

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)
Per № НИОКТР 121041500059-6
Инв. № _____

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИГХ СО РАН,
д. г.-м.н.

А.Б. Перепелов

« 23 » января 2025 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
по теме:

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

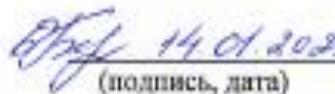
(промежуточный)

№ 0284-2021-0003

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

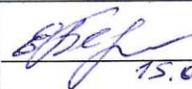
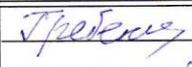
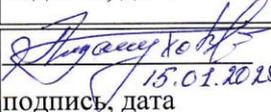
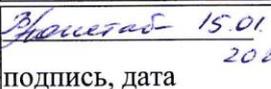
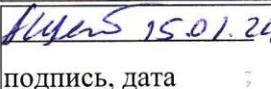
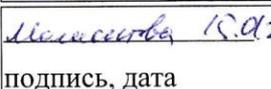
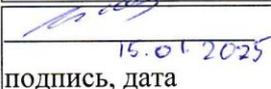
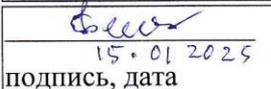
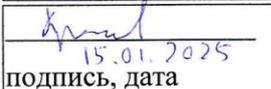
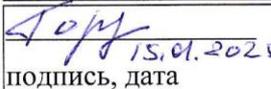
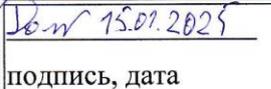
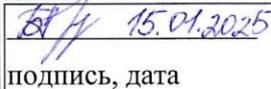
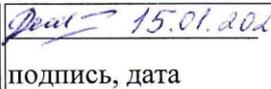
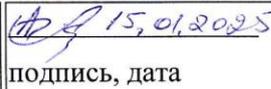
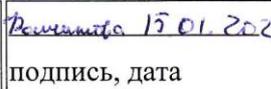
Протокол Ученого совета ИГХ СО РАН
№ 1 от «23» января 2025 г.

Руководитель темы
доктор географических наук

 14.01.2025 Е.В. Безрукова
(подпись, дата)

Иркутск 2024

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ:

Руководитель темы, гнс., д-р географич. наук	 15.01.2025 подпись, дата	Е. В. Безрукова (реферат, введение, раздел 4.1, заключение, компиляция отчета)
Исполнители: внс, д-р. геол.-мин. наук	 15.01.25 подпись, дата	В.И. Гребенщикова (раздел 2)
снс, канд. биол. наук	 15.01.2025 подпись, дата	М.В. Пастухов (раздел 1)
снс, канд. геол.-мин. наук	 15.01.2025 подпись, дата	В.И. Полетаева (раздел 1)
снс, канд. геол.-мин. наук	 15.01.24 подпись, дата	А.А. Щетников (раздел 4.3)
снс, канд. мед. наук	 15.01.25 подпись, дата	Е.А. Мамонтова (раздел 3)
снс, канд. биол. наук	 15.01.2025 подпись, дата	А.А. Мамонтов (раздел 3)
снс, канд. геол.-мин. наук	 15.01.2025 подпись, дата	Г.А. Белоголова (раздел 1.3)
нс, канд. геол.-мин. наук	 15.01.2025 подпись, дата	М.А. Крайнов (раздел 4.2, оформление отчета по ГОСТу)
нс, канд. геол.-мин. наук	 15.01.2025 подпись, дата	О.Н. Гордеева (раздел 1.3)
нс, канд. геол.-мин. наук	 15.01.2025 подпись, дата	П.Г. Долгих (раздел 1)
мнс, канд. геол.-мин. наук	 15.01.2025 подпись, дата	Б.А. Баенгуев (раздел 1.3)
снс, канд. географич. наук	 15.01.2025 подпись, дата	С.А. Решетова (раздел 4.1)
нс, канд. геол.-мин. наук	 15.01.2025 подпись, дата	А.А. Амосова (раздел 4.1)
мнс	 15.01.2025 подпись, дата	Волчатова Е.В. (раздел 4.1)

МНС	 15.01.2025 ПОДПИСЬ, дата	Е.А. Цветкова (раздел 1)
-----	---	--------------------------

РЕФЕРАТ

Отчет 82 с., 1 кн., 22 рис., 5 табл., 100 источников, 2 прил.

БАЙКАЛЬСКИЙ РЕГИОН, ГЛАВНЫЕ ИОНЫ, ДИНАМИКА, ФАКТОРЫ, СВИНЕЦ, РТУТЬ, ПОЧВЫ, ТРАНСЛОКАЦИЯ, ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, РЕДКИЕ ЩЕЛОЧИ, БАЙКАЛЬСКАЯ ВОДНАЯ ЭКОСИСТЕМА, ПОЛИХЛОРИРОВАННЫЕ БИФЕНИЛЫ, ХЛОРОРГАНИЧЕСКИЕ ПЕСТИЦИДЫ, АНТРОПОГЕННО-ИЗМЕНЕННЫЕ РАЙОНЫ, ГОРНЫЕ ЛИМНОЭКОСИСТЕМЫ, ГЕОХИМИЯ, СТРАТИГРАФИЯ КВАРТЕРА

Объекты исследования - вода русловой части заливов Иркутского водохранилища и вода Байкальской водной экосистемы, почвы антропогенно-измененных районов Приангарья, донные отложения горных озер, терригенные отложения квартера.

Цель исследований – изучение пространственно-временной изменчивости природной среды Восточной Сибири, установление причин этих изменений.

В результате установлена высокая степень постоянства концентраций главных ионов в воде русловой части Иркутского водохранилища во временном и пространственном аспектах; выявлены повышенные концентрации ионов хлора в заливах приплотинной части водохранилища, связанные с воздействием антропогенных факторов; обнаружена максимальная аккумуляция свинца в корневой системе пырея, что очень важно для фитостабилизации свинцового загрязнения; показано, что периодически затапливаемые острова р. Ангара могут являться как барьерами для дальнейшего распространения техногенной ртути, так и вторичными источниками ее поступления; установлена индикаторная роль редких щелочей в воде Байкальской экосистемы и показаны близкие генетические условия происхождения горячих источников экосистемы с источниками Камчатки; показано, что особенности вертикального распределения ПХБ и ХОП в почвах в антропогенно-измененных районах Приангарья зависят от содержания органического вещества в почвах, метаболизма почвенными микроорганизмами и физико-химические свойства самих соединений; впервые реконструирована геохимическая эволюция оз.Ильчир, источника р. Иркут, за последние 66000 лет и определены цикличность и причины изменчивости уровня воды; обосновано значение местонахождения Китайский Мост в качестве опорного разреза верхнего палеолита.

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.....	9
Основная часть.....	10
1 Особенности и закономерности распределения химических веществ в антропогенно измененных экосистемах	10
1.1 Пространственно-временная динамика и факторы формирования гидрохимического состава Иркутского водохранилища	10
1.1.1 Введение.....	10
1.1.2 Материалы и методы	10
1.1.3 Результаты и обсуждение	12
1.1.4 Заключение	18
1.2 Биогеохимические процессы транслокации свинца в системе «почва – растения» техногенной зоны территории бывшего металлургического завода гор. Свирска ...	18
1.2.1 Введение.....	19
1.2.2 Объекты и методы.....	19
1.2.3 Результаты исследований и их обсуждение	19
1.2.4 Заключение	24
1.3 Особенности распределения и аккумуляции ртути в почвах островов р. Ангары в зоне влияния «Усольехимпрома».....	24
1.3.1 Введение.....	24
1.3.2 Материалы и методы	24
1.3.3 Результаты и обсуждение.....	25
1.3.3.1 Валовая ртуть в почвах островов р. Ангары.....	25
1.3.3.2 Формы нахождения Hg в почвах островов р. Ангары.....	26
1.3.4 Заключение	27
2 Индикаторная роль редких щелочей (Li, Rb, Cs) в воде Байкальской экосистемы	27
2.1 Введение.....	27
2.2 Материалы и методы.....	29
2.3 Результаты и обсуждение.. ..	30
2.3.1 Термальные источники Баргузинской впадины.....	30
2.3.2 Притоки Байкала.....	31
2.3.3 Вода из скважин в береговой зоне.....	33
2.3.4 Поверхностная и глубинная вода Байкала	33

2.3.5	Вода истока Ангары (сток Байкала).....	35
2.3.6	Вода родников в береговой зоне Байкала.....	36
2.4	Заключение.....	37
3	Исследование динамики ПХБ и ХОП в почвенных разрезах из антропогенно-измененных районов Прибайкалья	38
3.1	Введение.....	38
3.2	Материалы и методы.....	39
3.3	Результаты и их обсуждение.....	41
4	Эволюция озерных экосистем Восточной Сибири в голоцене	45
4.1	Природная среда высокогорного пояса Окинского плато в голоцене	45
4.1.1	Введение.....	45
4.1.2	Район исследования.....	46
4.1.3	Материалы и методы.....	48
4.1.4	Результаты.....	49
4.1.5	Обсуждение.....	51
4.1.6	Заключение.....	54
4.2	Результаты петромагнитных исследований донных отложений оз. Ордынское ..55	
4.2.1	Введение.....	55
4.2.2	Материалы и методы.....	55
4.2.3	Результаты.....	55
4.2.4	Заключение.....	56
4.3	Строение и условия формирования отложений нового многослойного геoarхеологического местонахождения Китойский Мост (верхний палеолит, Предбайкалье).....	57
4.3.1	Введение.....	57
4.3.2	Материалы и методы.....	58
4.3.3	Результаты и их обсуждение.....	59
4.3.4	Заключение.....	63
	Заключение.....	65
	Список использованных источников.....	68
	Приложение А. Список публикаций 2024 г. по теме исследований.....	78
	Приложение Б. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2024 г. в соответствии с государственным заданием	80

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте о НИР используются следующие определения, сокращения и обозначения.

