределах бывшего здания завода АМЗ.

Определение микроэлементного состава твердого осадка снега проведено в аккредитованном ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН на масс-спектрометрах с индуктивно связанной плазмой NexION 300D. Анализ ртути проведен методом атомной абсорбции на спектрометре «РА-915+». Для определения содержания свинца и форм его соединений в пробах почв использовали атомно-абсорбционный метод. Измерения проводились на спектрометрах Perkin Elmer 403, 503. Для изучения форм соединений Pb использовали метод последовательной экстракции с модификацией [4]. Построение карт-схем площадного распределения микроэлементов проводилось в программе QGIS. Кластерный анализ выполнялся при помощи надстройки «Cluster» для Microsoft Excel. Статистический анализ проводился на основе программы Statistica 10, Microsoft Excel 10.

1.3 Результаты и обсуждение

1.3.1 Потенциально токсичные микроэлементы в снеговом покрове гор. Ангарск: источники, миграция, оценка загрязнения и экологического риска

Геоинформационное картирование распределения микроэлементов в твердом осадке снегового покрова г. Ангарск позволило выявить ореолы распространения повышенных концентраций и определить техногенные источники загрязнения. Установлено, что, несмотря на сравнительно небольшую территорию, выделенные зоны отличаются как по степени общей нагрузки, так и химическому составу. Обнаруженные геохимические аномалии концентраций потенциально токсичных микроэлементов в твердом осадке снегового покрова иденти-

фицировали три основные разнопрофильные производства-загрязнители атмосферного воздуха гор. Ангарск – Ангарский нефтехимический комбинат (АНХК), ТЭЦ и «АнгарскЦемент». Визуализация полученных данных по распределению концентраций микроэлементов на изучаемой территории помогла определить группы поллютантов, характерных для разных типов производств – цементный завод (Cd, Pb, Zn, Cs и Ca), АНХК (Fe, Co, Ni, Mo, V) и ТЭЦ (As, U, Al, Hg) (рисунок 1).

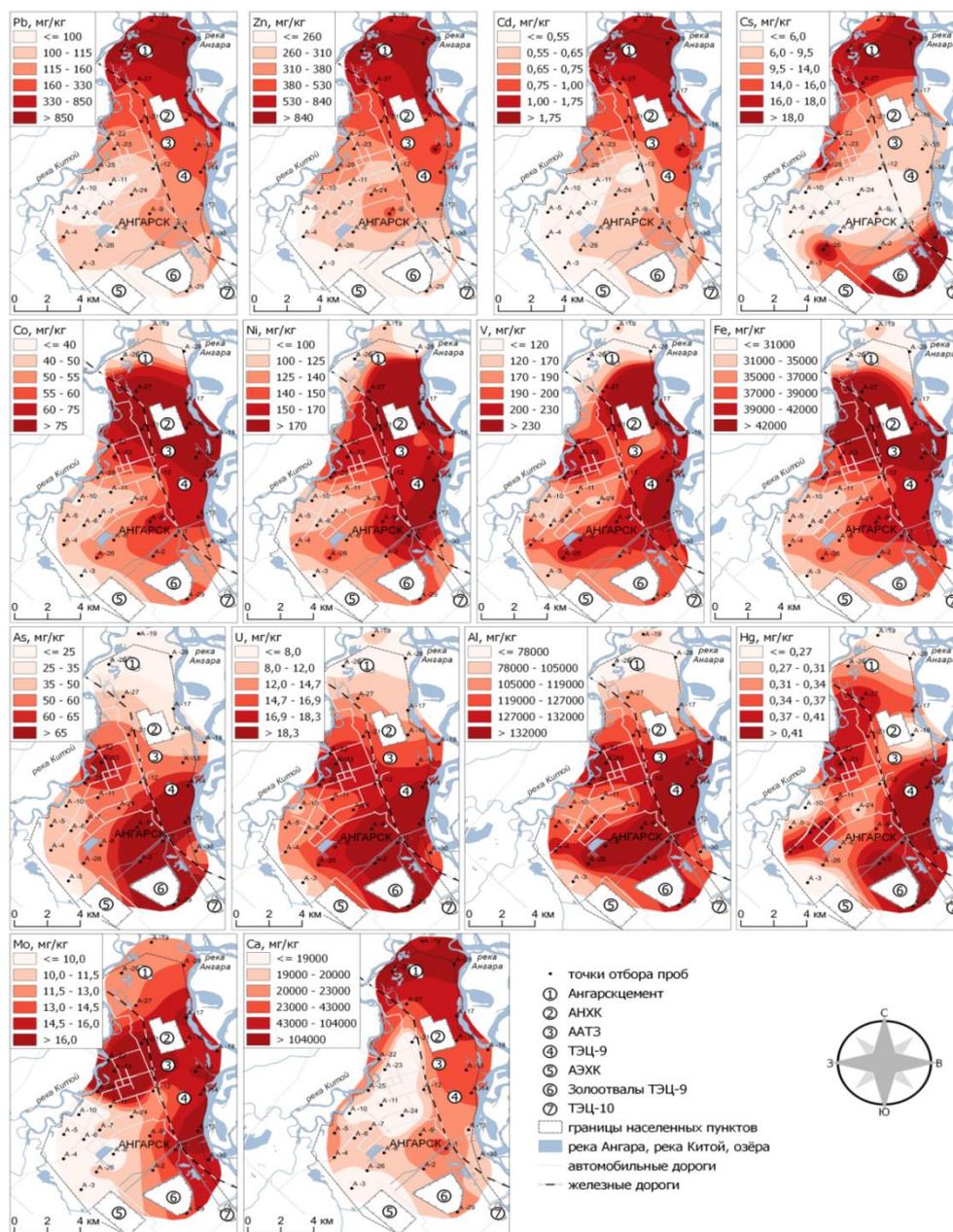


Рисунок 1 – Карты распределения микроэлементов в твердом осадке снегового покрова гор. Ангарск

Следует также отметить пассивные потенциальные источники загрязнения атмосферы Hg, U, As и Cs – шламоотвалы ТЭЦ и АЭХК. Проведенный кластерный анализ подтвердил сделанное по геоинформационным картам заключение о специфичных геохимических ассоциациях элементов для различных производственных процессов (рисунок 2).

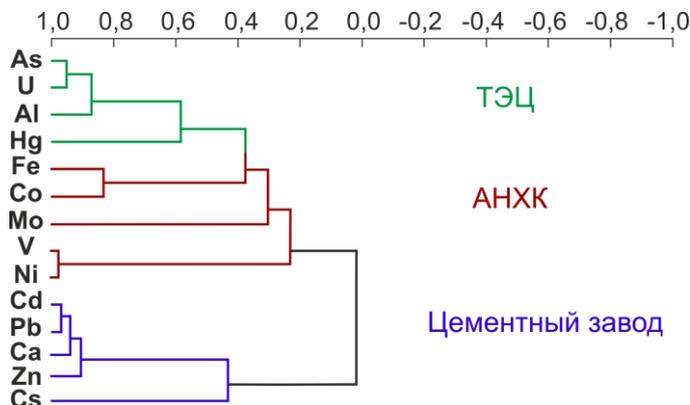


Рисунок 2 – Дендрограмма кластерного анализа химического состава твердого осадка снежного покрова гор. Ангарск (цветом выделены ассоциации элементов, характерные для различных типов производств)

Наибольший вклад в загрязнение атмосферы гор. Ангарск взвешенными частицами (до 90%) вносят предприятия теплоэнергетики [5]. Использование для работы Ангарских ТЭЦ бурых азейских углей, обогащенных ураном и мышьяком [6], предопределяет их повышенные концентрации и в твердых аэрозолях – золе-уноса. Также угольные ТЭЦ являются одними из основных источников поступления ртути в окружающую среду [7]. Вторым по количеству выбросов в атмосферу среди предприятий города является «АНХК» (до 10% от общих выбросов). В смолисто-асфальтеновых веществах концентрируется основная часть тяжелых металлов (V, Ni, Co, Mo и Fe) нефти [8]. При термической переработке тяжелых фракций нефти на АНХК в окружающую среду поступают вышеуказанные металлы, в первую очередь V и Ni. Также значительная часть выбросов в атмосферу связана со сжиганием мазута в технологических печах АНХК. Основным производственным сырьем на предприятии «АнгарскЦемент» является известняк, что предопределяет поступление Ca с пылевыми выбросами в атмосферу и последующее его осаждение на близлежащие территории. Минеральные корректирующие добавки (шлак, песок, шлам и др.) и глинистые породы, используемые при производстве цемента, являются источниками эмиссии Zn, Cs, Cd и Pb. При обжиге смеси компонентов для производства клинкера – полуфабриката цемента, происходит образование сферул и микросферул алюмосиликатного состава, обогащенных Pb и

Zn, и легко переносимых в воздухе и являющихся составной частью твердой фазы снегового покрова в зоне влияния цементного завода [9].

Кроме промышленной зоны ореолы рассеивания микроэлементов техногенного происхождения распространяются и на селитебную (жилую) территорию города. Атмосферный перенос загрязняющих веществ при производстве цемента распространяется на северную зону города, при переработке нефтепродуктов – на северо-восточную и центральную, при сжигании угля ТЭЦ – на юго-восточную. В зону основного загрязнения потенциально опасными микроэлементами (V, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Mo, U, Hg) попадает и р. Ангара, являющаяся объектом питьевого водоснабжения населения прибрежных городов и поселков. Поступающие с атмосферным переносом и поверхностным стоком в реки Ангара и Китой твердые аэрозоли оседают в процессе седиментации в донные отложения и могут вносить свою лепту в создание зон повышенного загрязнения экотоксикантами водных объектов.

Для определения уровня техногенного загрязнения потенциально токсичными микроэлементами твердой фазы снегового покрова, а, следовательно, атмосферного воздуха территории гор. Ангарск, использован однофакторный индекс загрязнения (CF), рассчитываемый отдельно для каждого исследуемого элемента в каждой пробе как отношение полученной концентрации i -элемента в пробе к его фоновой концентрации [10]. В качестве фона нами использовались концентрации микроэлементов в твердом осадке снегового покрова со льда оз. Байкал. Расчет CF исследуемых микроэлементов в твердой фазе снегового покрова территории гор. Ангарск проводился отдельно для селитебной и промышленной зоны. Концентрации микроэлементов во всех пробах превышали фоновый уровень, за исключением Fe в одной пробе из промышленной зоны, где концентрации железа были на уровне фона. По средним значениям CF установлено, что твердый осадок снега промышленной зоны имеет очень высокий уровень загрязнения Cd, Pb, Mo и Hg, значительно загрязнен As, U, Co, Cs, Ni, V и умеренно загрязнен Al, Zn и Fe. В селитебной зоне города наблюдается иная картина загрязнения твердого осадка снега по уровню CF : очень высокое загрязнение отмечается только для Mo, значительное – для Cd, Pb, Hg, As, U и Co, умеренное – для Cs, Ni, V, Al, Zn и Fe (рисунок 3). Следует отметить разброс минимальных и максимальных значений CF для Pb, Cd в промышленной зоне и для Mo в селитебной, это, вероятно, связано с наложением разных источников загрязнения, особенностями ландшафта, ветрового переноса.

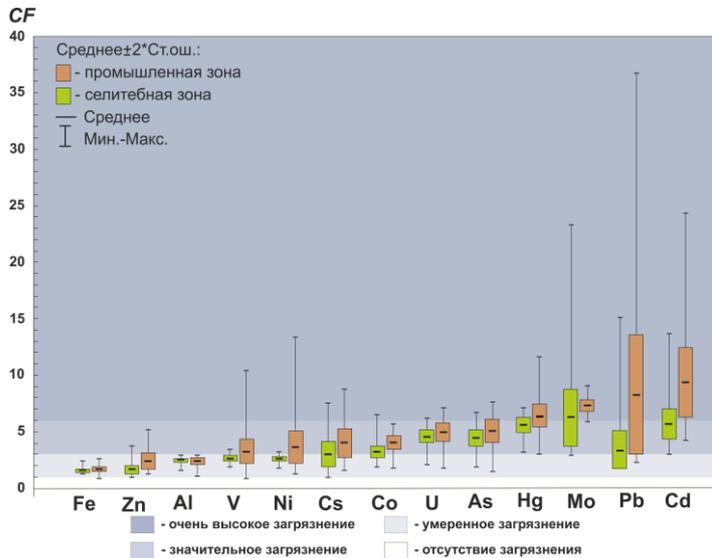


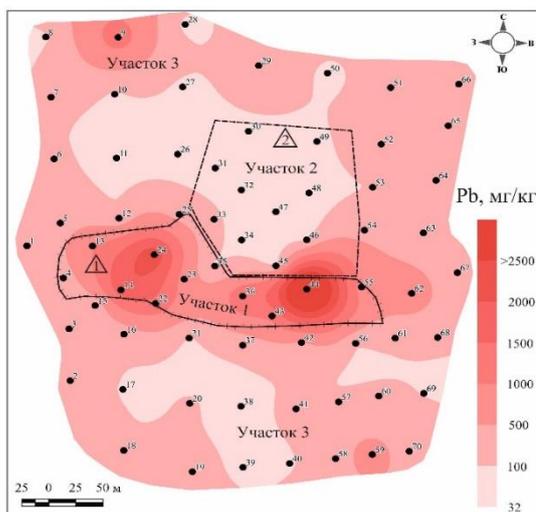
Рисунок 3 – Однофакторный индекс загрязнения (CF) микроэлементами твердого осадка снегового покрова гор. Ангарск

Индекс потенциального экологического риска (RI) при загрязнении тяжелыми металлами и As твердого остатка снегового покрова рассчитан по методу [10]. Этот метод учитывает не только концентрации поллютантов, но также возможные негативные экотоксикологические последствия загрязнения [11]. RI рассчитывается с помощью коэффициента E_r^i , равному произведению CF и T_r^i (коэффициент токсичности). Значение T_r^i для Zn = 1; V, Mo = 2; Pb, Co, Ni = 5; As = 10; Cd = 30; Hg = 40. В работе использовались средние для каждого элемента значения E_r^i отдельно для промышленной и селитебной зоны. $E_r^i < 40$ соответствует низкому риску; $40 < E_r^i \leq 80$ указывает на умеренный риск; $80 < E_r^i \leq 160$ указывает на значительный риск; $160 < E_r^i \leq 320$ указывает на высокий риск; $E_r^i > 320$ указывает на экстремальный риск. RI классифицирован на четыре уровня: $RI \leq 150$, низкий риск; $150 < RI \leq 300$, умеренный риск; $300 < RI \leq 600$, значительный риск; $RI > 600$ – высокий риск. Значения коэффициента экологического риска E_r^i вследствие загрязнения потенциально токсичными элементами твердого осадка снега территории гор. Ангарск по элементам сильно варьируют: в промзоне от 2,5 до 280, в селитебной зоне от 1,7 до 227, что соответствует категориям экологического риска от низкого до высокого. В промышленной зоне низкий экологический риск зарегистрирован по Zn, V, Ni, Co и Mo, умеренный экологический риск - по As и Pb, высокий – по Cd и Hg. В селитебной зоне низкий экологический риск определен по Zn, V, Ni, Co, Mo и Pb, умеренный – по As, высокий – по Cd и Hg. Индекс RI в промышленной зоне на разных станциях отбора проб изменялся 526 до 1263, в среднем составляя 687 (высо-

кий риск). В селитебной зоне *RI* на разных станциях варьировал от 280 до 734, при среднем значении 508 (значительный риск).

1.3.2 Оценка загрязнения свинцом почвенного покрова территории бывшего Ангарского металлургического завода после его ликвидации

Получены новые результаты по оценке загрязнения свинцом техногенных почв территории бывшего АМЗ в гор. Свирск [12]. На изученной территории условно выделены три участка: №1 - территория, бывших отвалов, участок №2 - территория, где непосредственно располагались строения АМЗ, и 3-й участок - окрестности основной зоны загрязнения, которые отличались источниками загрязнения и типами техногенных почв. Пространственное распределение содержания свинца на этих участках показано относительно его ОДК (32 мг/кг) (рисунок 4).



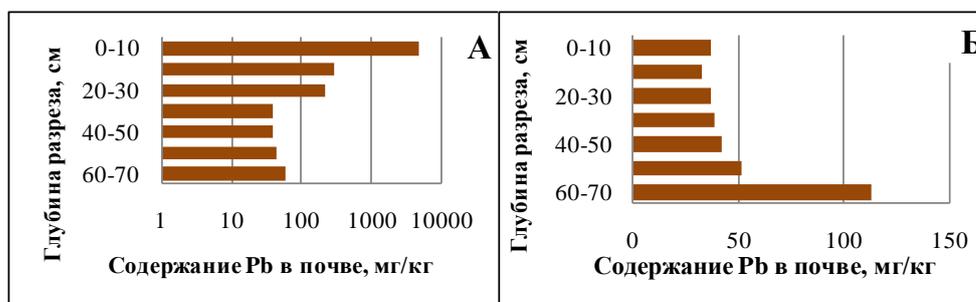
Участки: 1 – зона бывших отвалов АМЗ; 2 – бывшая территория здания АМЗ; 3 – территория за пределами участков 1, 2. Треугольниками обозначены почвенные разрезы 1, 2.