г. – год

гг. – года

гор. – город

ГХЦГ – гексахлорциклогексан

ГЭС – гидроэлектростанция

ДДД – дихлордифенилдихлорэтан

ДДТ – дихлордифенилтрихлорэтан

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

зал. – залив

кг - килограмм

км – километр

л – литр

л.н. – лет назад

м – метр

мас. – массовый

мг – миллиграмм

мкг – микрограмм

мкм – микрометр

млн. – миллион

мм – миллиметр

оз. – озеро

ок. – около

ПДК – предельно допустимая концентрация

ПХБ – полихлорированные бифенилы

пос. – поселок

р. – река

руч. – ручей

РФА – рентгенофлуоресцентный анализ

см – сантиметр

т – тонна

ХОП – хлорорганические пестициды

AMS – accelerator mass spectrometry

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 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 настоящего исследования были: изучение пространственно-временной динамики концентраций главных ионов в воде русловой части и заливов Иркутского водохранилища; выявление основных природных и антропогенных факторов, влияющих на гидрохимический состав воды; изучение механизма подвижности соединений Рb в почвенно-растительной системе в условиях техногенного загрязнения; исследование особенности миграции ртути в почвах периодически затопляемых островов р. Ангары, расположенных выше и ниже по течению от бывшего промышленного предприятия «Усольехимпром»; исследование распределения редких щелочей (Li, Rb, Cs) в сопряженных в пространстве водных объектах Байкальской экосистемы и установление особенностей их накопления в различных объектах экосистемы; изучение особенности вертикального распределения ПХБ и ХОП в почвах антропогенно-измененных районов на примере лесных экосистем рекреационных зон городов Иркутск и Усолье-Сибирское; реконструкция минералого-геохимической эволюции оз. Ильчир – источника р. Иркут, за последние 6600 лет для понимания реакции озерной экосистемы на изменения глобального/регионального климата; изучение литолого-стратиграфического строения разреза Китойский Мост для реконструкции условий осадконакопления в геоэкологическом контексте.

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 Особенности и закономерности распределения химических веществ в антропогенно измененных экосистемах

1.1 Пространственно-временная динамика и факторы формирования гидрохимического состава Иркутского водохранилища

1.1.1 Введение

Запасы пресной воды в поверхностных водоемах и доступность их использования значительно повышают ресурсно-производственный и рекреационный потенциал территории, что приводит к увеличению темпов урбанизации побережья. Развитие промышленности, увеличение площади сельскохозяйственных территорий и растущая туристическая активность населения в бассейнах пресноводных водоемов неминуемо приводит к негативным преобразованиям их гидрохимического состава. На гидрохимические характеристики водоемов влияют природные (процессы выветривания, литология бассейна, состав притоков и т.д.) и разноплановые антропогенные факторы [1, 2]. К антропогенным факторам преобразования гидрологического и гидрохимического режима пресноводной р. Ангары относится создание на ней каскада водохранилищ. Водные ресурсы первого в системе Ангарских ГЭС – Иркутского водохранилища используются в качестве основных питьевых вод, а также в гидроэнергетических, рыбохозяйственных, судоходных и рекреационных целях. В настоящее время происходит активное заселение береговой полосы и повышение туристической активности, что, в первую очередь, обуславливает нагрузку на прибрежные участки водоема. Увеличение антропогенной нагрузки определяет актуальность исследования, направленного на изучение гидрохимического состава пресноводного водоема и оценку его возможных негативных преобразований. Целью настоящего исследования стало: а) изучить пространственно-временную динамику концентраций главных ионов в воде русловой части и заливов Иркутского водохранилища, б) выявить основные природные и антропогенные факторы, влияющие на гидрохимический состав. Исследование представляет интерес в оценке качества воды крупной пресноводной Байкало-Ангарской системы, и, как ожидается, внесет вклад в политику сохранения поверхностных водных ресурсов, как ключевого источника питьевой воды.

1.1.2 Материалы и методы

Иркутское водохранилище (рисунок 1), образованное перекрытием плотиной Иркутской ГЭС р. Ангары в 1956 г., затопило долину реки от истока (район пос. Листвянка) до створа Иркутской ГЭС (гор. Иркутск). Плотина Иркутской ГЭС находится в самом крупном городе Прибайкалья – гор. Иркутск (рисунок 1), в котором основные градостроительные предприятия расположены ниже плотины Иркутской ГЭС. Левый берег Иркутского водохранилища является очень крутым, в связи с этим, менее доступным и неосвоенным. Множество населенных пунктов, турбаз, а также площадей сельскохозяйственного назначения расположено вдоль правого берега водохранилища. Наибольшее развитие туристической отрасли наблюдается в пос. Листвянка, расположенного на северо-западном берегу оз. Байкал в районе истока р. Ангары. В настоящее время все большее развитие получает частный водный транспорт, представленный как моторными лодками и яхтами, так и круизными судами с большим водоизмещением.



Рисунок 1 – Карта-схема станций отбора проб воды Иркутского водохранилища

Экспедиционные работы, направленные на отбор проб воды Иркутского водохранилища, проведены в июле 2012 г. и 2024 г. Станции отбора проб 2012 г. и 2024 г. распределены по русловой части акватории водохранилища, в 2024 г. – дополнительно

отобраны пробы в вершинах заливов (5–10 м от береговой линии) (рисунок 1). На станциях с глубиной более 2 м образцы вод отобраны с поверхностного (0,5 м) и придонного (1 м выше дна) слоев воды. Химический анализ образцов воды осуществлен в центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН (гор. Иркутск, Россия). Измерение концентрации SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} , Na^+ и K^+ проведено методом капиллярного электрофореза с использованием приборов серии «Капель» (Люмэкс, Россия), HCO_3^- - титриметрическим методом.

1.1.3 Результаты и обсуждение

В период исследований рН вод Иркутского водохранилища изменялась от околонеutralной до слабощелочной: на русловых станциях – 7,06–8,5 (среднее 7,9), в заливах – 6,9–8,8 (среднее 7,74). Воды маломинерализованные: в русловой части – от 90,0 до 102,1 мг/л (среднее 96,2 мг/л), в заливах – от 56,7 до 155,1 мг/л (среднее 95,3 мг/л). Величина минерализации ниже медианы, рассчитанной для рек мира (127 мг/л) [3], и близка к средней для вод оз. Байкал (~ 96 мг/л) [4]. Статистические характеристики концентрации главных ионов показаны в таблице 1 и на рисунке 2. Отдельно выделен исток р. Ангара, т.к. считается, что состав его вод отражает сток всего оз. Байкал [5].

Концентрации главных ионов в воде русловой части имеют незначительную вариабельность, отражающую величины коэффициента вариации, а также близкие средние и медианные концентрации (таблица 1). В период исследований большинство концентрации основных ионов изменяются в диапазоне среднее $\pm 1\sigma$. В пределах $\pm 2\sigma$ изменяются концентрации SO_4^{2-} , Cl^- в 3 пробах воды. Следует отметить сходство концентраций главных ионов в поверхностной и придонной воде на станциях русловой части водоема. В июле 2024 г. средние концентрации HCO_3^- в поверхностной и придонной воде составили – 63,8 и 64,2 мг/л, Cl^- – 0,59 и 0,58 мг/л, SO_4^{2-} – 6,4 и 5,9 мг/л, K^+ – 1,02 и 1,06 мг/л, Na^+ – 3,75 и 3,81 мг/л, Ca^{2+} – 16,4 и 16,7 мг/л, Mg^{2+} – 3,27 и 3,27 мг/л, соответственно. Сравнение концентраций главных ионов в разные временные промежутки (от периода становления водохранилища (1957–1961 гг.) до настоящего времени) также определяет достаточную степень постоянства основного ионного состава.