Рисунок 4 – Схема распределения концентраций свинца мг/кг

Аномалии свинца характеризуются повышенными концентрациями, значительно превышающими ОДК. Максимальное загрязнение свинцом до 4910 мг/кг, при среднем его содержании 1020 мг/кг, установлено в почве участка 1 зоны бывших отвалов. На территории участков 2 и 3 почвы менее загрязнены свинцом вследствие проведенных мероприятий по рекультивации почв. Среднее содержание Рb на участке 3 составляет 263 мг/кг, на участке 2, где ранее находились строения завода – 117 мг/кг.

После ликвидации отвалов осталась их корневая часть. Это видно по распределению Рb в почвенном профиле 1 (рисунок 5). Максимальное содержание свинца в верхнем гори-

зонте разреза 1 составляет 4510 мг/кг, резко снижаясь на глубине 40–70 см. Содержание свинца в поверхностном горизонте разреза 2 значительно ниже (рисунок 5) по сравнению с грунтами участка 1, но возрастает с глубиной. Это связано с тем, что свинец в почвах участка 2 имеет более подвижные формы, так как здесь проводилась возгонка сульфидных руд. В результате этого Pb мог более интенсивно мигрировать и сорбироваться на глинах, преобладающими в нижней части почвенного разреза.



Почвенные разрезы: 1 – А; 2 – Б

Рисунок 5 – Распределение концентраций Pb на глубину

Установлено, что основными факторами, влияющими на подвижность Pb в почве, являются рН и $C_{орг}$, что подтверждается значимой корреляционной зависимостью между этими параметрами (рисунки 6 и 7). При снижении значений рН в техногенном грунте участка 1 (рисунок 6) наблюдается повышение концентраций Pb в почве. Такая же закономерность установлена на участке 3 (рисунок 6). Это показано на 14 образцах дерново-карбонатных почв, незатронутых детоксикацией, находящихся в южной части изученной территории (рисунки 4, 6). На рисунке 7 видна высокая корреляционная зависимость между $C_{орг}$ и содержанием Pb в почве, что обусловлено внесением на этой территории чистых гумусовых почв с повышенным содержанием $C_{орг}$ и известкованием почв. Аналогичная закономерность прослеживается и в гумусовом горизонте дерново-карбонатных почв участка 3, незатронутых рекультивацией (рисунок 7). Свинец считается элементом, который прочно связывается с органическими компонентами почвы, особенно при ее известковании, что наблюдается и на изученной территории.

В процессе исследований изучены формы соединений свинца в грунтах и почвах, выделенных участков, показанных на рисунке 8, пункты опробования – на рисунке 1.

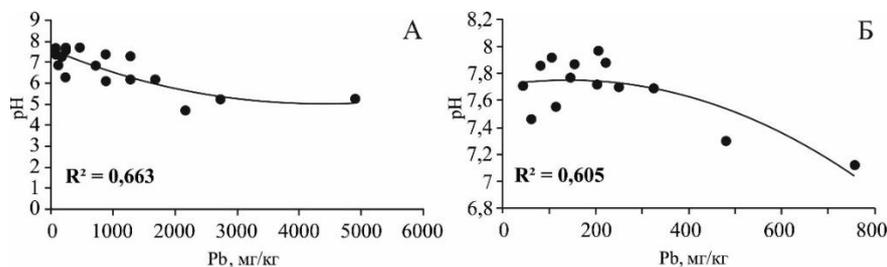


Рисунок 6 – Регрессионная зависимость концентраций Pb от pH при вероятности $p < 0,01$ в техногенном грунте участка 1 (А); в почвах участка 3 (Б) при $p = 0,01$

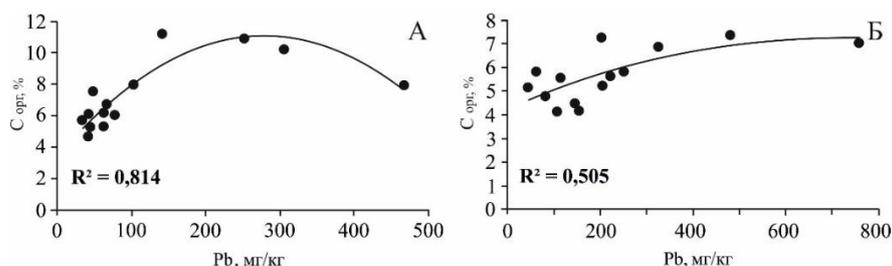
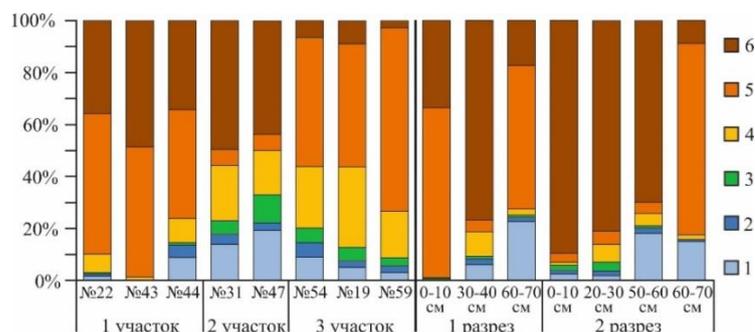


Рисунок 7 – Регрессионная зависимость концентраций Pb от $C_{орг}$ при $p < 0,001$ в почвах участка 2 (А); в почвах участка 3 (Б) при $p < 0,05$



Фракции: 1 – ионно-обменная; 2 – специфически сорбированная; 3 – органическая; 4 – гидроксидов-Fe; 5 – силикатная и легко разрушаемых минералов; 6 – остаточная.

Рисунок 8 – Распределение концентраций Pb по фракциям (процент от суммы фракций)

Свинец на участке 1 и в верхнем горизонте почвенного разреза 1, на месте бывшего отвала, концентрируется, в основном, в закреплённой силикатной фракции и легко разрушаемых минералов, а также в твёрдом остатке, что свидетельствует о слабой подвижности свинца на этой территории (рисунок 8). На удалении от отвалов за счёт пылевого переноса на участках 2 и 3 соединения свинца в почвах обладают более высокой подвижностью по сравнению с участком 1. На этих территориях до 50% Pb переходит в ионно-обменные, слабо сорбированные формы, концентрируется в органической фракции и образует соединения с гидроксидами Fe. С глубиной мобильность свинца также увеличивается, повышаясь в ионно-

обменных соединениях (рисунок 8). Установлено, что в результате длительного антропогенного воздействия происходили процессы высвобождения Pb из сульфидных минералов, а также менялось соотношение его форм нахождения в техногенных почвах.

1.4 Выводы

Проведенная оценка техногенного поступления потенциально токсичных микроэлементов пылеаэрозолей на территорию гор. Ангарск с применением методов химического, геоинформационного, корреляционного анализа, расчета показателей загрязнения и экологического риска позволила сделать следующие выводы:

– установлено, что основными источниками поступления микроэлементов-загрязнителей на территорию гор. Ангарск являются три крупных разнопрофильных производства, имеющих специфические геохимические спектры: ТЭЦ (As, U, Al, Hg), Ангарский нефтехимический комбинат (Fe, Co, Ni, Mo, V) и «АнгарскЦемент» (Cd, Pb, Zn, Cs и Ca);

– обнаружен высокий уровень загрязнения твердого осадка снега промышленной зоны гор. Ангарск Cd, Pb, Mo и Hg, селитебной зоны – Mo. Обе зоны также значительно загрязнены As, U и Co. Также вероятно поступление с талыми водами повышенных концентраций поллютантов в реки Ангара и Китой, что может оказать негативное влияние на микроэлементный состав речной воды и донных отложений;

– средние значения *RI* для промышленной зоны (687) и жилых кварталов (508) гор. Ангарск указывают на высокий и значительный уровень экологического риска, необходимость нормализации экологической обстановки в гор. Ангарск и будут востребованы при разработке мер, направленных на минимизацию негативного техногенного воздействия.

– показано, что содержание свинца в почвах и грунтах на поверхности остается очень высоким, превышающим ОДК в 60–150 раз в зоне бывших отвалов. Основными факторами, влияющими на иммобилизацию свинца в техногенной почве, являлись: изменения pH, образование органических форм свинца, а также связь его с гидроксидами Fe, карбонатами и глинистыми отложениями. Большая часть этого элемента остается связанной с фракцией легко разрушаемых минералов и в твердом остатке, что, в целом, указывает на относительно невысокую его подвижность. Установлено, что изученная территория остается потенциально опасной зоной для проведения непосредственно на ней какой-либо хозяйственной деятельности. Можно рекомендовать проведение на этой территории в аномальных зонах биоремедиации почв, что замедлит распространение свинца в окружающую среду. Полученные результаты по изучению механизма миграционной подвижности Pb в техногенных почвах при

различных его источниках загрязнения могут иметь также большое практическое значение при проведении дальнейших мониторинговых исследований и разработки новых технологий для ремедиации почв, загрязненных свинцом.

Полученные результаты могут представлять не только практический, но и теоретический интерес, связанный с особенностями миграции свинца в грунтах отвала и техногенных почвах окрестностей, где распространены пылевые источники этого элемента, способные инициировать повышенную мобильность свинца и его накопление в растениях и пищевой цепи человека.

2 Исследование особенностей распределения ПХБ и ХОП в наземной растительности в фоновом районе (о. Ольхон)

2.1 Введение

Полихлорированные бифенилы (ПХБ) и хлорорганические пестициды (ХОП), в т.ч. дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и его метаболиты и гексахлорциклогексан (ГХЦГ) – яркие представители группы стойких органических загрязнителей (СОЗ) [13]. Они токсичны и способны накапливаться в пищевых цепях и сохраняться в объектах окружающей среды длительное время [14,15]. ПХБ и ХОП вызывают отдаленные эффекты, включая онкологические заболевания, а также нарушения развития, эндокринные, репродуктивные и иммунологические расстройства и др. В результате трансграничного атмосферного переноса ПХБ и ХОП поступают в удаленные от источников районы и становятся проблемой как промышленных территорий, так и фоновых регионов мира. Определение степени загрязнения СОЗ атмосферного воздуха возможно прямым определением с использованием активного или пассивного воздушного пробоотбора [16], также по косвенным объектам (например, отдельные виды растений [17]). Кроме того, растения выполняют роль фильтраторов СОЗ из атмосферного воздуха, способствуя в дальнейшем поступлению в почву с опадом и при эрозии и сбросе воскового слоя листа, вызванных ветром или дождем [18].

Цель настоящей работы: изучить особенности распределения ПХБ и ХОП в разных растительных сообществах наземных экосистем фоновых районов Байкальского региона как показателя последствий глобального/регионального атмосферного переноса СОЗ и роли растительности в самоочищении экосистем.

Задачи:

- определить содержание ХОП и ПХБ в древесной, кустарниковой и травянистой растительности в разных растительных сообществах в фоновом районе;

- изучить взаимосвязь концентраций ХОП и ПХБ в древесной, кустарниковой и травянистой растительности с концентрациями в почвах.

2.2 Материалы и методы

Для исследований выбран о. Ольхон (рисунок 9), где основным источником поступления СОЗ является атмосферный перенос [19, 20]. Выбор о. Ольхон обусловлен и разнообразием типов почв и растительных сообществ. Растительность острова представляет собой сложное образование, формирующееся под воздействием рельефа и климата, и состоит из комплексов фитоценозов степного, псаммофитного и лесного типов [21]. Для исследования были выбраны Нюрганский песчаный массив (дюны – Д и сосновый лес на останцах – СЛО – псаммофитные комплексы растительности), лиственничный лес – ЛЛ – лесной комплекс, луг в сосновом лесу – Л луговой комплекс, степь – С – степной комплекс и сосновый лес – СЛ – таежный светлохвойный комплекс растительности.

Травянистая растительность была отобрана на первых четырех станциях (Д, СЛО, ЛЛ и Л), листья кустарничковых (брусника) – на двух станциях (ЛЛ и СЛ), лишайники, хвоя и кора хвойных деревьев – на двух станциях (ЛЛ и СЛО) и мох – в лиственничном лесу (ЛЛ).

На этих же станциях ранее получены содержания ПХБ и ХОП в почвах [19].

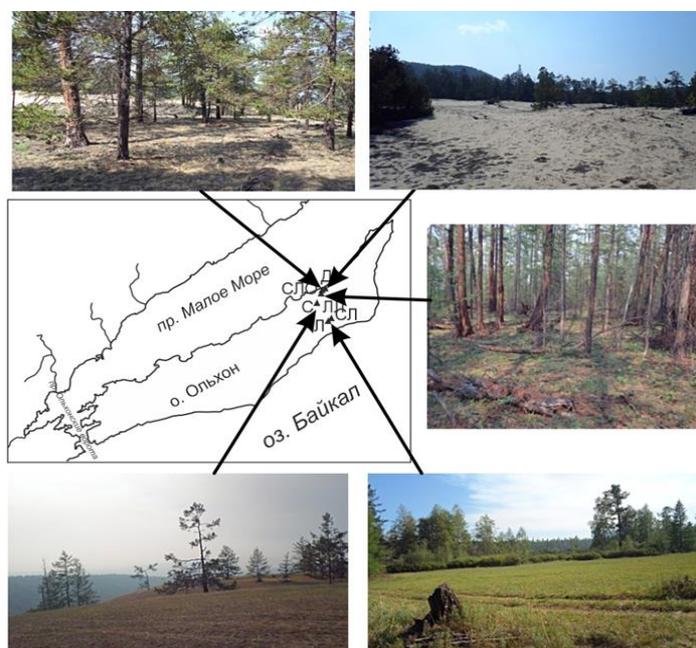


Рисунок 9 – Фотографии исследованных растительных сообществ на о. Ольхон

Пробы упаковывали в алюминиевую фольгу и до анализа хранились при температуре -20°C . Анализ проведен в ИГХ СО РАН. Листья, хвоя и кора измельчались до размера 0,5–1,0 см с использованием металлических ножниц, предварительно промытых с использованием хозяйственного мыла и затем смесью ацетон-гексан осч (1:1). Пробы были высушены при комнатной температуре до постоянного веса. Пробоподготовка образцов включала экстракцию в аппаратах Сокслетта смесью ацетон:гексан (1:1) в течении 8 ч; очистку с использованием гелипроникающей хроматографии (Bio-Beads S-X3) и Al-Si-колонки; упаривание в токе азота до 0,1 мл. В каждой пробе были определены 43 конгенера ПХБ, включая индикаторные ПХБ (№№ ИЮПАК 28, 52, 101, 138, 153, 180), *p,p'*-ДДТ, *p,p'*-дихлордифенилдихлорэтан (*p,p'*-ДДД), *p,p'*-дихлордифенилдихлорэтилен (*p,p'*-ДДЭ), α -ГХЦГ и γ -ГХЦГ. Анализ проведен с использованием газового хроматографа (ГХ) HP 5890 series II GC, совмещенного с детектором электронного захвата (ДЭЗ) и хромато-масс-спектрометра Хроматэк Кристалл 5000 (приобретен ИГХ СО РАН в 2020 г. в рамках нацпроекта по обновлению приборной базы научных институтов) и оснащенных капиллярной колонкой DB-5, 0,25 мкм длиной 60 м (J&W Scientific). Качество анализа проверенос помощью лабораторных бланков в каждой серии проб и с использованием сертифицированных референтных материалов CRM814 и CRM962.

2.3 Результаты и обсуждение

Максимальное содержание исследованных ХОП обнаружено в коре сосны и лиственницы (3,6 и 4,5 нг/г с.в.), ниже в лишайниках (0,83–0,94 нг/г с.в.), затем в хвое сосны и лиственницы (0,65–0,66 нг/г с.в.). В травянистых растениях листьях кустарничков и мхе величины суммы ХОП были наименьшими (0,18–0,56 нг/г с.в.).

Соотношение сумм $\alpha+\gamma$ -ГХЦГ и ДДТ и его метаболитов в растениях отличается от почв, отобранных там же. Если в почвах в сумме ХОП доминируют *p,p'*-ДДТ или его метаболит *p,p'*-ДДЭ (до 45 % в лесной почве (ЛЛ) и до 54 % в степной почве (С) от суммы ХОП, соответственно), то в растениях доминирует α -ГХЦГ (до 64 % от суммы ХОП в коре лиственницы).

Техническая смесь ГХЦГ сосстит из 53–70 % α -изомера, 3–14 % β -изомера, 11–18 % γ -изомера, 6–10% δ -изомера, 3–5% других изомеров ГХЦГ [22]. Линдан содержит более 99 % γ -ГХЦГ [22]. По соотношению α -ГХЦГ и γ -ГХЦГ в объектах окружающей среды можно судить о происхождении ГХЦГ [23, 24]. В нашем исследовании отношение α -ГХЦГ/ γ -ГХЦГ во всех пробах растительности, как и в соответствующих почвах выше 1, предполагает поступ-

ление технической смеси ГХЦГ, а не линдана, в изученные экосистемы. На территории отдельных населенных пунктов в Ольхонском районе ранее были найдены локальные участки с повышенным уровнем загрязнения почв ГХЦГ и отношением $\alpha\text{-ГХЦГ}/\gamma\text{-ГХЦГ} > 1$, т.е. поступление ГХЦГ в окружающую среду района произошло при использовании технических смесей ГХЦГ [20].

Если рассматривать отношение $\alpha\text{-ГХЦГ}/\gamma\text{-ГХЦГ}$ в пределах одного растительного сообщества, например, лесного, то исследованные пробы растительности распределяются по величине $\alpha\text{-ГХЦГ}/\gamma\text{-ГХЦГ}$ в следующем порядке: травянистая растительность (1,07) < листья кустарничков (1,23) < мох (1,84) = лишайник (1,86) < хвоя лиственницы (3,05) < кора лиственницы (4,43). В почвах здесь же $\alpha\text{-ГХЦГ}/\gamma\text{-ГХЦГ} = 3,26$ [19]. В атмосферном воздухе в пос. Хужир на о. Ольхон $\alpha\text{-ГХЦГ}/\gamma\text{-ГХЦГ} = 6,5$ [20].

Древесная растительность лучше адсорбирует ГХЦГ в листве/хвое и коре из атмосферного воздуха в сравнении с травянистой растительностью и кустарничками [18]. Накопленные ГХЦГ в хвое и коре деревьев затем поступают в почву с опадом. Это приводит, соответственно, к большему накоплению ГХЦГ в лесных почвах, относительно почв открытых пространств. Отношение суммы метаболитов p,p' -ДДД и p,p' -ДДЭ к исходному веществу p,p' -ДДТ отражает давность поступления пестицида в окружающую среду. Величина $(p,p'$ -ДДД + p,p' -ДДЭ) / p,p' -ДДТ < 1 говорит о «свежем», недавнем применении ДДТ, > 1 – о давнем поступлении ДДТ и его трансформации почвенными микроорганизмами [23]. Отношение $(p,p'$ -ДДД + p,p' -ДДЭ) / p,p' -ДДТ уменьшается в следующем порядке: хвоя сосны и лиственницы (2,23-6,71) > лишайники (0,65-1,42) = травянистая растительность (0,96-1,22) = листья кустарничков (0,95-1,30) = мох (0,95) > кора сосны и лиственницы (0,43-0,53). Распределение отношений по отдельным группам растительности различается по растительным сообществам. В степных, луговых и псаммофитном сообществах величина отношения метаболитов ДДТ к исходному пестициду p,p' -ДДТ в травах ниже, чем в почвах. В лиственничном лесу $(p,p'$ -ДДД + p,p' -ДДЭ) / p,p' -ДДТ изменяется таким образом: кора лиственницы (0,53) < (почва: 0,75) < мох (0,95) = травы (преимущественно злаковые) (0,97) < листья кустарничков (1,30) < лишайник (1,42) < хвоя лиственницы (6,71). То есть, чем ниже ярус растительности (кроме коры лиственницы), тем ближе величина отношения в растениях к величине отношения в почвах, но остается выше их.

Самые высокие отношения $(p,p'$ -ДДД + p,p' -ДДЭ) / p,p' -ДДТ найдены в хвое лиственницы и сосны (6,71 и 2,23, соответственно), а самые низкие – в коре лиственницы и сосны (0,53 и 0,43, соответственно). Величины отношений $(p,p'$ -ДДД + p,p' -ДДЭ) / p,p' -ДДТ в коре

лиственницы и сосны близки к аналогичным величинам в почвах лиственничного и соснового лесов (0,75 и 0,57, соответственно). Хвоя отражает текущие концентрации в атмосферном воздухе, формирующиеся в результате регионального/глобального атмосферного транспорта, тогда как травянистые и кустарничковые растения – совокупность влияния атмосферного переноса и испарения с поверхности почв органических соединений. В атмосферном воздухе в пос. Хужир на о. Ольхон в 20 км от места отбора проб растений среднегодовое отношение $(p,p'-\text{ДДД}+p,p'-\text{ДДЭ})/p,p'-\text{ДДТ}$ было 1,2, а в летний период поднимается до 2,27 [20], что соответствует результатам для хвои сосны и лиственницы с учетом расстояния между точками отбора проб воздуха и растительности. Накопление СОЗ в коре древесных растений происходит из атмосферного воздуха и по времени продолжается дольше, чем в кроне этих же древесных растений и в других рассмотренных видах растений из нижнего яруса лесной экосистемы. Поэтому суммарные концентрации ДДТ и его метаболитов самые высокие среди всех рассмотренных типов растительности.

Суммарное количество ПХБ в пробах растительности в среднем составляют 3,49 нг/г с.в. и изменяются от 1,67 нг/г в травах в сосновом лесу на останцах до 4,65 нг/г в листьях кустарничков в лиственничном лесу. Доля шести индикаторных конгенов ПХБ в сумме всех конгенов ПХБ составляет в среднем 28% (25–32%). Нет какой-либо явной зависимости в уровнях концентраций ПХБ от вида растительности. Наибольшие концентрации обнаружены в листьях кустарничков лиственничного и соснового лесов (4,65 и 4,61 нг/г, соответственно). Близкие к ним уровни содержания ПХБ найдены в травянистых растениях песчаных дюн, в хвое лиственницы и лишайнике в лиственничном лесу. Самые низкие уровни суммы ПХБ обнаружены в травах в сосновом лесу на останцах.

В гомологическом составе ПХБ в почвах доминируют пентаХБ (до 48% в песках дюн) и затем тетраХБ (41% в степных почвах) (рисунок 10).

В пробах трав доли тетраХБ и пентаХБ в сумме ПХБ изменяется от 41 и 38%, соответственно, в сосновом лесу на останцах, до 31 и 48%, соответственно, в луговом сообществе (рисунок 11). В хвое деревьев доля пентаХБ > доли тетраХБ, а в коре – доли пентаХБ и тетраХБ в сумме ПХБ равные (рисунок 12). Изменения гомологического состава ПХБ связано с набором видов растительности в сообществе. Смещение в сторону увеличения низкохлорированных (триХБ и тетраХБ) относительно высокохлорированных (пентаХБ и гексаХБ) соединений происходит в результате большей способности низкохлорированных ПХБ к испарению с поверхности почв и к атмосферному транспорту.

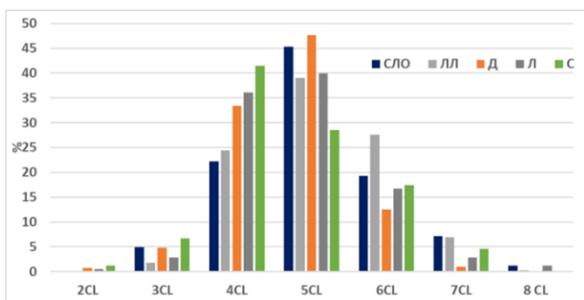


Рисунок 10 – Гомологический состав ПХБ в почвах исследованных растительных сообществ (%)

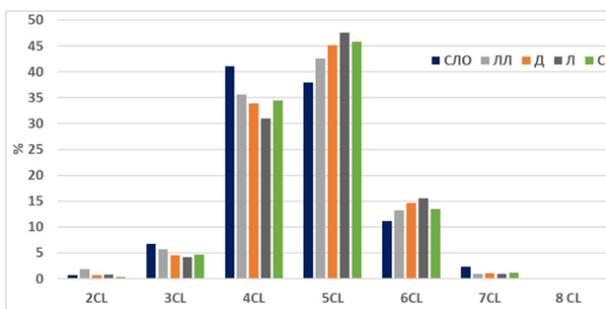


Рисунок 11 – Гомологический состав ПХБ в травянистых растениях (%)

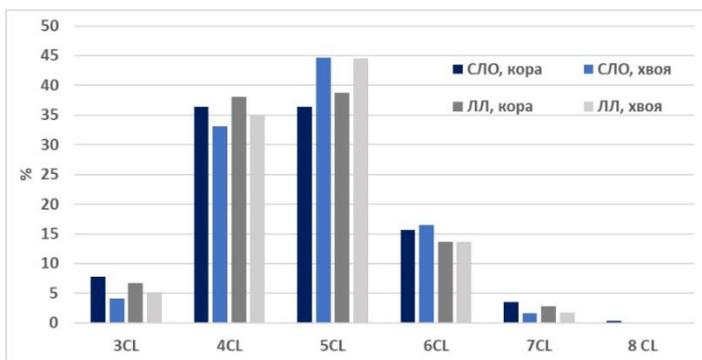


Рисунок 12 – Гомологический состав ПХБ в коре и хвое древесных растений (%)

Поступление в растения токсикантов возможно через корни, испарения из почв, осаждения из атмосферы и загрязнения почвенными частицами [25]. Первый путь поступления в растения может быть использован для фиторемедиации почв [26]. Однако, только незначительное количество видов растений способно поглощать СОЗ из почв и переносить органические соединения из корней в надземную часть растения. Содержание СОЗ в надземной части растения в основном, обусловлено остальными тремя путями поступления. От пути поступления зависит относительный состав СОЗ [26]. Например, осаждение из воздуха приводит к увеличению доли три и тетра-хлорированных ПХБ. А загрязнение растения ПХБ с частицами почвы приведет к конгенерному составу близкому к составу в почве. Относитель-

ный состав индикаторных конгенов ПХБ в почвах и растительности в исследованных растительных сообществах представлен на рисунке 13.

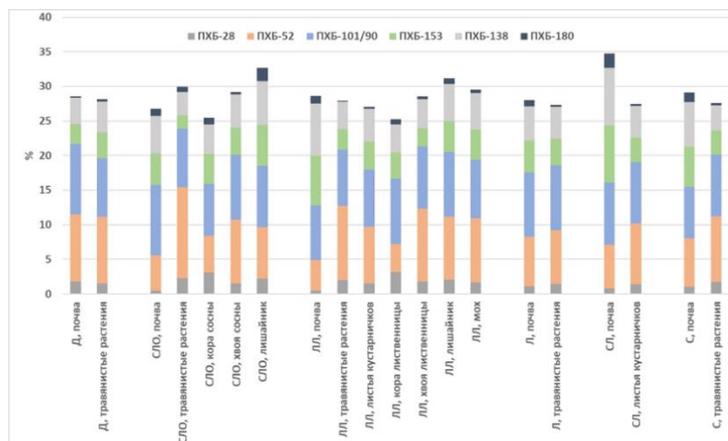


Рисунок 13 – Относительный состав индикаторных конгенов ПХБ в почвах и растительности (%)

В почвах и травах в псаммофитном сообществе на песчаных дюнах относительный состав индикаторных конгенов ПХБ, характеризующих уровни хлорированности от триХБ до гептаХБ, близок, что говорит о загрязнении растения преимущественно частицами почв и подтверждается сильной зависимостью между содержанием отдельных конгенов ПХБ в почвах и травянистой растительности ($R^2=0,97$) (рисунок 14).

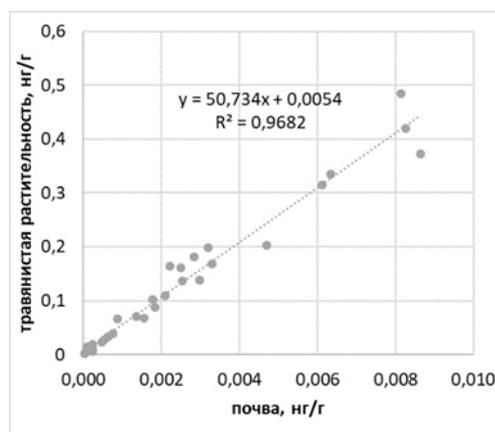


Рисунок 14 – Взаимосвязь содержания отдельных конгенов ПХБ в почвах и растительности в псаммофитном сообществе на дюнах

Испарение ПХБ из почвы уменьшается при увеличении уровня хлорированности ПХБ, поэтому в растениях относительно почвы доля высокохлорированных ПХБ будет ниже. Так, например, в лиственничном лесу в почвах доли ПХБ-52 (тетраХБ) и ПХБ-153 (гек-

саХБ) составляют 4,41 и 7,14%, соответственно, тогда как в растительных пробах (кроме коры лиственницы) – 8,15-10,7% и 2,61-4,48%, соответственно (рисунок 13).

Отношение концентраций ПХБ в растительных пробах в этом же растительном сообществе к концентрациям в почвах снижаются по мере увеличения количества атомов хлора в молекуле ПХБ (рисунок 15) от 5,31-11 раз для ПХБ-28 (триХБ) до 0,24-0,60 раз для ПХБ-187 (гептаХБ), что показывает насыщенность низкохлорированными конгенерами ПХБ растительности по отношению к почве в лиственничном лесу и основное поступление в растения ПХБ путем осаждения из воздуха и в результате испарения из почв и повторного осаждения на растениях.

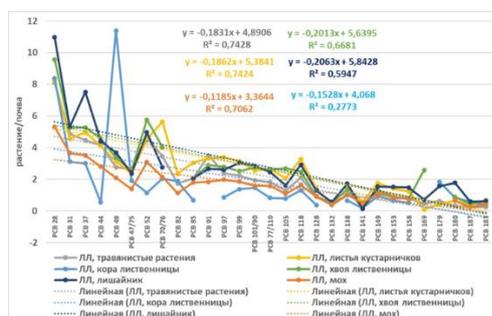


Рисунок 15 – Отношение концентраций конгенов ПХБ в растениях к концентрациям соответствующих конгенов ПХБ в почвах (номера конгенов ПХБ в соответствии с классификацией ИЮПАК) в лиственничном лесу

Отмечено значительное превышение величин отношений концентраций в растениях и почвах в псаммофитном сообществе на дюнах над величинами отношений в других растительных сообществах как для пестицидов (рисунок 16), так и для отдельных конгенов ПХБ (рисунок 17). Причем в травянистых растениях псаммофитного сообщества величина этого отношение увеличивается по мере увеличения уровня хлорированности, а в других – снижается (рисунок 17). Такое отличие накопления ПХБ в растениях псаммофитного сообщества возможно связано с низким содержанием здесь $C_{орг}$ в грунтах и высокой липофильностью СОЗ, что приводит к преимущественной аккумуляции СОЗ на органических остатках наземных и подземных частей растений и прикорневых субстратах, богатых органическим веществом.

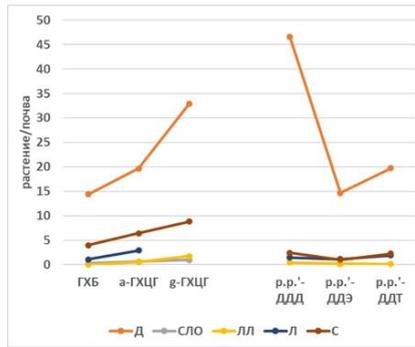


Рисунок 16 – Отношение концентраций ХОП в травянистых растениях к их концентрациям в почвах в разных растительных сообществах

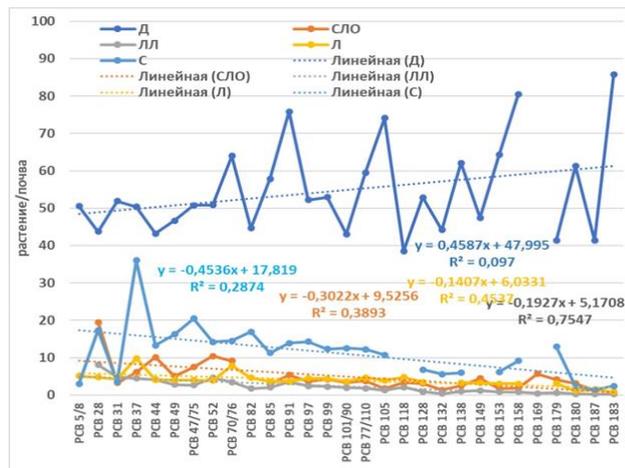


Рисунок 17 – Отношение концентраций конгенов ПХБ в травянистых растениях к концентрациям соответствующих конгенов ПХБ в почвах в разных растительных сообществах

3 Разнонаправленная динамика изменения химического состава воды истока р. Ангары (сток Байкала)

3.1 Введение

Озеро расположено в Байкальской рифтовой зоне (рисунок 18). Средняя мощность земной коры под котловиной оз. Байкал составляет около 36 км; в Южно-Байкальской впадине установлена максимальная раздробленность фундамента разломами, и часто происходят землетрясения [27]. Водосборный бассейн озера сложен различными по составу и возрасту породами с рудопроявлениями и месторождениями полезных ископаемых, а также термальными источниками воды разного минерального состава. В притоках Байкала распространены различные типы вод по их преобладающему питанию. Ранее было выявлено внутривековое изменение климата и уровня воды Байкала, установлены особенности горизонтального перемещения поверхностных вод в трех его котловинах. Возможность динамиче-

ского поднятия глубинных вод в Байкале высказывалась ранее [28]. Подъем глубинных вод и опускание поверхностных вод вдоль берегов (апвеллинг/даунвеллинг) также доказан [29]. Гагаринова О.В. в своей работе [30], рассматривая Байкальскую водную экосистему, отмечает способность воды к самоочищению. В зимнее время в озере установлено наличие подледного термоклина, откуда вода поступает в исток р. Ангары, незамерзающий в течение года. Это обстоятельство позволяет проводить опробование воды истока в любое время года, выполняя многолетний геохимический мониторинг.