Мониторинговые исследования, проводимые с начала XX века и продолжающиеся в настоящее время, показали, что в воде пелагиали оз. Байкал концентрации основных ионов стабильны как в сезонном, так и межгодовом аспекте и изменяются в пределах точности методов измерения [6, 9]. Сходные особенности распределения главных ионов определены в истоке р. Ангара в 1997–2003 гг. [5]. Как в озере, так и Иркутском

водохранилище к доминирующим катионам в воде относится – Ca^{2+} , анионам – HCO_3^- .

Химический

Таблица 1 – Статистические и литературные данные по концентрации (мг/л) основных ионов в воде Иркутского водохранилища, истоке р. Ангары и оз. Байкал

	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Литература
оз. Байкал	65,1	5,3	0,46	16,0	3,0	3,4	0,96	[6]
Исток р. Ангары 2024 г.	66,0	6,3	0,61	16,6	3,1	3,5	1,0	Настоящее исследование
Иркутское водохранилище								
1957-1961 гг.	61,8-67,0	4,0-5,5	1,3-2,8	14,1-16,8	2,5-4,0	2,8-6,8		[7]
1997 г.	66,5	5,6	0,9	16,1	3,6	3,8		[8]
2012 г.	<u>59,5-65,4*</u>	<u>4,0-5,8</u>	<u>0,8-1,2</u>	<u>12,7-17,7</u>	<u>2,1-5,7</u>	<u>3,4-3,6</u>	<u>0,8-1,1</u>	Настоящее исследование
	63,0	5,0	1,0	15,3	3,6	3,5	1,0	
2024 г.	Русловая часть							
	\bar{X}	64,6	6,0	0,56	16,2	3,2	3,6	1,01
	Me	64,7	5,8	0,53	16,3	3,2	3,7	1,03
	Б	1,7	0,6	0,09	1,2	0,2	0,4	0,06
	$C_v, \%$	3	10	16	7	7	12	6
	Заливы							
	\bar{X}	63,9	7,5	0,72	14,9	3,3	3,3	0,82
	Me	63,9	6,1	0,57	15,0	3,0	3,3	0,84
	Б	8,5	5,0	0,37	2,4	1,0	0,5	0,18
	$C_v, \%$	13	67	52	16	30	15	22

Примечание: \bar{X} – средняя концентрация, Me – медиана, Б – стандартное отклонение, C_v – коэффициент вариации. * в числителе – минимальная-максимальная, в знаменателе – средняя концентрация

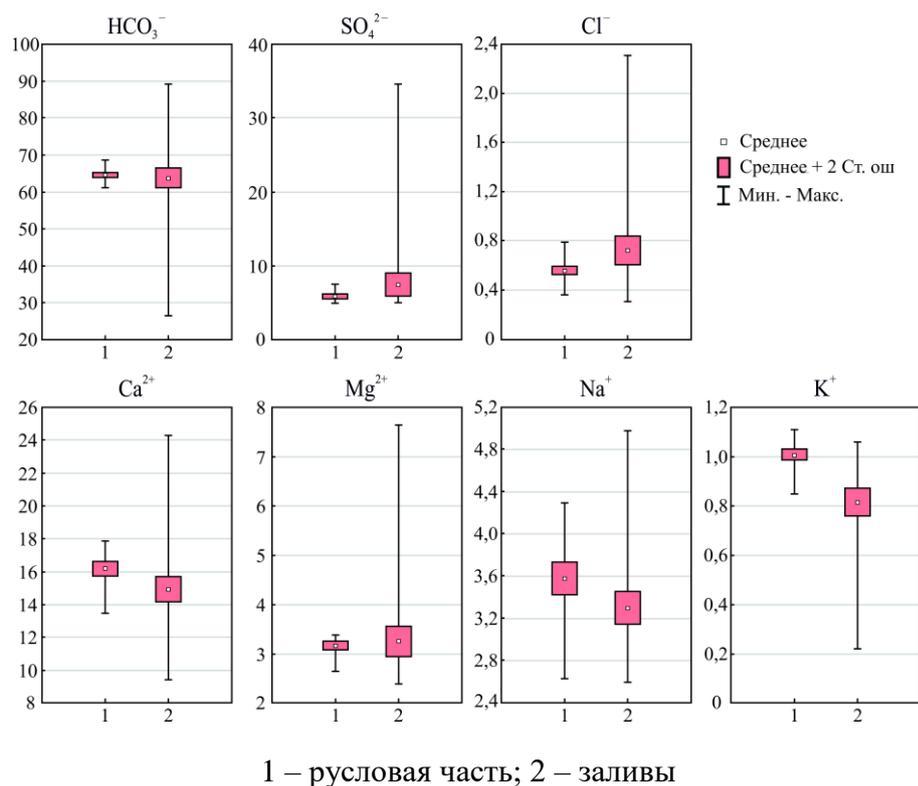


Рисунок 2 – Концентрации главных ионов (мг/л) в воде Иркутского водохранилища

состав их вод характеризуется, как гидрокарбонатный кальциевый. Небольшие вариации концентраций основных ионов в пределах русловой части Иркутского водохранилища определяются, в первую очередь, интенсивностью его водообмена. Кожова О.М. [10] отмечает, что в 1957 г. (второй год после зарегулирования р. Ангары плотиной Иркутской ГЭС) вода в водохранилище сменилась 87 раз, в 1958 г. – 30 раз. Со второй половины 1959 г. интенсивность водообмена снизилась и стабилизировалась – около 24 раз/год или более 2 раз/месяц. Особенность гидрологического режима, близкие средние концентрации основных ионов и величины минерализации в водах оз. Байкал, истока р. Ангара и верхнем бьефе Иркутской ГЭС определяют, что для Иркутского водохранилища основным источником растворенных веществ является сток озера. Процессы выветривания минералов и морские соли, которые могут изменить состав вод по течению водоема в широких пределах [11], не оказывают значительного влияния на концентрацию главных ионов в воде русловой части водохранилища.

Результаты исследования показывают, что в заливах водохранилища, в отличие от русловой части, наблюдается значительная неоднородность основного ионного состава (таблица 1, рисунок 2): коэффициенты вариации увеличиваются для концентраций всех

главных ионов, медианные концентрации Cl^- и SO_4^{2-} значительно отличаются от средних. На основной ионный состав водоемов большое влияние оказывают антропогенные факторы, которые увеличивают в водной среде, в основном, концентрации сульфатов и ионов хлора [12, 13]. Эти ионы относятся и к основным загрязнителям Южной части оз. Байкал, сток которой в большей степени оказывает влияние на химический состав истока р. Ангары и Иркутского водохранилища. На концентрацию сульфатов в воде этой части озера и истока р. Ангары значительное воздействие на протяжении нескольких десятков лет оказывали сточные воды закрытого в 2013 г. Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) [14]. По данным [15], помимо SO_4^{2-} , в Южную часть оз. Байкал поступают(ли) и большие количества Cl^- : с сточными водами БЦБК $7,3 \pm 0,2$ т/год, с сточными водами г. Улан-Удэ – 5274 ± 648 т/год, с загрязненными водами р. Селенга (крупнейший приток оз. Байкал) – $70,65 \pm 9,91$ т/год. Развитие на побережье Иркутского водохранилища большого количества дачных поселений определяет необходимость рассмотреть еще один вероятный источник Cl^- . Известно, что на его увеличение в водной среде может оказывать влияние применение хлорида калия в качестве сельскохозяйственных удобрений [16]. Количественно вклад сельскохозяйственных удобрений в концентрацию хлорид иона не может быть определен наличием текущих данных. Однако, для Иркутского водохранилища содержание K^+ за весь период опробования значительно не изменяется (средние от 0,91 до 0,96 мг/л, таблица 1), корреляционных зависимостей между ионом хлора и калием не наблюдается. В связи с этим, по результатам данного исследования можно сделать вывод, что воздействие сельскохозяйственных удобрений на концентрацию Cl^- в воде станций отбора проб Иркутского водохранилища не прослеживается. В то же время, наиболее контрастно концентрации Cl^- повышаются в заливах, испытывающих чрезмерную антропогенную нагрузку населенных пунктов: 2,3 и 1,6 мг/л – в зал. Топка (воздействие поселков Молодежный и Новая Разводная), 1,5 мг/л – в зал. Чертугеевский (воздействие г. Иркутск, речного порта, стоянки катеров и моторных лодок), 1,4 и 1,1 мг/л в зал. Ерши (воздействие коттеджного поселка, стоянки катеров и моторных лодок) (рисунок 3). Вероятной причиной повышения концентраций Cl^- в воде этих заливов является его поступление при использовании хлорсодержащих моющих дезинфицирующих и противогололедных средств, как в бытовых целях, так и для санитарной обработки судов.

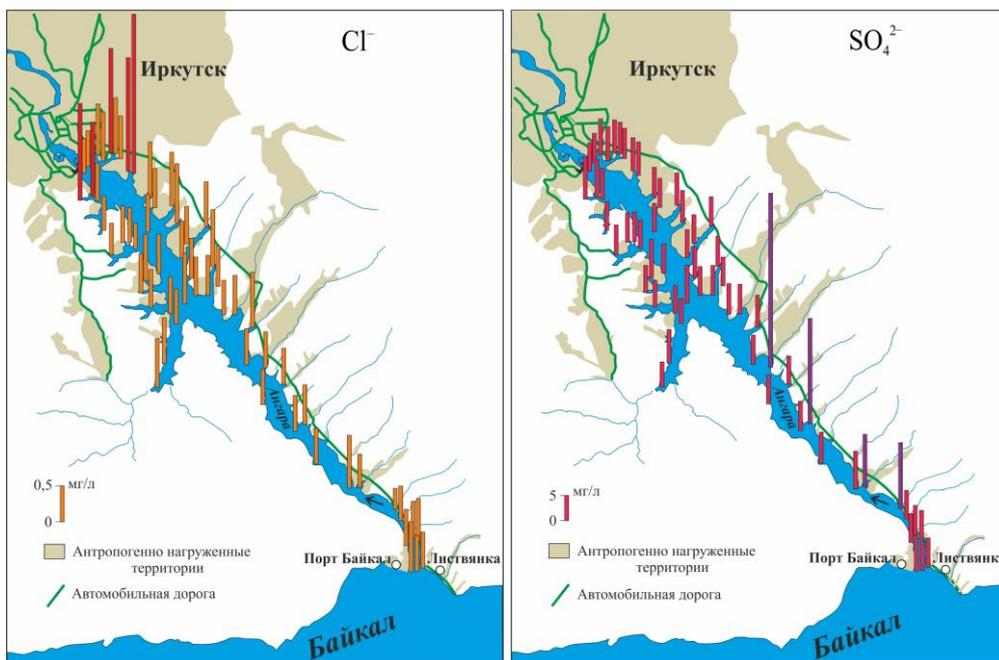


Рисунок 3 – Распределение концентраций хлорид-иона и сульфатов в воде Иркутского водохранилища (июль 2024 г.)

По сравнению с Cl^- , для SO_4^{2-} наблюдается иная картина распределения концентраций в воде заливов Иркутского водохранилища (рисунок 3). При общем, достаточно равномерном распределении по акватории водоема, повышенными значениями выделяются концентрации сульфатов в воде 4 заливов правого берега верхней (речной) части водохранилища: небольшой, замкнутый узким устьем залив Никулиха у пос. Ангарские Хутора (13,2 мг/л), залив Большой, окруженный крупным сельским поселением Большая Речка (10,5 мг/л), залив Тальцы (21,0 мг/л), залив Бурдугуз (34,6 мг/л). Поскольку на побережье заливов Большой и Никулиха расположены приусадебные участки, можно предположить антропогенное поступление сульфатов с поверхностным стоком в результате применения на полях серосодержащих удобрений. Вместе с тем проведенный анализ полученных данных показал, что антропогенный фактор имеет второстепенное значение. Повышенные концентрации SO_4^{2-} в этих водоемах преимущественно обусловлены природными факторами. Для всех четырех заливов характерны малые глубины и замедленный водообмен с русловой частью водохранилища. В связи с этим, увеличивается функциональная роль впадающих в заливы притоков, в существенной мере определяющих состав главных ионов. Гидрохимический состав проанализированной воды заливов симбатно изменяется с составом вод их притоков. Так, например, в заливах Бурдугуз и Тальцы наблюдаются самые высокие, из проанализированных в данном исследовании проб воды, концентрации HCO_3^- – 82,2 и 72,2

мг/л, Ca^{2+} – 24 и 21 мг/л, Mg^{2+} – 7,6 и 4,6 мг/л, соответственно. В свою очередь и в впадающих в заливы реках Бурдугуз и Тальцинка также зарегистрированы повышенные концентрации этих ионов и сульфатов: HCO_3^- – 86,6 и 95,2 мг/л, Ca^{2+} – 25,5 и 34,5 мг/л, Mg^{2+} – 9,4 и 10,9 мг/л, SO_4^{2-} – 25,5 и 34,5 мг/л, соответственно. Напротив, на фоне увеличенных концентраций сульфатов, воды заливов Большой и Никулиха содержат наименьшие по всей выборке проб концентрации HCO_3^- и Ca^{2+} – 46,1 и 26,0 мг/л, 11,0 и 9,0 мг/л, соответственно. Такая же тенденция установлена и для притоков этих заливов – р. Большой и р. Никулиха: повышенные концентрации SO_4^{2-} (16 и 19 мг/л) и пониженные HCO_3^- и Ca^{2+} – 35,6 и 36,6 мг/л, 7,0 и 8,1 мг/л, соответственно. Таким образом, с большой долей вероятности можно утверждать, что такой природный фактор, как боковая приточность вод, может иметь немаловажное значение в формировании гидрохимии выделенных мелководных заливов. В начальный период формирования Иркутского водохранилища М.Д. Николаева также высказывала мнение, что на гидрохимический состав заливов оказывают влияние впадающие реки [7]. Однако влияние притоков ограничено мелководной зоной заливов, в русловой части водохранилища аномальные концентрации главных ионов нивелируются большими объемами байкальских вод, имеющих стабильный гидрохимический состав.

Обнаруженные в проведенном исследовании увеличенные концентрации некоторых компонентов основного солевого состава, главным образом Cl^- и SO_4^{2-} , в воде заливов Иркутского водохранилища значительно ниже установленных в России нормативов для всех видов водопользования и экосистема пока справляется с увеличивающейся антропогенной нагрузкой. Вместе с тем, при современном стремительном расширении антропогенного освоения прибрежных территорий вокруг Иркутского водохранилища резервы самоочищения экосистемы могут значительно снижаться, приводя к заметному ухудшению качества вод, особенно в заливах водоема, наиболее уязвимых природных системах, часто не успевающих адаптироваться к внешним воздействиям. Учитывая принадлежность Иркутского водохранилища к уникальной Байкало-Ангарской водной системе, обладающей в мировом масштабе стратегическим запасом пресных питьевых вод, для сохранения этого незаменимого природного ресурса, любые, даже незначительные, проявления негативных изменений гидрохимического состава должны контролироваться, а после определения источника загрязнения бескомпромиссно купироваться.

1.1.4 Заключение

Анализ результатов исследования показал, что состав главных ионов воды русловой части Иркутского водохранилища обладает достаточным постоянством как во временном аспекте, так и по акватории водоема, включая глубоководную зону. Это обусловлено доминирующим влиянием стабильных по гидрохимическому составу чистых вод оз. Байкал, питающих водохранилище, и интенсивным обменом.

В то же время, в водохранилище выявлены заливы с повышенными концентрациями ионов хлора и сульфатов, в значительной мере отклоняющиеся от средних и медианных значений этих компонентов, определенных для всего водоема. Наибольшие концентрации Cl^- приурочены к приплотинным заливам водохранилища, испытывающим значительную антропогенную нагрузку, как жилых комплексов, так и от многочисленного водного транспорта. Напротив, увеличение содержания SO_4^{2-} наблюдается в воде заливов верхней части водохранилища и обусловлено преимущественно природными факторами – влиянием вод впадающих притоков.

Полученные в исследовании данные пополнят разработанную в ИГХ СО РАН зарегистрированную базу данных «Неорганические загрязнители в стоке оз. Байкал» и могут быть востребованы в природоохранных контролирующих организациях при проведении мониторинговых работ, направленных на экологическую оценку состояния Иркутского водохранилища.

1.2 Биогеохимические процессы транслокации свинца в системе «почва – растения» техногенной зоны территории бывшего металлургического завода гор. Свирска

1.2.1 Введение

Свинец в естественных условиях содержится во всех растениях, однако его метаболическая роль до сих пор остается не ясной. Повышенные содержания свинца в растениях оказывают негативное действие, нарушая основные физиологические процессы: подавляется процесс фотосинтеза, ингибируется дыхание и замедляется рост растений. Актуальным является изучение закономерности трансформации соединений Pb в условиях техногенеза и особенности его поступления в растения, что может влиять и на пищевые цепи животных и человека. Изучение подвижности свинца в почве и особенности его накопления в растениях может представлять также большой интерес в связи с разработкой методик фиторемедиации почв, в растениеводстве и при

природопользовании территорий после ликвидации техногенных объектов, загрязненных свинцом. Целью данного исследования являлось изучение АМЗ, г. .