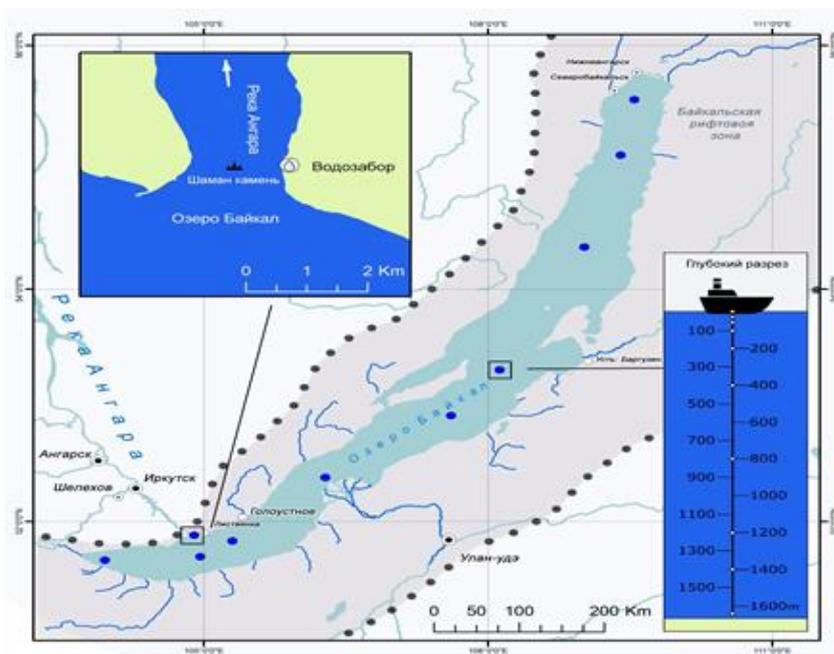


Рисунок 18 – Схема отбора проб воды Байкальской водной экосистемы (квадратом выделен исток Ангары, голубыми точками – места отбора воды в озере) для химического анализа [31]

Цель работы – поиск и выяснение возможных причин ежегодных изменений химического состава воды истока реки за последние 72 года для макрокомпонентов (1950–2022 гг.) и за последние 17 лет для микрокомпонентов (2006–2022 гг.).

3.2 Материалы и методы

Ранее в ИГХ СО РАН выполнен сравнительный анализ опубликованных литературных данных (1950–1995 гг.) и собственной аналитической информации (1997–2022 гг.) для выявления возможных изменений химического состава воды истока Ангары. С 2006 г. по настоящее время в истоке реки проводится сопряженный ежемесячный анализ воды на макро- и микрокомпоненты и ртуть. Также проводится опробование и анализ воды во время

землетрясений и геодинамических подвижек в Байкале. В 2011, 2013, 2018–2022 гг. весной, летом и осенью проводился отбор проб поверхностной и глубинной воды Байкала (рисунок 18). За 1997–2022 гг. в ИГХ СО РАН отобрано и проанализировано более 120 проб воды озера и более 500 проб воды истока Ангары.

Анализ на макрокомпоненты выполнялся по общепринятым методикам (титриметрия, потенциометрия, турбометрия и др.) и с использованием научного оборудования аккредитованного и сертифицированного аналитического центра «Изотопно-геохимические исследования» Института геохимии СО РАН [32]. Анализ на микрокомпоненты выполнялся методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (прибор ELEMENT 2, фирма Finnigan MAT, Германия). Ртуть определялась атомно-абсорбционным методом на приборе РА-915+ с приставкой РП-91 при компьютерной регистрации.

По данным Росгидромета в 2015–2016 гг. уровень воды в озере Байкал соответствовал экстремально низкой водности по сравнению с предыдущими годами исследований. На основном притоке озера Байкал – р. Селенга – в июле–августе 2016 г. наблюдалось опасное гидрологическое явление – низкая межень. С 2018 г. приток воды в Байкал увеличивается, в последующие годы (2019–2022 гг.) наблюдается подтопление устьев притоков, впадающих в Байкал, а также береговой зоны Байкала и р. Ангары.

Исследование годовых температур поверхностной воды в истоке Ангары показало закономерность в их изменении с 1960 г. по 2016 г. с постепенным повышением от 0,5 до 1,5 °С. Данные по межгодовым и годовым температурным трендам воды в 1960–2016 гг. (рисунок 19) соответствуют полученным нами трендам изменений температуры воды в истоке Ангары в 2006–2013 гг. В 2014–2016 гг. отмечались высокие температуры воздуха, воды выше 8 °С в истоке Ангары, отсутствие или низкое количество атмосферных осадков и частые пожары вокруг Байкала. За последние 6 лет (2017–2022 гг.) максимальные значения температуры воздуха отмечалась летом 2018 г. – до +25 °С, а минимумы – в январе 2018 г. до –30 °С. Вода в истоке Ангары максимально прогревалась летом и осенью 2020 г. до +17 °С, однако среднегодовая температура воды в истоке Ангары с 2017 г. понизилась с 8 до 4°С (рисунок 19). Понижение температуры воды в истоке Ангары может быть обусловлено подъемом более холодной глубинной воды Байкала во время частых землетрясений в 2017–2022 гг. в районе оз. Хубсугул (Монголия) и отражающихся в Байкале за счет расположения обоих озер в одной рифтовой зоне.

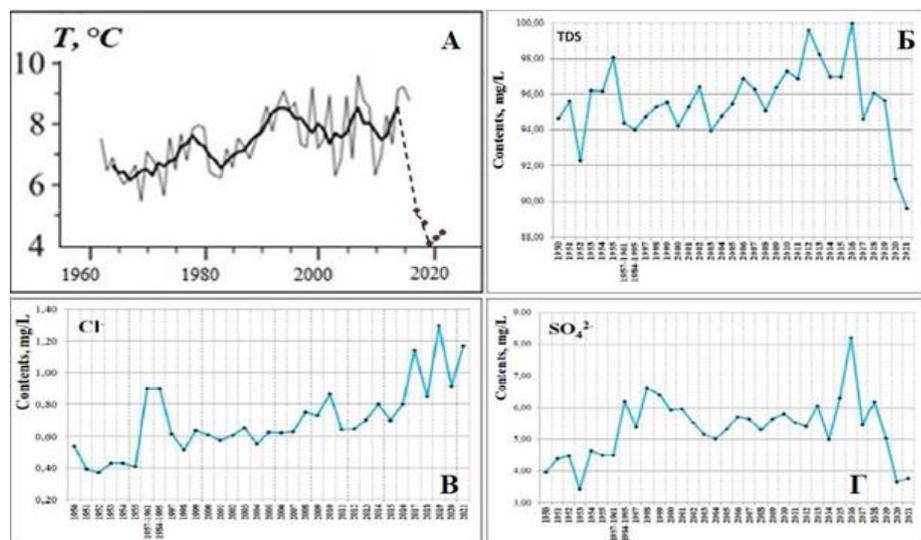


Рисунок 19 – средняя годовая температура поверхности воды в 1960–2016 гг. в истоке Ангары (тонкие линии) и ее пятилетнее скользящее среднее значение (жирные линии) [33], среднегодовая температура воды в 2017–2021 гг. (пунктир – авторские данные) (А) и среднегодовые значения состава воды: Б - TDS, В - Cl⁻, Г - SO₄²⁻ истока р. Ангары в 1950–2021 гг. [34, 35]

3.3. Результаты

3.3.1 Макрокомпонентный состав воды

Данные по макрокомпонентному составу, полученные в 1997–2022 гг., подтверждают низкую минерализацию (TDS) и бикарбонатно-кальциевый состав воды Байкала и истока Ангары (рисунок 19), которые отмечались исследователями ранее. В 2017 г. средняя минерализация воды истока составляла 94,61 (86,7–98,96) мг/л, в 2018 г. – 95,59 (91,04–101,7) мг/л, в 2019 г. – 95,64 (92–97,9) мг/л. В 2020–2021 г.г. произошло заметное снижение минерализации ((91,25 (76,5–101,4) мг/л и 89,61 (84,8–94,9) мг/л), соответственно). Ранее такая низкая TDS в воде истока Ангары отмечалась в 1952 г. Одновременно в последние годы снизились значения SO₄²⁻, HCO₃⁻, незначительно увеличились концентрации хлорид-иона и фтор-иона. Понижение содержаний сульфат-иона и гидрокарбонат-иона, возможно, было обусловлено закрытием в 2013 г. Байкальского целлюлозно-бумажного комбината.

Циклично-волновое изменение TDS воды в Ангаре с постепенным незначительным нарастанием значений отмечалось с 1950 г. до 2016 г. (рисунок 19). Полученные данные по минерализации воды истока Ангары коррелируют с температурными циклами воды и с последовательным незначительным повышением среднегодовых температур. Общая минерализация воды истока фиксирует длительный восходящий природный цикл изменений с 1950 г. до 2016 г., а далее начинается понижение значений TDS и главных ионов – SO₄²⁻, HCO₃⁻. С

2021 г. отмечается некоторое увеличение содержаний главных ионов (SO_4^{2-} , HCO_3^-) и TDS в воде истока Ангары, что, возможно, означает начало положительной динамики в обновлении воды истока Ангары и Байкала.

В 2016 г. заканчивается положительная направленность циклично-волнового распределения концентраций макрокомпонентов в воде, начинается снижение концентраций главных ионов и общей минерализации. Эти тренды также имеют циклично-волновой характер, когда проявляются сезонные изменения: минерализация снижается в летнее время и повышается в холодное время года. Если предыдущие годы (2017, 2018 гг.) в Прибайкалье были относительно засушливые и пожароопасные, то в 2019–2021 г. на реках Байкальской экосистемы отмечались наводнения и подтопления, однако катастрофических изменений в химическом составе воды истока и Байкала не отмечалось. Сезонные и годовые значения TDS обусловлены, главным образом, изменениями концентрации гидрокарбонат-ионов, катионов кальция и сульфат-ионов, понижающимся преимущественно в теплое время года – лето-осень.

Гидрохимический анализ истока р. Ангары в 1950-2021 гг. (рисунок 19) позволил установить циклы концентраций главных ионов и TDS длящиеся более 10 лет. В дополнение к длительным циклам могут происходить ежемесячные волновые (сезонные) изменения минерализации воды и даже дневные, обусловленные кратковременными природными явлениями: землетрясениями, ураганами, штормами, пожарами и др. В целом низкая минерализация (76-110 мг/л, в среднем примерно на уровне 95-96 мг/л) воды истока Ангары сохраняется уже более 70 лет, с 1950 г. по 2022 г. Заметные гидрохимические изменения, или новый геохимический цикл, наметился после 2017 г., что также может являться результатом влияния разных факторов, в том числе климатических и гидродинамических.

Концентрации азотсодержащих ионов в поверхностных водах истока подвержены заметным сезонным колебаниям: они минимальны в вегетационный период с ростом фитопланктона и, как правило, содержания их начинают расти осенью и достигают максимумов зимой. Начиная с 2018 года, содержания NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ в истоке Ангары заметно повышались летом и осенью. Это соотносится с увеличением числа туристов и интенсивным сбросом сточных вод с туристических баз и гостиниц в юго-западной части Байкала (пос. Листвянка). В 2020–2022 гг. содержания азотсодержащих компонентов заметно понизились из-за меньших сбросов сточных вод в период пандемии и постоянных проверок природоохранными органами.

Концентрация фторид-иона в воде истока в 2017–2022 гг. изменялось от 0,16 до 0,26 мг/л, что соответствует предыдущим годам исследований. Иногда повышенные содержания обнаруживались весной, когда озеро освобождалось от снега и льда, и эта тающая загрязненная масса поступала в исток Ангары.

Повышенные содержания кислорода (>12 мг/л) в воде истока были отмечены в течение 2018 г. Обычно его содержание снижается в летнее время в связи с бурным развитием фито- и зоопланктона. В 2021–2022 гг. содержание кислорода в истоке Ангары изменялось от 10 до 13 мг/л. Полученные среднегодовые данные по макроэлементному составу воды истока Ангары в 1950–2022 гг. близки или ниже предельно допустимых концентраций не только питьевой воды, но и воды рыбохозяйственных водоемов. Это означает, что вода истока Ангары, как и вода Байкала сохраняют свою чистоту, что крайне важно для человека и для биоты.

3.3.2 Микроэлементный состав воды

Большинство микроэлементов в воде Байкала и Ангары, в целом, имеют довольно низкие концентрации, значения многих из них (например, Be, Sn, Sb, Se, Ag, Ta, Nb, некоторые РЗЭ и др.) часто бывают ниже предела обнаружения метода ICP-MS. Резкие повышения содержаний элементов из этой группы не всегда удается объяснить. Конечно, есть природные факторы, которые уже отмечались – поступление элементов из вмещающих Байкал пород при их дренировании многочисленными притоками, влияние минеральных источников на берегах озера, таяние снегового покрова на Байкале, возрастающий туристический поток. Однако разовые аномальные концентрации многих микроэлементов объяснить не всегда возможно. К микроэлементам, содержания которых могут часто повышаться в воде Байкала и истока Ангары более, чем на 2–3 порядка (рисунок 20), относятся Fe, Mn, Hg, Al, Zn, Pb, Cu, Cr, что ранее уже нами отмечалось [31]. Различия в концентрациях остальных элементов менее контрастны. Рассмотрим возможные причины волатильности концентраций некоторых элементов.

Резкие повышения содержаний Fe и Mn в воде истока Ангары и Байкала (рисунок 20) можно объяснить наличием в донных осадках оз. Байкал большого количества железомарганцевых конкреций, содержащих кроме железа и марганца их элементы-спутники – Zn, Ni, Cr, Co, Cu. Эти элементы могут частично растворяться из конкреций в восстановленных осадках вблизи редокс-границы [36] и обогащать не только поровые воды, но и придонную воду озера, а затем, соответственно, и воду истока Ангары. Такие процессы могут быть мо-

билизованы при геодинамических подвижках, землетрясениях, штормах и других аномальных природных процессах на Байкале.

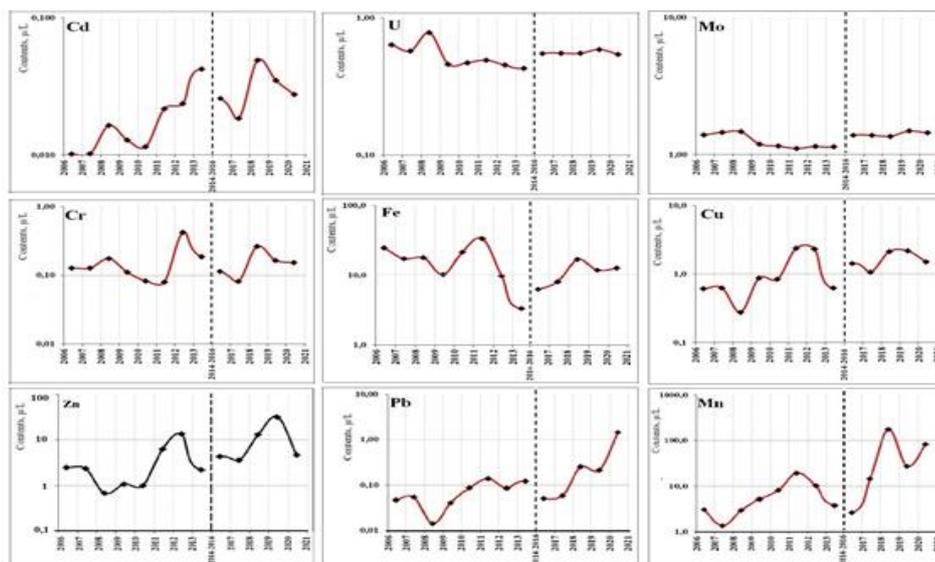


Рисунок 20 – Среднее годовое распределение значений микроэлементов в воде истока р. Ангары в 2006–2021 гг. (вертикальный пунктир – отсутствие данных за 2014-2016 гг.)

Содержания Be в воде Байкала и истока довольно низкие, но в воде литорали в северо-западной части Байкала и в устье его притока р. Рель концентрации бериллия бывают существенно повышены. Также здесь повышены суммы редкоземельных элементов, фтора и тория. Р. Рель дренирует массив редкометалльных гранитов с флюоритовой минерализацией [37, 38], которые могут быть источником поступления перечисленных элементов в воду Байкала при их разрушении и выщелачивании.