1.2.2 Объекты и методы

Объектом данного исследования являлось изучение особенности транслокации Pb из почв в растения на территории бывшей промышленной площадки Ангарского металлургического завода (АМЗ) г. Свирска, выпускавшего мышьяк для оборонной промышленности до 1949 года. Для производства мышьяка использовались сульфидные руды, включающие также другие халькофильные элементы, в частности, свинец. В 2013–2015 годах была проведена ликвидация отвалов, строений завода и рекультивация техногенных почв. В настоящее время эта территория представляет собой выравненную площадку, покрытую травянистой растительностью. Мы изучили особенности распределения свинца и его транслокацию в сопряженных с почвами растениях в 30 пробах надземных вегетативных органов и 15 пробах корней одного вида пырея *Elytrigia repens* L. Пробы растений и почв анализировали РФА и атомно-абсорбционным методом. В почвах изучены формы соединений Pb. Статистический анализ содержаний Pb проведен на основе программы Statistica 10. Графики регрессионной зависимости между содержанием Pb в почве и растениях были построены с использованием программы Microsoft Excel 10. Для построения картосхемы использовали программу QGIS.

1.2.3 Результаты исследований и их обсуждение

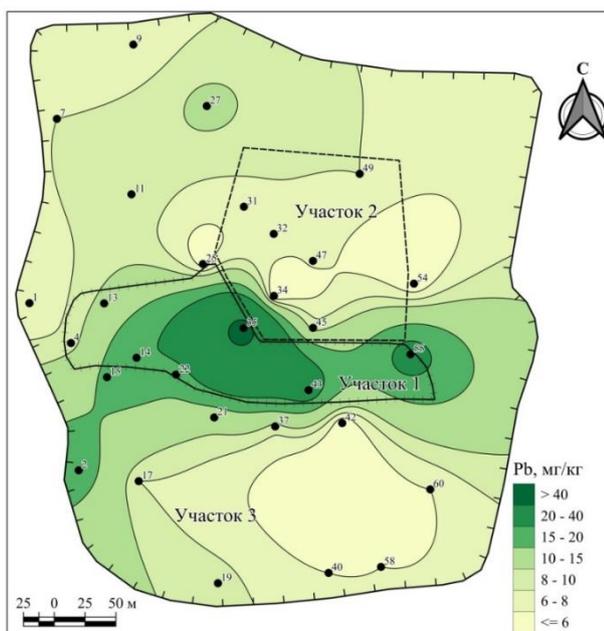
На исследуемой территории условно выделены три участка, отличающиеся источниками техногенного загрязнения. Участок 1 – территория бывших отвалов. На данном участке соединения свинца находятся в прочно связанном состоянии. Свинец здесь может быть связан с алюмосиликатами, находиться в виде разрушенных сульфатов, которые образуются в зоне окисления сульфидов, распространенной на этой территории. Основным источником повышенных содержаний свинца в грунте и почвах являлся галенит PbS и вторичные минералы свинца. Участок 2 – территория, где располагались строения АМЗ, на котором была проведена рекультивация с внесением чистых почв. Здесь содержания свинца невысокие. Участок 3 – окрестности основной зоны загрязнения, где распространены дерново – карбонатные почвы с выраженным гумусовым горизонтом, загрязненным дисперсным материалом свинца, привнесенным из отвала. Соединения свинца в этой зоне также приобретают повышенную подвижность, что объясняется увеличением дисперсности загрязненного субстрата.

Общее распределение концентраций Pb в надземных частях и корнях растений пырея на этих участках приведено в таблице 2, на рисунке 4.

Таблица 2 – Характеристика содержаний Pb (мг/кг) в надземной части и корнях пырея ползучего *Elytrigia repens* (на сухой вес)

№ участка	Количество проб	Максимум	Минимум	Среднее значение
1	10 ^{a)} / 4 ^{b)}	48 / 235	3 / 98	18 / 139
2	6 / 6	9 / 23	4 / 10	7 / 16
3	14 / 5	18 / 62	4 / 14	9 / 44

Примечание: а) надземная часть б) корень



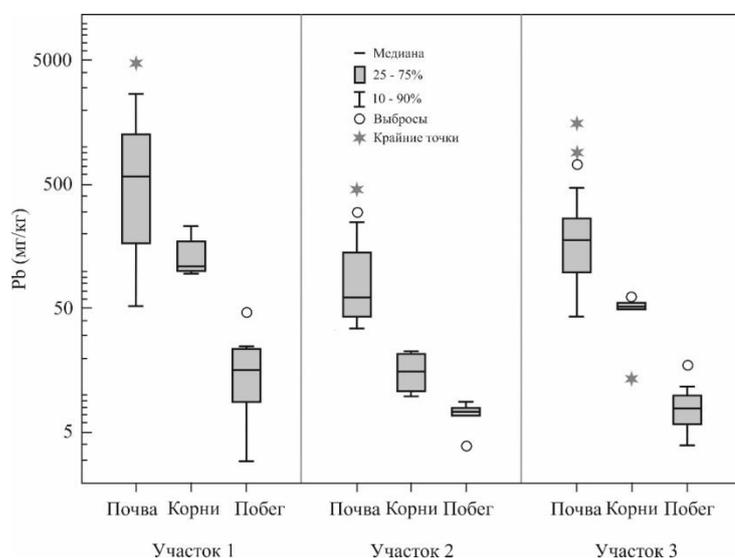
Участок 1 – зона бывших отвалов, 2 – бывшая территория здания завода, 3 – территория, расположенная за пределами участков 1, 2

Рисунок 4 – Схема распределения концентраций Pb в надземной части растений, мг/кг

Обычное содержание свинца в травах составляет 2,1 мг/кг [17], средние содержания свинца в *Elytrigia repens* в естественных условиях на разных типах почвы варьируют в пределах 0,38–0,62 [18], а ПДК свинца в лекарственных растениях составляет 6 мг/кг [19]. Наиболее близкие по значению содержания Pb в растениях наблюдаются для

образцов, отобранных на территории участка 2. Средние содержания свинца в надземной части пырея ползучего здесь составляют 7 мг/кг. Максимальное свинцовое загрязнение приходится на зону воздействия бывшего отвала (участок 1), здесь средние концентрации свинца в надземной части растений достигают 18 мг/кг, а среднее содержание в корнях 139 мг/кг (таблица 2, рисунок 4). Содержание Pb в большинстве отобранных проб превышает значение ПДК свинца для лекарственных трав.

Статистическое распределение содержаний свинца в надземной части, корнях растений и сопряженной с ними почвой показано на рисунке 2. Величина концентрации Pb в растениях, в основном, зависит от его содержания в почве, это видно по статистическим параметрам, рассчитанным по медиане концентраций свинца в почве, корнях и надземных вегетативных органах *Elytrigia repens* (рисунок 5).



Участок 1 – территория бывших отвалов, участок 2 – бывшая территория здания завода, 3 – территория, расположенная за пределами участков 1, 2

Рисунок 5 – Распределение концентрации Pb (мг/кг) в техногенных почвах, корнях и побегах *Elytrigia repens*. Минимальные, максимальные значения и медиана

На рисунке 6 при помощи регрессионных трендов между параметрами показана связь между содержанием свинца в почве и корнях, а также корнях и надземной части растения. Показано, что содержания Pb в надземной части растений напрямую коррелирует с концентрациями в корнях (рисунок 6А), такая же закономерность наблюдается между содержаниями свинца в корнях растений и почвой (рисунок 6Б). Корреляции между содержанием свинца в растении и валовым содержанием элемента в почве значительные при $p < 0,001$.

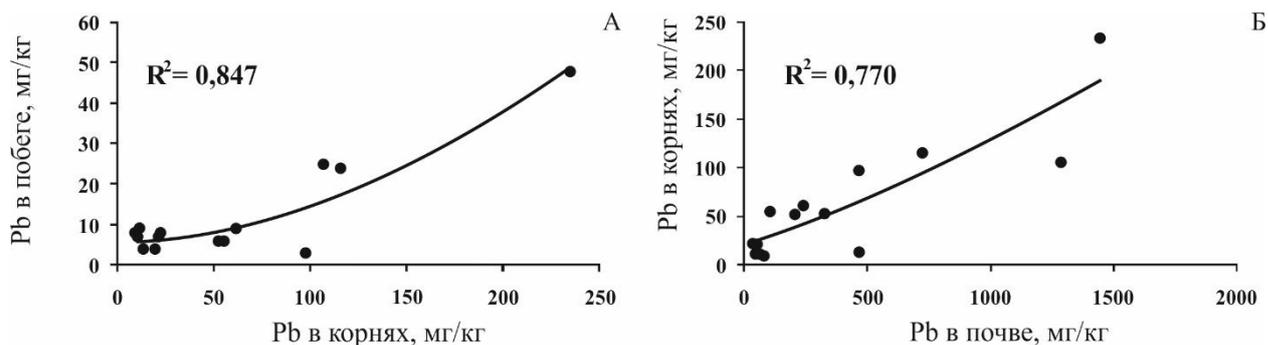


Рисунок 6 – Зависимость концентраций Pb в надземной части растения от концентраций Pb в корнях (А) при $p < 0,001$, зависимость концентраций Pb в корнях от концентраций Pb в почве (Б) при $p < 0,001$

Содержания Pb для почв и сопряженными с ними надземной части и корней исследуемых растений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Средние концентрации Pb мг/кг в сопряженных образцах почв и различных органах пырея *Elytrigia repens* (мг/кг на сухой вес). Коэффициенты накопления свинца в растениях Кб и транслокационный индекс ТИ

Участки	Почва n -30	Побеги n-30	Кб побеги	Корни n-15	Кб корни	ТИ
1	834	21,8	0,03	124	0,17	0,16
2	52	7	0,15	16	0,36	0,51
3	276	5,5	0,03	44	0,25	0,16

Примечание: Кб – отношение содержания Pb в растениях к концентрации в сопряженной почве, ТИ – отношение содержания Pb в побегах к его концентрации в корнях

Для оценки поступления свинца из корней в надземную часть был рассчитан транслокационный индекс. Как правило, значение ТИ < 1 , так как основная часть свинца накапливается в корнях растений [20], и лишь небольшая доля Pb поступает в побег растения [21]. Такой механизм снижает транспортировку потенциально токсичных элементов через апопласт у большинства растений [22]. При этом связывание высоких уровней свинца клеточной стенкой или мембраной приводит к существенным изменениям пластичности клеточной стенки [23], тем самым негативно влияя на мембранный потенциал [24]. Средние значения ТИ для участков 1 и 3 составляют 0,169 и 0,153

соответственно, что указывает на достаточно низкое поступление свинца из корня в надземную часть растения. Высокий уровень транслокационного индекса для растений на втором участке свидетельствует о значительном перемещении Pb из корней в побег растения, что обычно нетипично для свинца. Возможно, это зависит от концентрации свинца в почве и более подвижных форм его нахождения на данном участке, а также может играть большую роль воздушный перенос свинца с пылью.

Интенсивность накопления и транслокация Pb в пырее зависит не только от валового содержания в почве, но и от формы нахождения в почве и степени его подвижности. Так, в зоне отвала участка 1 и на удалении с высокими Pb концентрациями в грунте и почвах установлены высокие концентрации Pb в корнях и пониженные - в побегах пырея.

Наибольшее поступление свинца из почвы в корень и надземную часть растения отмечается на 2 участке с минимальным свинцовым загрязнением, здесь среднее значение $K_{бк}$ составляет 0,36. Самые низкие значения $K_{бк}$ приходятся на участок 1 – зону бывших отвалов. Это связано также с формами нахождения свинца в почве на данной территории. По полученным данным [25] установлено, что Pb наиболее подвижен на участке 2, где была проведена ранее рекультивация территории, а на участке 1 свинец находится в наиболее закрепленных формах, поэтому менее доступен для поглощения растениями.

Низкие значения коэффициента ТИ также возможно связаны с тем, что поглощение свинца растениями снижается благодаря выделению слизи на корнях растений. В составе слизи присутствует углеводный компонент, в котором наиболее важными являются гидроксильные и карбоксильные функциональные группы. Наибольшим сродством к данным группам имеют ионы Pb. [26]. Таким образом, даже при высоких содержаниях Pb в почве, концентрации в *Elytrigia repens* на порядок ниже (таблица 3). Известно, что большая часть свинца, поглощенная корнем растения из почвы, не поступает в надземную часть растения. Это подтверждается нашими данными, транслокация свинца на участке 1 и 3 составляет 0,16, а на участке 2 среднее значение ТИ увеличивается до 0,51 (таблица 3), что связано с более подвижными формами нахождения свинца в почве и меньшими валовыми содержаниями на данном участке.

1.2.4 Заключение

По результатам исследования установлено повсеместное загрязнение свинцом верхних горизонтов почв и наиболее распространенных на этой территории растений пырея ползучего (*Elytrigia repens*). Максимальное накопление свинца установлено в

корневой части изученных растений, что имеет большое значение для фитостабилизации свинцового загрязнения и указывает на повышенную толерантность данного растения. Интенсивность накопления и транслокация свинца в растения зависит не только от валовых содержаний свинца, но и от его форм нахождения в почве.

Выделенные закономерности могут быть полезны для разработки новых биотехнологий, применяемых для фиторемедиации, рекультивации почв и выращивании растений, а также для лучшего понимания механизма поведения Pb в системе почва-растение.

1.3 Особенности распределения и аккумуляции ртути в почвах островов р. Ангары в зоне влияния «Усольехимпрома»

1.3.1 Введение

Миграция ртути в наземных экосистемах изучается достаточно широко, в то же время исследованию этих процессов в почвах в условиях периодического затопления посвящено гораздо меньше работ. Миграция Hg в таких условиях происходит несколько иначе, что связано с особенностями почвообразования при изменяющейся влажности. Известно, что межгодовые колебания уровня воды в Братском водохранилище могут достигать 7 метров [27]. В полноводные годы острова полностью покрываются водой. Геохимическую специфику островных почв определяют водно-солевой состав рек, направление и интенсивность водных течений, рельеф дна, концентрации загрязнителей в воде, донных осадках, взмучивание и переотложение последних [27–29]. В данном исследовании изучены особенности миграции ртути в почвах периодически затапливаемых островов р. Ангары, расположенных выше и ниже по течению от бывшего промышленного предприятия «Усольехимпром» (УХП), в прошлом использовавшего Hg в производственных процессах.

1.3.2 Материалы и методы

На 11 островах р. Ангары с глубины до 30 см были отобраны аллювиально-луговые почвы, в 8,2 км выше по течению от УХП находится условно-фоновый участок. Почвы высушены до воздушно-сухого состояния и просеяны через сито с отверстиями 2 меш. Все виды химического анализа проводили в Изотопно-геохимическом центре коллективного пользования Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск. Валовые концентрации Hg в почвах и вытяжках из почв измеряли атомно-абсорбционным

методом на спектрометре «РА-915+» с приставкой «РП-91С» (Lumex, Россия). Постадийные вытяжки получали по методике [30].

1.3.3 Результаты и обсуждение

1.3.3.1 Валовая ртуть в почвах островов р. Ангары

Концентрации Hg в островных почвах находятся в пределах 0,04-5,0 мг/кг. В почвах о. Поповский, расположенного в 12 км ниже по течению от УХП, обнаружена максимальная концентрация Hg – 5 мг/кг, что выше ПДК почв в 2,4 раза. Во всех образцах почв концентрации Hg выше регионального фона (0,02 мг/кг) в 2,5-250 раз. Увеличение концентраций Hg в островных почвах относительно регионального фона и ПДК указывает на перенос соединений Hg ниже по течению от УХП. Этому способствуют поверхностный сток с загрязненных почв промлощадки УХП. Некоторое количество техногенной ртути уносится водами р. Ангары и оседает в прибрежной части островных почв. Другим существенным источником Hg для акватории р. Ангары является шламонакопитель (ШН) УХП. ШН в настоящее время не имеет водного зеркала, что способствует атмосферному переносу Hg с пылевыми частицами, особенно в сухую ветреную погоду. Ранее установлено, что концентрации Hg в почвах вокруг ШН превышали региональный фон в 1,4-31050 [31]. Установлены значимые корреляционные параметры между концентрациями Hg в почвах островов и вокруг ШН – коэффициент корреляции R составил 0,84 при $p < 0,001$; U -критерий Манна-Уитни – 0,17 при $p > 0,05$. Источником Hg для островных почв могут быть и донные осадки, которые при изменении уровня режима Ангары могут размываться и в виде взвешенного материала мигрировать, оседая на подтопленных островах. Исследования [27] показали, что именно донные отложения являются основным депонирующим субстратом техногенной Hg; значительные концентрации Hg соответствуют годам интенсивной работы УХП, а по мере сокращения объемов производства они перекрываются осадками с меньшими содержаниями токсиканта. В многоводные периоды перемешивание и промывание донных отложений приводит к высвобождению и переносу Hg вниз по течению, где она снова перекладывается в донные осадки, а также в затопленные почвы.

Таким образом, в «сухие» годы почвы островов преимущественно накапливают Hg в результате атмосферного переноса. В годы с высоким уровнем воды, острова с развитым высокорослым травянистым покровом становятся естественными барьерами для миграции загрязненных ртутью взвешенных веществ. В тоже время, в полноводные годы при полном затоплении островов может протекать и обратный процесс – ртутьсодержащие

частицы вымываются из почв, что приводит к дополнительному поступлению Hg в акваторию р. Ангары. В этой связи островные почвы сами становятся вторичным источником техногенной Hg для речной системы Ангары.