Другим примером влияния вмещающих коренных пород на воду Байкала и истока являются относительно повышенные концентрации в воде урана в некоторых притоках Байкала. Так, повышенные содержания урана обнаружены на западном побережье Байкала. Здесь, а также в притоках в районе гор. Слюдянка, на побережье Тажеранской степи и на острове Ольхон в породах было обнаружено нахождение урансодержащего минерала – менделеевита [39]. Возможны и другие причины небольших вариаций концентраций урана, например, влияние органических компонентов в донных осадках Байкала и поглощение ими растворенного урана из водной толщи. Известно также, что повышенное содержание урана может коррелироваться с повышением концентраций Fe в воде.

Концентрации большинства микроэлементов (S, Mo, Li, U, Cd, Se и др.) в воде Байкала и истока Ангары низкие, различаются незначительно – максимум в 2–3 раза (рисунок 20).

Стоит учитывать воздействие на воду Байкала и истока Ангары имеющихся вокруг Байкала холодных и горячих источников с повышенными содержаниями некоторых ионов и микроэлементов. Такие источники имеют значительно более высокие концентрации SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , Na и Si , чем в озерной воде Байкала, а также обогащены Li , Rb , Cs , Ga , As , W . Повышенные концентрации Co , Ni , Zn и Cd предполагают наличие в районах их нахождения на глубине сульфидной минерализации и ее дренажа термальными водами. Несмотря на то, что источники имеют более значительное обогащение по сравнению с байкальской водой для ряда элементов, их влияние на воду Байкала отмечается только в его литоральной зоне и является незначительным (локальным) из-за действия системы течений в Байкале.

Ранее П.В. Коваль с другими исследователями отмечали кратковременное экстремальное повышение Hg в воде р. Ангары во время землетрясений, превышающее предельно допустимую концентрацию рыбохозяйственных водоемов (0,01 мкг/л), которое назвали «ртутным дыханием Байкала» [40]. Такое явление относится к природным катаклизмам и подтверждается нашими исследованиями [41] (рисунок 21). Было установлено повышение концентраций ртути в 4–5 раз по сравнению с фоновыми содержаниями в воде устьев притоков Байкала, где при землетрясениях фиксировались геодинамические подвижки (реки Усть-Баргузин, Солзан, Б. Голоустная).

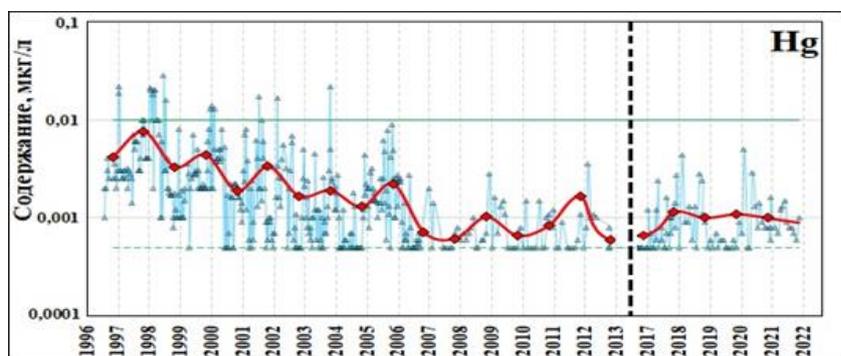


Рисунок 21 – Распределение концентраций Hg в воде истока р. Ангары в 1997–2022 гг.

Вероятны и антропогенные или природно-антропогенные причины изменения концентраций микроэлементов. В частности, это использование населением угля Иркутского угольного бассейна, содержащего повышенные концентрации Pb , Zn , Cu , U , Hg и других токсичных элементов [42]. После сгорания угля эти элементы выпадают на снеговой покров озера, а при таянии снега поступают в воду Байкала и истока Ангары. Другой причиной может быть автотранспорт и нарастающий туристический поток. Предполагается также влия-

ние ближайших промышленных предприятий (алюминиевый завод в 50 км – гор. Шелехов, многочисленные предприятия в гор. Улан-Удэ и на берегах р. Селенги) за счет атмосферного переноса токсикантов.

3.4 Заключение

Обобщение данных по микроэлементам в воде Байкала и, соответственно, в истоке Ангары в 2006–2022 гг. показало заметное повышение концентраций некоторых элементов-токсикантов в последние годы. При этом сохраняются средние значения элементов, с одной стороны, и отмечается постепенное снижение или повышение содержаний элементов в динамике со временем. Такое явление в водных системах называют эффектом памяти, наблюдаемым во временных рядах, что представляется следствием упорядоченной регулярности, которая частично проявляется в наличии водно-экологической фрактальности [43].

Таким образом, показано, что макрокомпонентный состав воды Байкальской экосистемы в 1960–2022 гг. имел циклически-волновой характер и положительный или отрицательный тренд изменения, обусловленный климатическими процессами в регионе, что указывает на наличие эффекта долговременной памяти в химических временных рядах элементов.

Микрокомпонентный состав воды Байкальской экосистемы во время природных катаклизмов может кратковременно, но резко изменяться за счет дополнительного поступления некоторых токсичных элементов (Hg, CH₄, U, Rn и др.), не оказывающих влияния на человека, но способных приводить к гибели эндемиков Байкала (рыба голомянка, нерпа и др.).

4 Пространственно-временная изменчивость природной среды Восточной Сибири в плейстоцене-голоцене

4.1 Ландшафтно-климатические изменения в центральной части Окинского плато (Восточный Саян) в среднем-позднем голоцене

4.1.1 Введение

Исследования пространственных и временных закономерностей палеоклиматических изменений в голоцене необходимы для понимания механизмов воздействия на природную среду и изучения возможных изменений в будущем. Однако непрерывные, детальные и хорошо датированные записи изменения природной среды голоцена в горах юга Восточной Сибири очень редки. Особенно ценную палеогеографическую информацию хранят донные отложения озер, которые содержат, в том числе и различные палиноморфы, наиболее часто

используемые для реконструкции региональной растительности, ландшафтов и климата прошлого. Поэтому целью настоящего исследования стала реконструкция истории природной среды центральной части Окинского плато на основе палинологической записи из отложений оз. Саган-Нур и выявление особенностей региональных изменений природной среды в контексте их глобальных вариаций.

4.1.2 Материалы и методы

Ультрапресное оз. Саган-Нур является одним из самых живописных, но очень слабо изученных географических объектов Окинского плато. Озеро расположено в междуречье р. Оки и р. Сорок, в межгорной котловине, в окружении гор высотой до 1824 м над у.м. Площадь водосборного бассейна оз. Саган-Нур составляет 8,5 км², максимальная глубина – 23 м, с севера на юг озеро простирается на 3,2 км, площадь водной поверхности ок. 1 км² [44] (рисунок 22). Сток воды происходит в р. Ока. Питание озера обеспечивается атмосферными осадками, небольшой вклад вносят и грунтовые воды [44].

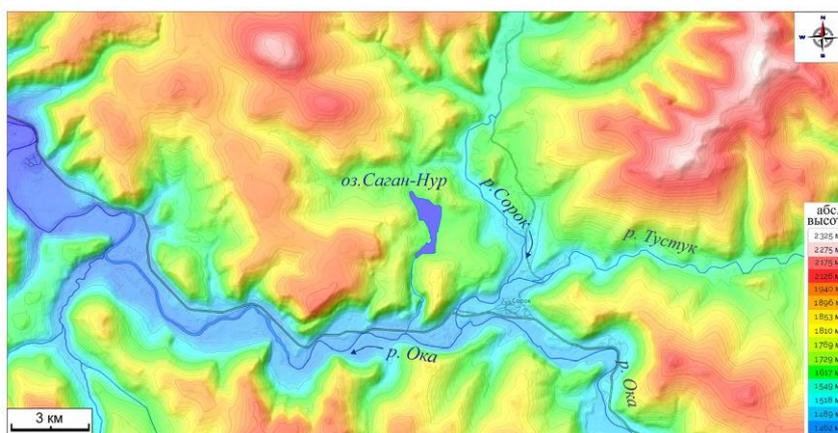


Рисунок 22 – Гипсометрическая схема центральной части Окинского плато и положение оз. Саган-Нур

Климат Окинского плато резко континентальный с коротким и относительно теплым летом. Зимой в регионе доминирует Сибирский антициклон, летом погоду контролирует западный атмосферный перенос. Средняя температура воздуха июля, января и года составляет +13,1°С, -24,4°С и -5,1°С, соответственно. Средняя годовая сумма атмосферных осадков не превышает 325 мм, 95% которых выпадает с мая по сентябрь [44].

В ландшафтной структуре Окинского плато доминируют лиственничные из *Larix sibirica* леса и редколесья. Степная растительность занимает хорошо прогреваемые южные склоны, луговая – речные долины. Уникальное сочетание остепненных участков и листвен-

ничной тайги придают геосистемам региона высокое значение для природопользования. Это один из немногих регионов России, где разводят яков. В водосборном бассейне и на берегах оз. Саган-Нур преобладают лиственничные кустарниковые леса, долинная лугово-болотная растительность, иногда с елью *Picea obovata* и лиственницей, лиственничные с березой *Betula pendula* и иногда с сосной сибирской *Pinus sibirica* леса и редколесья [44].

Донные отложения оз. Саган-Нур были опробованы в 2020 г. Длина керна составила 187 см. В его литологическом составе преобладают биогенно-терригенные илы с доминированием в них глинистой фракции до 50–80%. Для пяти образцов по массе осадка радиоуглеродным методом с ускорительной масс-спектрометрией определен возраст. Датирование проведено в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН и Центре прикладных изотопных исследований Университета Джорджии (США). Значения радиоуглеродного возраста откалиброваны в программе OxCal с использованием калибровочной кривой IntCal20 [45]. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты *УМС ^{14}C датирования отложений оз. Саган-Нур и калиброванные значения радиоуглеродного возраста

Лабораторный номер	Глубина (см)	^{14}C значение (л.н.)	Калиброванный возраст (к.л.н.), 95% доверительный интервал	Среднее значение калиброванного возраста (к.л.н.) с учетом резервуарного эффекта
9370-IGAN _{AMS}	10-11	545±20	520 - 635	78
9371-IGAN _{AMS}	43-44	2465±25	2387 - 2709	1990
9373-IGAN _{AMS}	110-111	6320±30	6994 - 7310	6670
9374-IGAN _{AMS}	160-161	7420±30	8073 - 8328	7770
9375-IGAN _{AMS}	184-185	7730±30	8449 - 8909	8120

*-ускорительная масс-спектрометрия.

Результаты радиометрического датирования верхних 10 см керна в Институте геологии и минералогии СО РАН с использованием неравновесного свинца ^{210}Pb показали, что современный слой отложений в керне из оз. Саган-Нур присутствует, он не нарушен, и резервуарный эффект не является проблемой для донных отложений этого озера. Расчет возраста каждого сантиметра в керне из оз. Саган-Нур проведен методом интерполяции между двумя соседними датами с учетом средней скорости осадконакопления между ними.

Палинологический анализ выполнен для каждого второго сантиметра в керне, что позволило получить среднее временное разрешение записи в 100 лет. Среднее же временное разрешение между датированными горизонтами изменяется от 15 лет до 170 лет. Расчет процентного содержания таксонов, построение спорово-пыльцевой диаграммы и выделение трех локальных пыльцевых зон ЛПЗ (СГН-1-3, рисунок 23) реализованы в программе TILIA 1.7.16 с использованием стратиграфически ограниченного кластерного анализа CONISS [46]. Расчет процентного содержания индивидуальных пыльцевых таксонов основан на сумме пыльцы древесных и недревесных растений. Процентное содержание спор рассчитано на основе

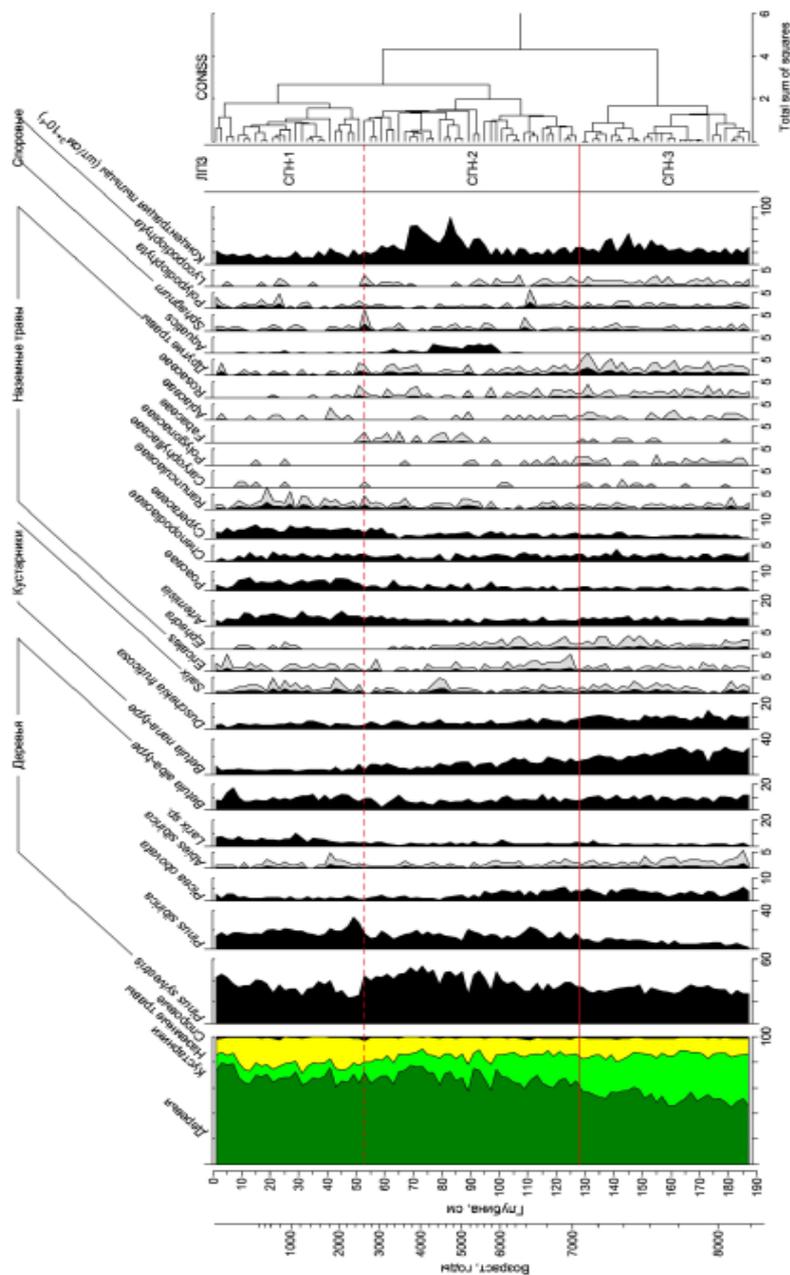


Рисунок 23 – Палинологическая диаграмма донных отложений оз. Саган-Нур

общей суммы наземной пыли и спор, принятой за 100%. Для реконструкции биомов согласно методу, предложенному в работе [47], все пыльцевые таксоны из палинологической записи оз. Саган-Нур (рисунок 23) были отнесены к соответствующим биомам с использованием матрицы, уже применявшейся для юга Восточной Сибири [48]. На рисунке 24 показаны биомы, набравшие наивысший балл хотя бы для одного анализируемого спектра. Шкалы биомов характеризуются высокочастотными изменениями. Длительные тенденции в динамике биомов выражены полиномом третьего порядка (пунктирные линии в шкалах биомов).

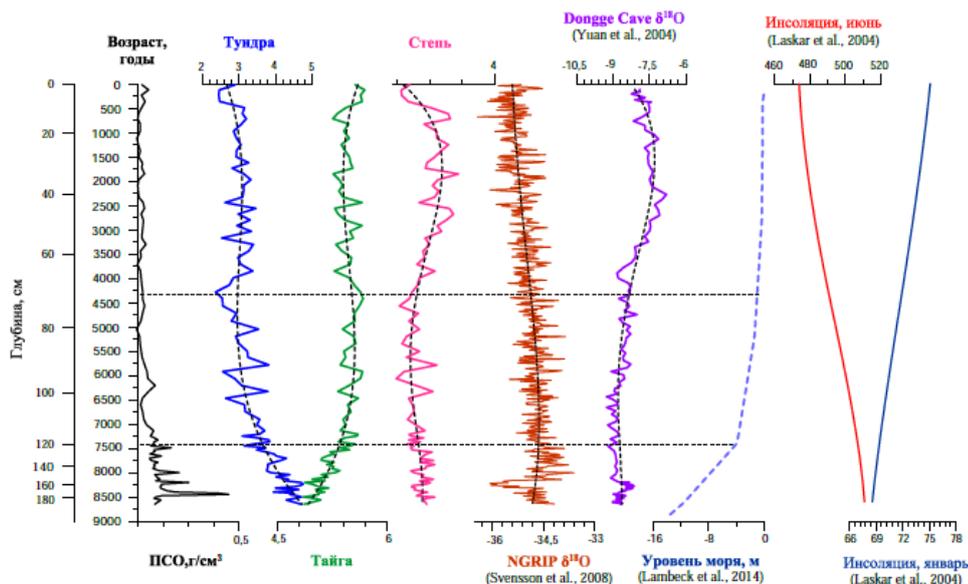


Рисунок 24 – Сравнение плотности сухого вещества отложений оз. Саган-Нур как показателя интенсивности поступления терригенного вещества, расчетных оценок биомов тундры, тайги и степи с записями глобального климата: зимней и летней инсоляции на 55° с.ш. [49], NGRIP δ¹⁸O из Гренландии как показателя температуры воздуха в Северном полушарии [50], Dongge Cave δ¹⁸O из китайских сталагмитов [51] как показателя активности влажного восточно-азиатского летнего муссона и реконструированной разницей глобального уровня моря от его современных значений [52]

4.1.3 Результаты и их обсуждение

Ниже в тексте приводятся средние значения содержания пыльцевых таксонов или отдельных групп (деревья, кустарники, травы). Выделенные локальные пыльцевые зоны можно кратко описать следующим образом.