1.3.3.2 Формы нахождения Hg в почвах островов р. Ангары

В островных почвах основная масса Hg находится в прочносвязанной минеральной фракции – 36–88%, меньше в органической – 3–55% и существенно меньше в сульфидной – 4–24% (рисунок 7). Преимущественное накопление Hg в прочносвязанной фракции прослеживались и для почв вокруг ШН [31]. Сравнение также показало, что количества сульфидной Hg оказалось максимальной в почвах вокруг ШН. Это вполне логично, так как в качестве превентивных мер использованную на УХП Hg переводили в труднорастворимые сульфидные соединения и сбрасывали в ШН. По всей видимости, именно слабо-растворимые техногенные формы Hg, прочносвязанная и сульфидная, унаследованы почвами островов от основного техногенного источника – промплощадки УХП, включающей ШН.

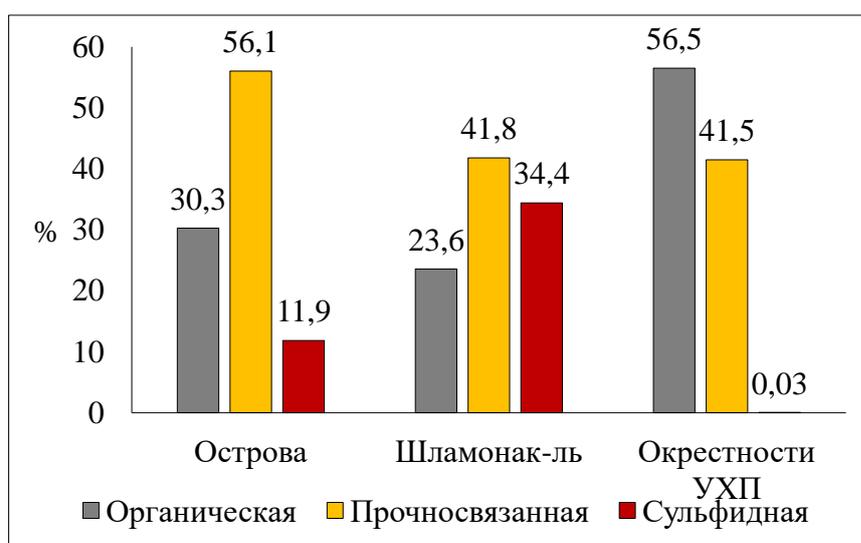


Рисунок 7 – Средние концентрации Hg в трех фракциях почв, процент от суммы фракций

В почвах окрестностей УХП преобладает органическая фракция Hg [32]. Это связано с другими условиями почвообразования, нежели в почвах островов, где «сухие» периоды чередуются с полноводными. Во время полного затопления верхний слой почв островов промывается, что не способствует накоплению органического вещества, активно связывающего Hg в почвах континента.

1.3.4 Заключение

Таким образом, миграция Hg в почвах периодически затопливаемых островов носит сложный и циклический характер, обусловленный водным режимом водохранилища, переотложением загрязненного ртутью донного и почвенного материала, циклическими процессами накопления и вымывания техногенной Hg. Периодические затопления островов не способствуют накоплению в почвах органических форм Hg, играющих важную роль в миграции этого элемента. Преобладающие в почвах труднорастворимые минеральные формы Hg с большой вероятностью унаследованы от основного техногенного источника.

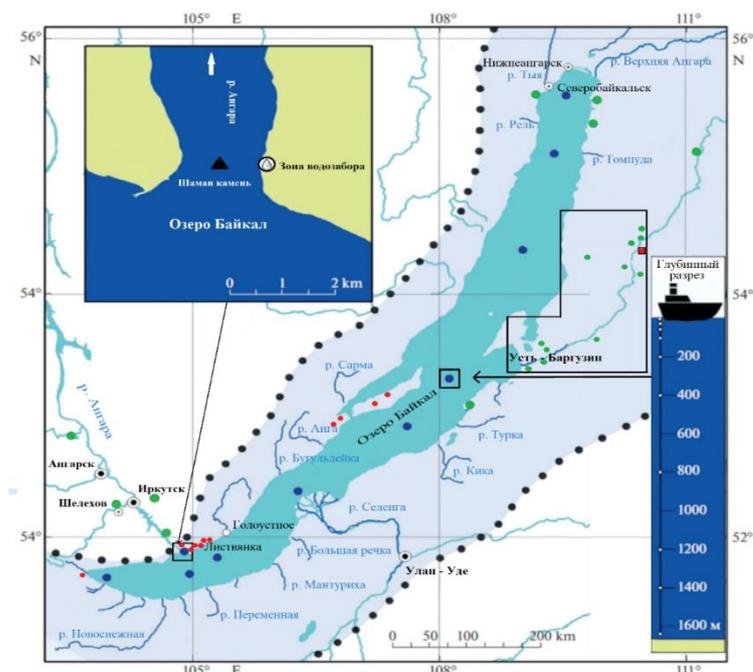
2 Индикаторная роль редких щелочей (Li, Rb, Cs) в воде Байкальской экосистемы

2.1 Введение

Байкальская экосистема (БЭ) расположена в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) [33] и представлена сопряженными в пространстве водными объектами, доступными для изучения: поверхностной и глубинной водой озера Байкал, водой многочисленных притоков, скважин, родников, минеральных источников в береговой зоне и водой единственного стока – р. Ангары (рисунок 8).

Озеро Байкал имеет всемирную известность, охраняется ЮНЕСКО. Уникальность озера заключается в наличии огромных запасов чистой питьевой воды, постоянстве и близости ее химического состава по всему объему озера, большой глубине (1642 м) и протяженности береговой линии озера (более 2000 км), наличию большого количества притоков (более 360), родников, горячих и холодных минеральных источников и единственного стока – р. Ангары.

В Прибайкалье интенсивно проявлена магматическая и вулканическая деятельность [35], ее следы представлены разновозрастными породами от архея до кайнозоя, имеющими состав от основных до кислых и щелочных с различной геохимической и металлогенической специализацией, что, несомненно, оказывает влияние на химический состав притоков Байкала и, соответственно, на воду самого озера Байкал, сохраняя, тем не менее, ее стабильное химическое состояние в последнее столетие [36].



Красным цветом показаны скважины, зеленым – минеральные источники, синий – пробы поверхностной и глубинной воды Байкала. Врезка на карте справа – место нахождения баргузинских термальных источников. Красный квадрат – Гаргинская гравитационная аномалия [34]

Рисунок 8 – Карта-схема отбора проб воды Байкальской экосистемы

С восточной стороны Байкала расположен Ангаро-Витимский гранитоидный батолит, время консолидации гранитного расплава которого оценивается в диапазоне 320–290 млн лет и соответствует глубинным (> 20 км) уровням магматической камеры [37]. Завершающая стадия тектонического экспонирования батолита к земной поверхности происходила от 60 млн лет до настоящего времени, отражая процесс зарождения и развития Байкальской рифтовой системы. Геофизические исследования [34] показали, что большая часть гранитоидного батолита может рассматриваться как единое пластообразное тело с несколькими утолщениями – магмаподводящими каналами или гравитационными аномалиями (Тельмамской и Гаргинской), уходящими на различную глубину – до 10–30 км (рис. 8). В районе Гаргинской аномалии Баргузинской впадины расположены многочисленные горячие минеральные источники (рис. 8, врезка), широко используемые в медицинских целях.

В результате мониторинговых исследований химического состава воды (2006–2022 гг.) БЭ были замечены и установлены особенности распределения некоторых редких элементов, например, ртути и урана [38, 39], что объяснялось приуроченностью Байкала к действующей рифтовой зоне.

Байкал представлен тремя разноглубинными впадинами с максимальной глубиной в центральной впадине (1642 м). Вода вдоль берегов каждой котловины движется против часовой стрелки, отмечается подъем глубинной воды в пелагиальной зоне Байкала и опускание поверхностной воды в литоральных зонах (апвеллинг/даунвеллинг) [40]. Кроме этого, предполагается возможное поступление глубинной воды при землетрясениях и геодинамических подвижках [41, 42], что также способствует постоянному обновлению воды Байкала.

2.2. Материалы и методы

Целью работы являлось сравнение и объяснение возможных причин значимых различий в распределении редких щелочных элементов (Li, Rb, Cs) в разных водных объектах БЭ.

Химический анализ воды БЭ проводился с использованием научного оборудования аккредитованного и сертифицированного аналитического центра «Изотопно-геохимические исследования» Института геохимии СО РАН [43]. Редкие щелочи (Li, Rb, Cs) и другие микроэлементы в воде определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (MS-ICP) (ELEMENT 2, «Finnigan MAT», Германия). Исследования микрокомпонентов Байкальской водной экосистемы продолжалось в мониторинговом режиме ежемесячно в 2006–2022 гг. только в истоке р. Ангары, в остальных объектах отбор проб осуществлялся в теплое время года. Соответственно по различным водным объектам отобрано и проанализировано различное количество проб воды (таблица 4).