Спорово-пыльцевые спектры (в дальнейшем СПС) СГН-3 (187–127 см, 8600–7500 л.н.) характеризуются самым низким для всего разреза содержанием пыли древесных растений (52%) и самым высоким – пыли кустарников (33%). Пыльца наземных трав состав-

ляет 14%. В группе пыльцы древесных преобладает пыльца сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* (32%), сосны сибирской (7%), ели (3.7%), лиственницы (1.4%).

В спектрах СГН-2 (127-52 см, 7500-3200 л.н.) повысилось содержание пыльцы древесных (67%), снизилось – пыльцы кустарников до 17%, а значение обилия пыльцы трав не изменилось. В группе пыльцы древесных растений повысилось значение пыльцы сосны обыкновенной до 42%, лиственницы до 2%. сосны сибирской – до 15%. Обилие пыльцы ели снизилось до 2.7%. Спектры на глубине 98–76 см (6500–5000 л.н.) содержат максимум обилия пыльцы водно-болотных трав рода шейхцерия *Scheuchzeria* - индикатора бедных, влажных, плохо аэрируемых почв [53].

Спектры СГН-1 (52–0 см, последние 3200 лет) отличаются самым высоким значением обилия пыльцы древесных (69%) и наземных трав (20%). Также заметно повысилось обилие пыльцы трав, особенно полыней, злаковых, осоковых (рисунок 23). Отличительная черта спектров этой зоны - самое высокое для всего разреза относительное обилие пыльцы лиственницы (5%).

Расчетные значения вкладов биомов в структуру растительности бассейна оз. Саган-Нур показывает самые высокие значения тундрового биома в интервале 8600-7500 л.н. (рисунок 24). В интервале времени 7500–4300 л.н. значительно снижаются значения тундрового и повышаются – таежного биома. Для последних 4300 лет характерно повышение значений тундрового и степного биомов, однако в последние примерно 500 лет повышаются значения таежного биома.

Состав СПС зоны СГН-3 и реконструкция биомов предполагают мозаичный характер растительности из кустарниковых тундр с березкой, ольховником, ивой *Salix* ок. 8600-7500 к.л.н. Однако в растительности водосборного бассейна оз. Саган-Нур существовала и лесная растительность из *Picea obovata* и *Larix* (рисунок 23), подразумевая хорошо увлажненные, холодные почвы. С другой стороны, относительно высокий процент пыльцы *Artemisia*, *Chenopodiaceae* и повышенные значения степного биома указывают на неустойчивый и периодически или сезонно засушливый климат. Это могло быть результатом более высокой, чем в настоящее время, степени континентальности климата из-за еще низкого глобального уровня моря, высокой летней и низкой зимней инсоляции (рисунок 24).

Низкое обилие пыльцы обеих сосен позволяет рассматривать ее как заносный компонент спектров. Состав реконструированной растительности и высокие значения тундрового биома предполагают высокое почвенное увлажнение из-за таяния многолетней мерзлоты летом. Резкие и частые изменения плотности донных отложений (рисунок 24) свидетельствует

о ритмичном поступлении в оз. Саган-Нур терригенного материала, вероятно, из-за частых паводков. Паводки могли быть следствием активного таяния снега, ледников и многолетней мерзлоты, что было обусловлено еще высокой летней инсоляцией (рисунок 24) и связанными с ней теплыми летними сезонами. Это время соотносится с интервалом самых высоких положительных региональных и глобальных аномалий температуры воздуха за последние 11300 лет во внетропической области северного полушария [54].

Повышение обилия пыльцы древесных наряду с пыльцой сосны обыкновенной ок. 7500 л.н., реконструкция биомов свидетельствует о расширении с этого времени лесной растительности с сосной обыкновенной и предполагают дальнейшее потепление климата и деградацию вечной мерзлоты, поскольку именно мерзлота является важным фактором, ограничивающим рост этого вида в Сибири [55]. Прогрессирующий подъем верхней границы леса с участием сосны в Восточном Саяне с ~7500 л.н. происходил синхронно с ее экспансией в горах юга Сибири и во других районах Северной Азии [56]. Однако в составе местной растительности котловины оз. Саган-Нур преобладали лиственничные леса с участием сосны сибирской, важна была и роль кустарниковой тундры. При этом снижение относительного обилия пыльцы *Artemisia*, *Chenopodiaceae* (рисунок 23) и пониженные значения степного биома (рисунок 24) предполагают большую, чем ранее, сомкнутость лесной растительности в бассейне оз. Саган-Нур ок. 7500-4300 л.н.

Сокращение еловых группировок позднее 6500 л.н. могло быть обусловлено наступлением более сухого климата. Низкие значения плотности отложений в этот время (рисунок 24) свидетельствуют о снижении потока терригенного вещества в воды озера из-за снизившегося количества атмосферных осадков и/или более густой растительности по берегам озера. Однако следует рассматривать еще одну не менее важную причину сокращения площадей ели. Этой причиной могла стать перестройка гидрографической сети в центральной части Окинского плато и в бассейне оз. Саган-Нур. Известно, что в дополнение к атмосферным осадкам поступление талых вод от таяния мерзлоты и ледников также могло играть ключевую роль в колебаниях уровня озер в раннем голоцене при высокой летней инсоляции, особенно в случае ледниковых озерных бассейнов на горных плато [57]. Предполагается, что позднеплейстоценовые ледники в горах юга Восточной Сибири кардинально сократились или полностью исчезли как раз в среднем голоцене [58]. Снижение объема талых вод привело к меньшей водности рек, исчезновению временных водотоков, и, в итоге, к сокращению влажных долинных мест обитания для ели. Максимум пыльцы растений водно-болотных обитаний (рисунок 23, *Aquatics*), обнаруженный ок. 6500–5000 л.н., мог означать самое зна-

чительное понижение уровня оз. Саган-Нур за изученный интервал времени, заболачивание его прибрежной зоны, подтверждая вывод о снижении общего увлажнения территории.

Начиная с ~3200 л.н. (СГН-1, рисунок 23) повысившееся обилие пыльцы *Artemisia*, *Chenopodiaceae*, *Poaceae*, *Cyperaceae* свидетельствует о том, что лесная растительность стала более открытой. Реконструкция биомов поддерживает такую интерпретацию, показывая расширение степного биома уже с 4300 л.н. (рисунок 24). Повышение относительного обилия пыльцы *Larix* предполагает начало локального и регионального преобладания лиственных лесов с участием *Pinus sibirica* (рисунок 23). Леса такого состава связаны с холодными мерзлотными почвами [59], что позволяет сделать вывод о более холодном, чем ранее, климате последних 3200 лет в бассейне оз. Саган-Нур. Повышенное содержание пыльцы *Salix*, *Cyperaceae* могло быть результатом нового этапа заболачивания берегов озера из-за постепенного снижения его уровня. Минимальные значения плотности отложений в последние ~ 3200 лет означают слабый поток терригенного материала с береговым стоком.

Сравнение реконструированной динамики региональных биомов с изменением глобального климата из различных природных архивов умеренных широт Евразии (рисунок 24) показывает, что изменение таежного биома (рисунок 24) следовало за изменением уровня моря (континентальность климата) и температурой воздуха в северном полушарии (NGRIP), а поведение степного биома происходило квази-синхронно изменению активности летнего муссона.

4.1.4 Выводы

В результате комплексных исследований донных отложений оз. Саган-Нур получена первая непрерывная, детальная реконструкция растительности и биомов центральной части Окинского плато за последние 8600 лет. Установлено, что изменения растительности и биомов в бассейне оз. Саган-Нур происходили параллельно изменениям глобального климата, указывая на высокую чувствительность региональной растительности к сдвигам в глобальной / региональной климатических системах. Отсутствие в отложениях оз. Саган-Нур пыльцы растений-индикаторов сельскохозяйственных культур или выпаса животных предполагает незначительную активность человека в бассейне озера вплоть до настоящего времени. Полученные реконструкции будут способствовать определению наиболее перспективных озер и их бассейнов в горах Восточного Саяна для потенциального устойчивого развития с помощью специальных проектов: образовательных, туристических, геоохранных, сельскохозяйственных.

4.2 Предварительная оценка потенциала записей изменения природной из донных отложений озёр различного генезиса в горах и предгорьях Восточного Саяна

4.2.1 Введение

Современные проблемы изменения климата и природной среды, широко обсуждаемые в настоящее время, можно решать, получая ценнейшие сведения о прошлых природно-климатических обстановках регионального и глобального масштабов при комплексном исследовании состава, строения и стратиграфии донных отложений озёр.

4.2.2 Материалы и методы

В 2013–2015 гг. были получены керны из донных отложений озёр Хикушка, Ильчир, Шас-Нур, Номто-Нур, Енгаргинское. Эти озёра имеют различный генезис, находятся на разных гипсометрических уровнях (от 749 до 1956 м н у.м.), площадь их водной поверхности изменяется от 0,1 до 2,6 км², максимальная глубина – от 2,2 до 42 м. Донные отложения каждого озера были датированы радиоуглеродным методом с ускорительной масс-спектрометрией. На основе определений абсолютного возраста для каждого разреза озерных отложений рассчитаны возрастные модели с использованием программного обеспечения IntCal20 [45]. Для отложений из каждого керна всех перечисленных озёр были измерены плотность, влажность, содержание SiO_{2bio}, общее органическое вещество как потери при прокаливании (ППП 550°C), получены результаты гранулометрического и петромагнитного анализ.

4.2.3 Результаты и их обсуждение

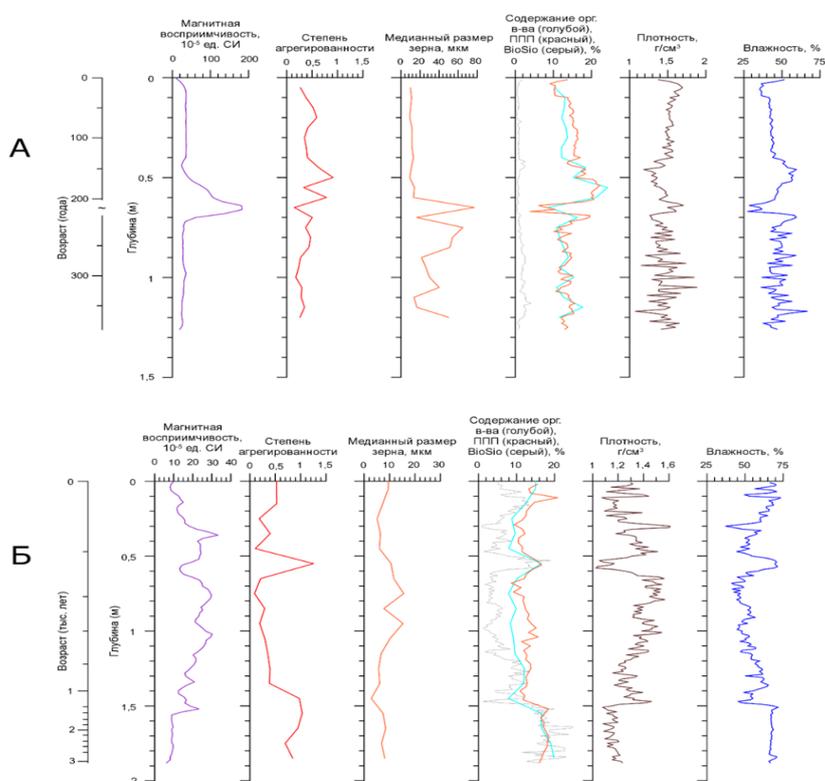
Изученные озёра относятся к трем генетическим группам:

- 1) озера Шас-Нур и Номто-Нур – пойменные, расположенные в пойме р. Сенца (Окинское плато, горы Восточного Саяна), или являющиеся озёровидным расширением русла р. Енгарга (оз. Енгаргинское, Тункинская рифтовая долина);
- 2) оз. Хикушка – ледниковое, расположено в высокогорном поясе Окинского плато;
- 3) оз. Ильчир - комплексного, ледниково-тектонического происхождения, находится в высокогорном поясе Восточного Саяна.

Донные отложения озёр первой группы для изучения палеоклимата следует использовать с осторожностью, поскольку процессы осадконакопления в этих озерах в значительной мере контролировались особенностями гидрологического режима рек Сенца или Енгарга. Так, в озёрах Шас-Нур и Номто-Нур сохранились следы катастрофических событий, предпо-

ложительно селевого и паводкового характеров, соответственно, что нашло отражение в смене литологического строения и иных свойств отложений (рисунок 25). В случае оз. Енгаргинского, вероятно, наблюдаются последствия меандрирования русла р. Енгарга, приводившего к размыву береговых торфяников и привнесу в место отбора керна части такого торфяника (рисунок 26).

Озёра второй и третьей групп, несмотря на значительно изменяющиеся скорости осадконакопления, в том числе и из-за, вероятно, паводковых или селевых событий (например, оз. Ильчир), сохраняют непрерывные седиментационные архивы детальных записей глобального и регионального изменения природной среды в голоцене. Это делает озера особенно ценными источниками информации о природной среде региона.

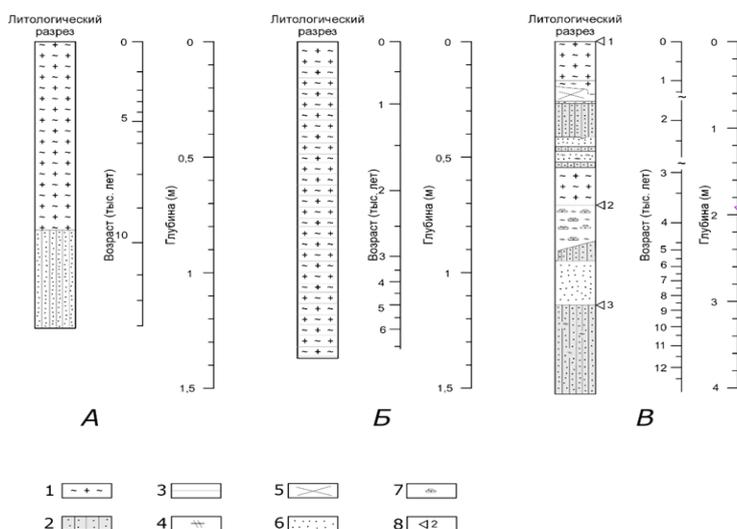


А – оз. Номто-Нур, Б – оз. Шас-Нур

Рисунок 25 – Результаты изучения озёр моложе 5000 лет

Так, изменение содержания $\text{SiO}_{2\text{био}}$ и значений ППП (индикаторы биопродуктивности озерных систем) в отложениях оз. Хикушка демонстрируют высокую чувствительность водоема к глобальным изменениям климата [60]. Изменение этих показателей происходило па-

раллельно с вариациями климата северного полушария, записанными в ключевых климатических архивах ледниковых щитов, карбонатах спелеотем [50, 51].



А – оз. Хикушка, Б – оз. Ильчир, В – оз. Енгаргинское. 1 – биогенный ил с диатомовыми, 2 – глинистый алеврит, 3 – прослой глинистого алеврита, 4 – растительные остатки, 5 – разрыв в керне, 6 – мелкозернистый песок, 7 – торф, 8 – номера лотов

Рисунок 26 – Литологические колонки в соответствии с глубиной и возрастом разрезов

Полученные результаты комплексных исследований озер позволяют реконструировать и активизацию вулканических событий. Так, результаты измерения магнитной восприимчивости донных отложений оз. Енгаргинское показали повышенные значения концентраций мелких зёрен магнитных минералов в осадках, аккумуляция которых происходила ок 13000–4550 л.н. Вероятной причиной такого явления могла быть активная вулканическая деятельность в горах Восточного Саяна в это время [61].

Вулканы этой территории относятся к действующим, поэтому, при планировании различных видов хозяйственной деятельности на юге Восточной Сибири необходимо учитывать высокую вероятность активизации вулканов.

4.3 Геохимия терригенного осадконакопления на примере распределения микроэлементов в опорных горизонтах донных отложений озера Байкал

4.3.1 Введение

При поступлении вещества из водосборных бассейнов в донные отложения озер ряд химических элементов отражают биопродуктивность почвенно-растительного комплекса

бассейнов озер или самого водоема (прибрежно-водная растительность, например). Эти элементы называют «органофильными», они представляют интерес с точки зрения их аккумуляции в зависимости от вариаций объемов и свойств автохтонной органики, что может служить косвенным сигналом климатических изменений в водосборном бассейне озера. К таким элементам можно отнести – U, Mo, V, As, Sb, Cu, Zn, Cd, Ni, Ag, Se, Br. Другие элементы, наоборот, подвержены разбавлению органическим веществом. Их называют «кластофильными», и к ним относят Th, K, Rb, элементы-гидролизаты, лантанойды [Гавшин и др., 2001; Gavshin et al., 1991]. Таким образом, следует учитывать, что элементы, отражающие автохтонный сигнал, могут иметь завышенные значения, а «кластофильные» элементы, наоборот, иметь пониженные значения из-за разбавления из объемов. Так, для озера Байкал среди «органофильных» элементов определенно выделяются U, Mo и Br [Phedorin et al., 2000], разбавителем которых в данном случае является биогенный кремнезем ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$).

Основная задача предлагаемой работы - выявление автохтонного органогенного сигнала и определение состава осадка, соответствующего доминирующим породам водосборной площади озера Байкал [Иванов Е.В. и др., 2022].

4.3.2 Материалы и методы

Изучен геохимический состав 25 проб донных осадков озера Байкал (скважина BDP-98). Отобранные образцы, характеризующие как стадии потепления, так и похолодания (значения $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ варьируют в диапазоне 3,6–40,3%), были разделены на 2 части. В первой части методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) определены валовые концентрации элементов. Во второй части перед измерениями раствором Na_2CO_3 (2 mol) был экстрагирован $\text{SiO}_{2\text{bio}}$. Полученные для обеих частей одного и того же образца результаты сравнивались друг с другом и с данными, полученными другими методами геохимического анализа (РФА, РФА СИ). В качестве реперного образца нами использован элементный состав пелитов (скважина BDP-99), полученный нами после их многостадийной очистки и отмучивания, включая экстракцию $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ и обработку H_2O_2 (30 %). Состав РЗЭ был нормирован на средние значения по соответствующему элементу в валовых пробах.

4.3.3 Результаты

Модельные данные по $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ для разрезов BDP-96 и BDP- 98 позволяют выделить в изучаемом интервале климатические стадии, соответствующие морским изотопным стадиям или MIS 103, 104, G1, G3, G5, G7, G9 [Prokopenko et al., 2010]. С литохимической точки зре-

ния диаграмма натриевого и калиевого модулей для перечисленных разрезов отображает изменение условий седиментации при смене климатического состояния и переходе к эпохе оледенений, демонстрируя поступление большего количества продуктов физической эрозии в плейстоцене по отношению к более ранним плиоценовым разностям (рисунок 27).

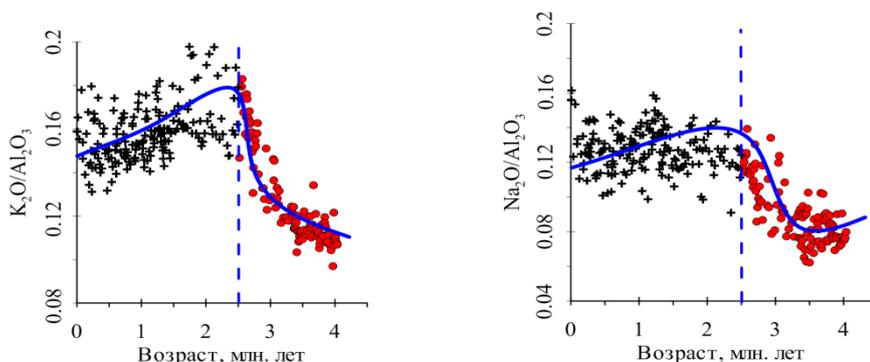


Рисунок 27 – Величина отношений K_2O/Al_2O_3 и Na_2O/Al_2O_3 в интервале 0-170 метров для скважины ВДР-98. Возрастная модель взята из [Long Continental Records, 2003]. Пунктирная линия соответствует границе плиоцен – плейстоцена.

При нормировании состава РЗЭ на средние значения по соответствующему элементу в валовых пробах и сопоставлении данных с распределением биогенного кремнезема выявляется обратная корреляция элементного состава и концентраций SiO_{2bio} . Таким образом подтверждается эффект разбавления для «кластофильной» группы элементов. В пробах, очищенных от органофильной компоненты и SiO_{2bio} , подобной зависимости не прослеживается. При нормировании микро- элементного состава валовых проб отложений на средние составы - кларки пород обрамления котловины озера Байкал выявляются аномалии для «органофильных» элементов, таких как U и Mo. В очищенных пробах подобных аномалий не обнаружено.

При вынесении данных на диаграммы La-Th-Sc и Th-Hf-Co (рисунок 28) для реконструкции областей питания фиксируются существенные отличия в расположении фигуративных точек валовых проб и проб, прошедших процедуру очистки. Так, для образцов очищенных от органогенной компоненты точки более локализованы, в отличие от точек валовых составов, что более точно определяет наличие пород кислого состава в источниках сноса. При этом введение коэффициентов для нивелирования эффекта разбавления в валовых пробах не приводит к желаемым результатам.

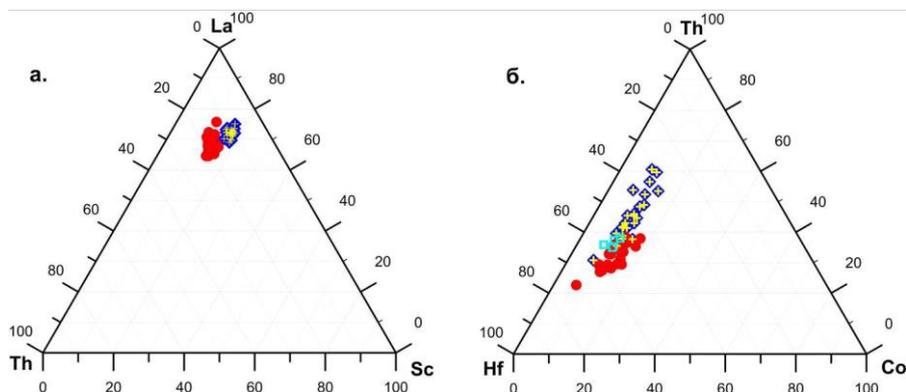


Рисунок 28 – Интервал аккумуляции отложений 2,8 – 2,5 млн. лет назад. На диаграммах La-Th-Sc (а) и Th-Hf-Co (б) кружки – $\text{SiO}_2_{\text{bio}}$ экстрагирован; ромбы - $\text{SiO}_2_{\text{bio}}$ не экстрагирован; плюсы - $\text{SiO}_2_{\text{bio}}$ удален расчетным способом; квадраты - пелиты скв. BDP-99.

Состав пелитов из скважины BDP-99 (рисунок 28) демонстрирует очевидную близость к образцам прошедшим процедуру очистки. Таким образом, выявляется схожесть питающих провинций и близкие условия седиментации на Академическом хребте и Селенгино-Бугульдейской перемычке.

На рисунке 29 представлены отношения La/Yb и Cr/Th до и после экстракции органической компоненты. Так, отношение La/Yb в очищенных пробах демонстрирует рост поступления пород кислого состава в осадках, сформировавшихся в MIS 104, G4, G9. В валовых пробах подобных тенденций не прослеживается. Колебания отношения Cr/Th в очищенных пробах демонстрируют нестабильность тектонического режима. Органическая составляющая в валовых пробах маскирует эту тенденцию. Таким образом, можно констатировать, что эффект контаминации терригенных отложений автохтонной органической компонентой удалось исключить.

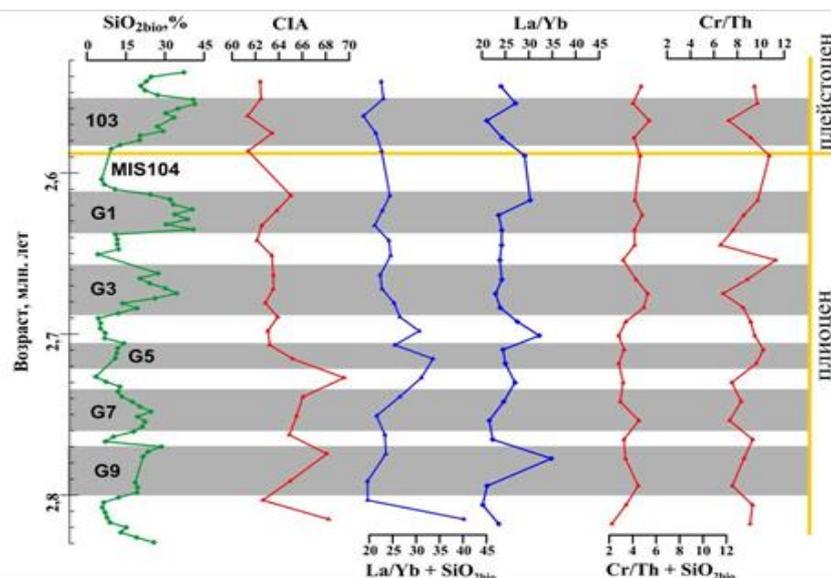


Рисунок 29 – Коэффициенты La/Yb, Cr/Th из отложений, обогащенных $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ (шкалы снизу), индекс химического изменения CIA и очищенные значения (шкалы сверху) в отложениях скв. BDP-98, сформированных в финале плиоцена – начале плейстоцена, согласованные с климато-стратиграфической моделью отложений по $\text{SiO}_{2\text{bio}}$,% и MIS 103;104, G 1-9. [Prokopenko et al., 2010].

4.3.4 Заключение

При сравнении валовых химических составов изученных отложений и проб, прошедших процедуру очистки, выявляются существенные отличия для содержаний ряда микроэлементов, демонстрируя обогащение терригенных отложений автохтонной биогенной компонентой. Экстракция органической компоненты позволяет проводить более корректную оценку доминирующих источников поступления терригенного материала, реконструировать эрозионные процессы на водосборной площади в зависимости от климатического фактора и/или тектонических условий. В будущем будет проведена комплексная оценка потенциала широкого спектра коэффициентов: La/Sc, La/Cr, La/Co, Th/Sc, Th/Co, La/Yb, La/Th, что позволит детализировать реконструируемую динамику терригенного осадконакопления для озер Байкальской рифтовой зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатами реализации плана научно-исследовательских работ 2022 года являются следующие:

– установлено, что основными источниками поступления микроэлементов-загрязнителей на территорию гор. Ангарск являются три крупных разнопрофильных производства, имеющих специфичные геохимические спектры: ТЭЦ (As, U, Al, Hg), Ангарский нефтехимический комбинат (Fe, Co, Ni, Mo, V) и «АнгарскЦемент» (Cd, Pb, Zn, Cs и Ca);

– обнаружен высокий уровень загрязнения твердого осадка снега промышленной зоны г. Ангарск Cd, Pb, Mo и Hg, селитебной зоны – Mo. Обе зоны значительно загрязнены и As, U, Co. Также вероятно поступление с талыми водами повышенных концентраций поллютантов в реки Ангара и Китой, что может оказать негативное влияние на микроэлементный состав речной воды и донных отложений;

– средние значения RI для промышленной зоны (687) и жилых кварталов (508) гор. Ангарск указывают на высокий и значительный уровень экологического риска, необходимость нормализации экологической обстановки в гор. Ангарск и будут востребованы при разработке мер, направленных на минимизацию негативного техногенного воздействия.

– показано, что изученная территория остается потенциально опасной зоной для проведения непосредственно на ней какой-либо хозяйственной деятельности; рекомендовано проведение на этой территории в аномальных зонах биоремедиации почв, что замедлит распространение свинца в окружающую среду;

– установлено, что на распределение ПХБ и СОЗ наибольших эффект оказывает присутствие древесных видов в растительном сообществе из-за лучшей фильтрующей способности кроны деревьев из атмосферного воздуха ПХБ и ХОП в сравнении с травянистой растительностью и кустарничками;

– обобщение данных по микроэлементам в воде Байкала и, соответственно, в истоке Ангары в 2006–2022 гг. показало заметное повышение концентраций некоторых элементов-токсикантов в последние годы;

– установлено, что макрокомпонентный состав воды Байкальской экосистемы в 1960–2022 гг. имел циклически-волновой характер и положительный или отрицательный тренд изменения, обусловленный климатическими процессами в регионе;

– получена первая непрерывная, детальная реконструкция растительности и биомов центральной части Окинского плато за последние 8600 лет. Установлено, что изменения рас-

тельности и климат в бассейне оз. Саган-Нур происходили параллельно изменениям глобального климата;

– показано, что реконструкции будут способствовать определению наиболее перспективных озер и их бассейнов в горах Восточного Саяна для потенциального устойчивого развития с помощью специальных проектов: образовательных, туристических, геоохранных, сельскохозяйственных;

– проведена предварительная оценка потенциала записей изменения природной из донных отложений озёр различного генезиса в горах и предгорьях Восточного Саяна;

– определен состав донных отложений оз. Байкал, соответствующий доминирующим породам водосборной площади озера в переходный период от плиоцена к плейстоцену, что позволило показать рост поступления пород кислого состава в отложения MIS 104, G4, G9 и обосновать изменчивость отношения Sr/Th в очищенных пробах как индикатора нестабильности тектонического режима на границе плиоцена-плейстоцена.

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 Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими элементами. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 111 с.
- 2 РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – М.: Госкомгидромет, 1991. – 693 с.
- 3 Богданов А.В., Качор О.А., Федотов К.В., Чайка Н.В. Ликвидация последствий деятельности мышьякового производства горно-перерабатывающей промышленности // Экология и промышленность России. – 2014. – № 2. – С. 31–35.
- 4 Кузнецов В.А., Шимко Г.А. Метод постадийных вытяжек при геохимических исследованиях. – Минск: Наука и техника. 1990. – 88 с.
- 5 Панченко С.В., Аракелян А.А., Ведерникова М.В., Поцяпун Н.П., Каргин О.А., Сикора О.Н., Степанова У.Г. Сравнительная оценка радиационных и токсических рисков в Ангарске // Радиация и риск. – 2017. – Т 26. – № 2. – С. 83–96.
- 6 Ильенок С.С. Арбузов С.И. Металлоносные угли Азейского месторождения Иркутского угольного бассейна // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 132–144.
- 7 Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2005. – 650 с.
- 8 Губайдуллин М.Г., Иванов Р.С. Интегральная оценка воздействия нефтей на окружающую среду с учетом их компонентного состава // Вестн. Поморского ун-та. Сер.: «Ест. и точные науки». – 2007. – № 1 (11). – С. 5–12.
- 9 Володина Д.А., Таловская А.В., Язиков Е.Г., Девятова А.Ю., Еделев А.В. Оценка пылеаэрозольного загрязнения в зоне влияния цементного завода на основе изучения снегового покрова (Новосибирская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 69–85.
- 10 Håkanson L. Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control – A Sedimentological Approach // Water Research. – 1980. – Vol. 14. – I. 8. – P. 975–1001.
- 11 Yuan D., Liu Y., Guo X. et al. Characteristic contaminants in snowpack and snowmelt surface runoff from different functional areas in Beijing, China // Environ Sci Pollut Res. – 2018. – Vol. 25. – I. 20. – 36256–36266.
- 12 Баенгуев Б. А., Белоголова Г. А., Чупарина Е. В., Просекин С. Н., Долгих П. Г., Пастухов М. В. Распределение содержания свинца и формы его соединений в

- техногенной почве г. Свирска (Южное Прибайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 205–214.
- 13 Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях. Текст и приложения (с изменениями 2019 г.). Стокгольм.– 2001.– 53 с.– <http://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> (дата обращения 2022-09-12)
- 14 AMAP, 2018. AMAP Assessment 2018: Biological Effects of Contaminants on Arctic Wildlife and Fish. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP).– Oslo, Norway.– VII.– 84 pp.
- 15 Wania F., Mackay D. Tracking the distribution of persistent organic pollutants // Environmental Science and Technology News.– 1996.– Vol. 30. – P. 390A–396A
- 16 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 // Environmental Science and Technology News.– 2006.– Vol. 40.– P. 4867–4873
- 17 Battisti S., Boselli C., Ubaldi A., Isabelli C.R., Mauti T., Marta U.D., Scaramozzino P. Measurements of β and α hexachlorocyclohexane in Juglans regia and Prunus spinosa trees in a contaminated area, central Italy // Environ Sci Pollut Res. – 2017. – Vol. 24. – P. 20876–20882
- 18 McLachlan M.S., Horstmann M. Forests as filters of airborne organic pollutants: a model // Environ. Sci. Technol. – 1998. – Vol. 32. – P. 413–420
- 19 Мамонтова Е.А., Тарасова Е.Н., Мамонтов А.А., Иванов Е.В. Влияние растительного покрова и содержания органического вещества на накопление хлорорганических соединений в почвах // Теоретическая и прикладная экология. – 2018. – № 1. – С. 43–52
- 20 Mamontova E.A., Tarasova E.N., Mamontov A.A., Mamontov A.M. Freshwater seal as a source of direct and indirect increased human exposure to persistent organic pollutants in a background area // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 715. – 136922
- 21 Касьянова Л.Н., Азовский М.Г., Мазукабзов А.М. Структура растительности перевеваемых песков острова Ольхон (озеро Байкал) // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. Биол. – 2007. – Т. 112. – Вып. 2. – С. 41–49
- 22 Мельников Н.Н. Пестициды. Химия, технология и применение. М.: Химия, 1987. – 712 с.

- 23 Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Эколого-геохимическая оценка «отпечатков» стойких хлорорганических пестицидов в системе почва – поверхностная вода // *Агрохимия*. – 2008. – № 1. – С. 52–56.
- 24 Shen L., Wania F., Lei Y.D., Teixeira C., Muir D.C.G., Bidleman T.F. Hexachlorocyclohexanes in the North American atmosphere // *Environ. Sci. Technol.* – 2004. – Vol. 38. – P. 965–975
- 25 Hülster A., Müller J., Marschner H. Soil–plant transfer of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans to vegetables of the cucumber family (Cucurbitaceae) // *Environ Sci Technol.* – 1994. – Vol. 28. – P. 1110–1115
- 26 Whitfield Åslund M.L., Zeeb B.A., Rutter A., Reimer K.J. In situ phytoextraction of polychlorinated biphenyl – (PCB) contaminated soil // *Science of The Total Environment*. 2007. – Vol. 374, Issue 1. – P. 1–12
- 27 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.
- 28 Диденков Ю.Н., Бычинский В.А., Ломоносов И.С. О возможности существования эндогенного источника пресных вод в рифтовых геодинамических условиях // *Геология и геофизика*.– 2006.– Т. 47.– № 10.– С. 1114–1118.
- 29 Шимараев М.Н., Троицкая Е.С., Блинов В.В. и др. Об апвеллингах в озере Байкал // *Доклады РАН*. – 2012. – Т. 442, № 5. – С. 696–700.
- 30 Гагаринова О.В. Устойчивость природных вод бассейна озера Байкал к антропогенным воздействиям // *География и природные ресурсы*.– 2015.– № 1.– С. 46–54.
- 31 Grebenschikova V.I., Kuzmin M.I., Suslova M.Yu. Long-term cyclicity of trace element in the Baikal aquatic ecosystem (Russia) // *Environmental Monitoring and Assessment*.– 2021.– 193:260.
- 32 Skuzovatov S.Yu., Belozeroва O.Yu., Vasil’eva I.E., Zarubina O., Kaneva E., Sokolnikova Yu., Chubarov V., Shabanova E. Centre of Isotopic and Geochemical Research (IGC SB RAS): Current State of Micro- and Macroanalysis // *Geodynamics & Tectonophysics*.– 2022.– 13 (2): 0585. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0585

- 33 Шимараев М.Н., Троицкая Е.С. Тенденции изменения температуры верхнего слоя воды на прибрежных участках Байкала в современный период // География и природные ресурсы.– 2018.– № 4.– С. 95–104.
- 34 Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Пройдакова О.А., Зарубина О.В. Многолетний геохимический мониторинг истока реки Ангары (сток озера Байкал) // ДАН.– 2018.– Т. 480.– № 4.– С. 449–454.
- 35 Grebenschikova V.I., Kuzmin M.I., Doroshkov A.A., Proydakova O.A., Tsydypova S.B. The cyclicity in the changes in the chemical composition of the water source of the Angara River (Baikal Stock) in 2017–2018 in comparison with the last 20 years of data // Environmental Monitoring and Assessment.– 2019.– 191:728.
- 36 Гранина Л.З. Ранний диагенез донных осадков озера Байкал. Новосибирск: изд-во «Гео». – 2008.– 160 с.
- 37 Sklyarova O.A., Sklyarov E.V, Och L., Pastukhov M V., Zagorulko N.A. Rare earth elements in tributaries of Lake Baikal (Siberia, Russia) // Applied Geochemistry.– 2017.– V. 82.– P. 164–176.
- 38 Sklyarov E.V., Sklyarova O.A., Lavrenchuk A.V., Menshagin Yu.V. Natural pollutants of Northern Lake Baikal // Environ Earth Science.– 2015.– V. 74.– P. 2143–2155.
- 39 Рихванов Л.П., Страховенко В.Д., Смирнов С.З., Литасов Ю.Д., Кулинич Е.А. Уникальный минерал надгруппы пирохлора из Прибайкалья (дополнение его первого описания, сделанного В.И. Вернадским) // Записки Российского минералогического общества.– 2018.– Т. 147.– № 6.– С. 75–89.
- 40 Коваль П.В., Ю.Н. Удодов, Андрулайтис Л.Д., Саньков В.А, Гапон А.Е.. Ртуть в воде истока р. Ангары: пятилетний тренд и возможные причины его вариаций // ДАН.– 2003.– Т. 389.– № 2.– С. 235–238.
- 41 Grebenschikova V.I., Kuzmin M.I. Mercury in the Baikal aquatic ecosystem (Lake Baikal, its tributaries, Angara River source) // Limnology and Freshwater Biology.– 2022 (3).– P. 1302-1304. DOI:10.31951/2658-3518-2022-A-3-1302
- 42 Гребенщикова В.И., Грицко П.П., Кузнецов П.В., Дорошков А.А. Уран и торий в почвенном покрове Иркутско-Ангарской промышленной зоны (Прибайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжинеринг георесурсов.– 2017.– Т. 328.– № 7.– С. 93–104.
- 43 Розенталь О.М., Тамбиева Дж.А. Волновая динамика качества речной воды // ДАН.– Науки о земле.– 2020.– Т.491.– № 1.– С. 82–86.

- 44 Vladimirov I.N., Vyrkin V.B., Ilyicheva E.A., Kobylkin D.V., Pavlov M.V., Zehong Li. Natural Conditions and Ecological Potential of Geosystems in the Central Part of the Oka Plateau (Eastern Sayan) // *Geography and Natural Resources*.– 2019.– Vol. 40.– № 3.– P. 264–274.
- 45 Heaton T.J., Blaauw M., Blackwell P.J., Bronk Ramsey Ch., Reimer P.J., Marian Scot E. The IntCal20 Approach to Radiocarbon Calibration Curve Construction: A New Methodology Using Bayesian Splines and Errors-invariables // *Radiocarbon*.– 2020.– № 62 (4).– P. 821–863.
- 46 Grimm E.C. Tilia 1.7.16 Software. Springfield, IL: Illinois State Museum. – Research and Collection Center.– 2011.
- 47 Prentice I.C, Guiot J., Huntley B., Jolly D., Cheddadi R. Reconstructing biomes from palaeoecological data: a general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka // *Climate Dynamics*– 1996.– Vol. 12.– P. 185–194.
- 48 Kobe F., Bezrukova E.V., Leipe C., Shchetnikov A.A., Goslar T., Wagner M., Kostrova S.S. and Tarasov P.E. Holocene vegetation and climate history in Baikal Siberia reconstructed from pollen records and its implications for archaeology // *Archaeological Research in Asia*.– 2020.– Vol. 23.– 100209.
- 49 Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M. Levrard B. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // *Astronomy and Astrophysics*.– 2004.– Vol. 428.– P. 261–285.
- 50 Svensson A., Andersen K.K., Bigler M., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Davies S.M., Johnsen S.J., Muscheler R., Parrenin F., Rasmussen S.O., Røstlisberger R., Seierstad I., Steffensen J.P., Vinther B.M. A 60000 year Greenland stratigraphic ice core chronology // *Climate of the Past*.– 2008.– Vol. 4.– P. 47–57.
- 51 Yuan D.X., Cheng H., Edwards R.L., Dykoski C.A., Kelly M.J., Zhang M.L., Qing J.M., Lin Y.S., Wang Y.J., Wu J.Y., Dorale J.A., An Z.S., Cai Y.J. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon // *Science*.– 2004.– Vol. 304.– P. 575–578.
- 52 Lambeck K., Rouby H., Purcell A., Sun Y., Sambridge M. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene // *PNAS*.– 2014.– Vol. 111.– P. 15296–15303.
- 53 Цвелёв Н. Н. Семейство шейхцериевые (Scheuchzeriaceae) // *Жизнь растений: в 6 т. / гл. ред. А. Л. Тахтаджян.*– М.: Просвещение, 1982.– Т. 6: Цветковые растения / под ред. А. Л. Тахтаджяна. – С. 26–28.– 543 с.

- 54 Marcott Sh.A., Shakun J.D., Clark P.U., Mix A.C. Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years // *Science*.– 2013.– Vol. 339.– P. 1198–1201.
- 55 Шумилова Л.В. Основные черты коренного растительного покрова Сибири и закономерности его географического распределения // *Труды Томского государственного университета*.– 1960.– Т. 148.– С. 171–182.
- 56 Zhang D., Feng Z. Holocene climate variations in the Altai Mountains and the surrounding areas: A synthesis of pollen records // *Earth-Science Reviews*.– 2018.– Vol. 185.– P. 847–869.
- 57 Hou Y., Long Ha., Shen J., Gao L. Holocene lake-level fluctuations of Selin Co on the central Tibetan plateau: Regulated by monsoonal precipitation or meltwater? // *Quaternary Science Review*.– 2021.– Vol. 261.– 106919.
- 58 Stepanova O.G., Trunova V.A., Osipov E.Yu, Kononov E.E., Vorobyeva S.S., Parkhomchuk E.V., Kalinkin P.N., Vorobyeva E.E., Vershinin K.E., Rastigeev S.A., Fedotov A.P. Glacier dynamics in the southern part of East Siberia (Russia) from the final part of the LGM to the present based on biogeochemical proxies from bottom sediments of proglacial lakes // *Quaternary International*.– 2019.– Vol. 524.– P. 4–12.
- 59 Огуреева Г.Н., Бочарников М.В. География разнообразия бореальных лесов у южной границы распространения и их картографирование (горы Южной Сибири и Монголии) // *Вестник Московского университета. Серия. 5. География*.– 2014.– № 5.– С. 53–61.
- 60 Безрукова Е.В., Крайнов М.А., Щетников А.А.. Новые гранулометрические и петромагнитные записи из озерных отложений юга Восточной Сибири: применение для реконструкции природной среды в позднем ледниковье и голоцене // *Геология и геофизика*.– 2022.– т. 63.– №5.– С. 729–744.– DOI: 10.15372/GiG2020190
- 61 Shchetnikov A.A., Bezrukova E., 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.
- 62 Гавшин В.М., Бобров В.А., Хлыстов О.М. Периодичность диатомовой седиментации и геохимия диатомовых илов озера Байкал в глобальном аспекте // *Геология и геофизика*.– 2001.– Т. 42.– №. 1-2.– С. 329–338.
- 63 Gavshin V.M. Elemental composition of deep-water Black Sea sediments // *Geochemistry International*.– 1991.– Vol. 28.– P. 14–24.

- 64 Phedorin M.A., Goldberg E.L., Grachev M.A., Levina O.V., 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.– 2000.– A 448/1-2 – P. 400–406.
- 65 Иванов Е.В., Зарубина О.В., Кузьмин М.И., Легкодымов А.А. Распределение микроэлементов в донных осадках озера Байкал на этапе тектонической и климатической реорганизации 2,8 - 2,5 млн. лет назад // Современные направления развития геохимии. Материалы конференции. Иркутск.– 2022. – Т. 1.– С. 201–203.
- 66 Prokopenko A.A., Khursevich G.K. Plio-Pleistocene transition in the continental record from Lake Baikal: Diatom biostratigraphy and age model // Quaternary International.– 2010.– Vol. 219.– №. 1.– P.– 26–36.
- 67 Long Continental Records from Lake Baikal. / Kashiwaya Kenji (Ed.) – Springer-Verlag. Tokyo.– 2003.– 370 p.
- 68 Condie Kent C., Wronkiewicz D.J. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution // Earth and Planetary Science Letters.– 1990.– Vol. 97.– P. 256–267.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций 2022 г. по теме исследований

Статьи

1. Баенгуев Б.А., Белоголова Г.А., Чупарина Е.В., Просекин С.Н., Долгих П.Г., Пастухов М.В. Распределение содержания свинца и формы его соединений в техногенной почве г. Свирска (Южное Прибайкалье). Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. (2022). 333(8): 205–214. DOI: 10.18799/24131830/2022/8/3670
2. Amosova A.A., Chubarov V.M., Finkelshtein A.L. Features of X-ray fluorescence determination of rock-forming elements in powder samples of peat sediments // X-Ray Spectrom.– 2022.– Vol. 51.– P. 129–135.– DOI: 10.1002/xrs.3267
3. Безрукова Е.В., Крайнов М.А., Щетников А.А. Новые гранулометрические и петромагнитные записи из озерных отложений юга Восточной Сибири: применение для реконструкции природной среды в позднем ледниковье и голоцене // Геология и геофизика.– 2022.– 5.– С. 729–744.– DOI 10.15372/GiG2020190 (англ. DOI: 10.2113/RGG20204249)
4. Безрукова Е.В., Кулагина Н.В., Решетова С.А., Щетников А.А., Крайнов М.А., Филинов И.А. Природная среда Окинского плато (горы Восточного Саяна) в позднем ледниковье и голоцене: пример палинологической летописи из отложений озера Хикушка // Геоморфология.– 2022.– 53(3).– С. 61–73.– DOI: 10.31857/S043542812203004X
5. Безрукова Е.В., Решетова С.А., Волчатова Е.В., академик РАН Кузьмин М.И. Первые реконструкции ландшафтно-климатических изменений в центральной части Окинского плато (Восточный Саян) в среднем-позднем голоцене // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.– 2022.– 506(1).– С. 104–110. DOI: 10.31857/S2686739722600722 (англ. DOI: 10.1134/S1028334X22700064)
6. Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И. Циклически-волновой характер распределения химических элементов в воде истока р. Ангара (сток Байкала) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.– 2022.– 505 (2).– С. 199–206. DOI: 10.31857/S2686739722080084 (англ. DOI: 10.1134/S1028334X22080086)
7. Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I. Mercury in the Baikal aquatic ecosystem (Lake Baikal, its tributaries, Angara River source) // Limnology and Freshwater Biology.– 2022.– 3.– P. 1302-1304.– DOI:10.31951/2658-3518-2022-A-3-1302

8. Мамонтов А.А., Ермолаева Н.И., Мамонтова Е.А. Состав и концентрации ПХБ снегового покрова сибирских городов Иркутск и Новосибирск // Проблемы региональной экологии.– 2022.– 2.– С. 24–29.– DOI: 10.24412/1728-323X-2022-2-24-29
9. Поletaева В.И., Пастухов М.В. Техногенное воздействие сточных вод на гидрохимический состав р. Ангары // Теоретическая и прикладная экология. – 2022.– 3.– С. 90-95.- DOI: 10.25750/1995-4301-2022-3-090-095
10. Решетова С.А., Безрукова Е.В., Тетенькин А.В., Кузьмин М.И. Первая реконструкция среды обитания охотников-собирателей Мамаканского археологического района в среднем голоцене, Патомское нагорье // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.– 2022.– 502(1).– С. 32–37.– DOI: 10.31857/S2686739722010066. (англ. DOI: 10.1134/S1028334X22010068)
11. Холодова М.С., Пастухов М.В., Бычинский В.А., Просекин С.Н., Белозерова О.Ю. Минерально-вещественный состав твердого осадка снегового покрова в различных функциональных зонах г. Усолъе-Сибирское // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.– 2022.– 333 (9).– С. 219–203. DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3687
12. Bezrukova E.V., Reshetova S.A., Tetenkin A.V., Tarasov P.E., Leipe Ch. The Early Neolithic–Middle Bronze Age environmental history of the Mamakan archaeological area, Eastern Siberia // Quaternary International. – 2022. - Vol. 623. - p. 159-168. - DOI: 10.1016/j.quaint.2021.12.006
13. Ivanova V., Shchetnikov A., Semenev E., Filinov I., Simon K. LA-ICP-MS analysis of rare earth elements in tooth enamel of fossil small mammals (Ust-Oda section, Fore-Baikal area, Siberia): paleoenvironmental interpretation // Journal of Quaternary Science.– 2022.– DOI: 10.1002/jqs.3428
14. Sizykh A., Poletaeva V. Plant communities of “insular forest-steppe” and “insular steppes” as paragenese in vegetation structure of Western Pre-Baikal // International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES).– 2022.– 12(2).– P. 329–336.– DOI: 10.31407/ijeess12.203

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2022 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	13
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	единиц	12
Количество монографий (глав в монографиях)	единиц	0
Количество публикаций в сборниках конференций	единиц	14
Число тезисов в конференциях	единиц	9