В большинстве водных объектов БЭ содержания редких щелочей не превышают их предельно допустимых значений для питьевой воды и воды рыбохозяйственных водоемов. Исключением являются иногда повышенные концентрации лития в некоторых горячих источниках (> 30 мкг/л), что сообщается туристам, отдыхающим и местному населению.

Анализ распределения редких щелочей выявил некоторые особенности и специфику их распределения в различных водных компонентах, что позволило рассмотреть и сравнить все изученные объекты и конкретно горячие минеральные источники Баргузинской впадины Прибайкалья с данными по термальным источникам другого региона – Камчатки [44].

Таблица 4 – Концентрации Li, Rb, Cs (мкг/л) в термальных источниках Камчатки [44] и в водных объектах Байкальской экосистемы

Параметры	Источник и Камчатки [12]	Источники Баргузинской впадины	Притоки Байкала	Приток Усть-Баргузин	Скважины	Байкал	Исток Ангары	Родники
Кол-во проб	14	12	225	9	21	141	193	10
Литий								
Мин.	5.0	5.4	0.09	1.31	0.22	1.14	0.13	1.19
Макс.	760.0	243.0	12.17	3.61	6.43	7.48	3.13	3.45
Медиана	225.0	81.5	1.23	1.80	2.77	1.93	2.08	1.52
Рубидий								
Мин.	2.0	7.6	0.04	0.50	0.05	0.14	0.44	0.03
Макс.	60.0	84.0	3.2	1.74	4.3	1.0	3.08	0.49
Медиана	20.00	20.12	0.58	1.11	0.24	0.56	0.59	0.37
Цезий								
Мин.	0.20	0.81	0.0001	0.0006	0.0001	0.0007	0.0007	0.0001
Макс.	68.00	12.70	0.111	0.0058	0.063	0.018	0.031	0.020
Медиана	7.5	4.04	0.0036	0.0027	0.0013	0.0014	0.0016	0.001

2.3 Результаты и обсуждение

2.3.1 Термальные источники Баргузинской впадины

Термальные источники вокруг Байкала широко используются в бальнеотерапевтической практике и обладают теплоэнергетическим потенциалом. Температура источников – от +20 до +70⁰ С, на глубине – выше +100⁰ С, источники относятся к азотному типу флюидных гидротерм. Анализ опубликованных данных по баргузинским источникам (Алгинский, Кучехирский, Умхейский, Гусихинский, Кулиндинский и др.) [45, 46] и собственной аналитической информации показал, что вода этих источников имеет относительно пониженную минерализацию, но в ней содержится

повышенное содержание фтора (10–12 мг/л) и максимальное количество редких щелочей (таблица) по сравнению с другими изученными водными объектами БЭ.

Обзор опубликованных данных по термальным источникам Прибайкалья, показал, что повышенные содержания редких щелочей в термальных источниках и происхождение самих источников объясняются исследователями разными причинами: 1) взаимодействием водных растворов с гранитной магмой и выщелачиванием из нее редких щелочей [47], 2) формированием флюидных гидротерм в результате воздействия глубинных флюидно-гидротермальных магм вблизи границы Мохо и вынос их на поверхность в наиболее раздробленной части Баргузинской котловины. Е.В. Складов и др. [48] считают, что проникающие из глубоких слоев в Баргузинской впадине флюидно-гидротермальные растворы способны доставлять на поверхность ювенильные растворы, обогащенные летучими, редкими щелочами и рудными элементами из водосодержащих слоев Земли (астеносфера, граница Мохо). Рассказов С.В. и др. [42] по свинцово-изотопным данным предполагают, что вода термальных источников в Баргузинской долине, а также на Среднем и Северном Байкале может содержать компоненты нижнемантийных флюидов.

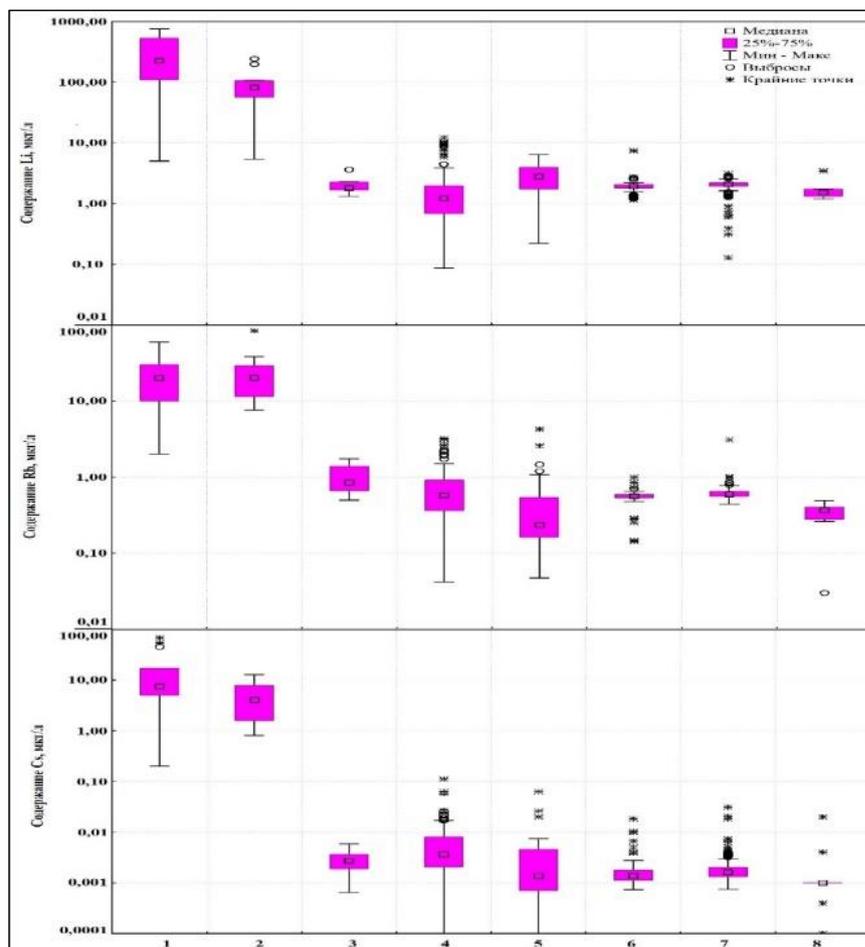
Наши данные по баргузинским источникам были сопоставлены с водой некоторых камчатских источников. Г.И. Арсанова [44] выделяет на Камчатке три группы термальных источников, которые представляют: 1) действующие горячие гидротермы и гейзеры, 2) затухающие вулканогенно-гидротермальные системы и 3) остывающие гидротермы. Источником термальных вод на Камчатке она считает глубинные флюиды (ювенильные, граница Мохо) и полагает, что вода появляется во флюидном состоянии на глубине порядка ~15–7 км при дифференциации глубинного магматического очага.

Анализ воды баргузинских источников показал их сходство с третьей группой гидротерм Камчатки (таблица). Концентрации Li в воде горячих источников Баргузинской впадины достигают максимальных значений и изменяются в пределах 3-х порядков: от 5,4 до 243 мкг/л, Rb – от 7,6 до 84,5 мкг/л, Cs – от 0,81 до 12,7 мкг/л. Полученные максимальные значения по Rb даже несколько выше, чем в «остывающих термах» Камчатки. Медианные концентрации Cs в баргузинских и камчатских термальных источниках находятся в пределах одного порядка значений (4,04 и 7,5 мкг/л).

2.3.2 Притоки Байкала

В многочисленных притоках Байкала, дренирующих разные по составу породы, в том числе, лейкограниты, редкометальные граниты и сиениты, содержания редких

щелочей (Li, Rb, Cs) никогда не достигают максимальных значений, отмеченных в воде баргузинских термальных источников, в том числе и в воде притока р. Усть-Баргузин, рядом с которым расположены источники (таблица 4, рисунок 9).



1 – горячие источники Камчатки, 2 – горячие источники Баргузинской впадины, 3 – устье р. Усть-Баргузин, 4 – устья других притоков Байкала, 5 – вода скважин, 6 – поверхностная и глубинная вода Байкала, 7 – исток р. Ангары, 8 – родники

Рисунок 9 – Распределение редких щелочей в горячих источниках Камчатки [12] и в сопряженных водных объектах Байкальской экосистемы.

В притоках Байкала максимальные концентрации Li могут достигать 10–12 мкг/л. Это преимущественно притоки западного побережья Байкала (реки Рель, Анга, Бугульдейка, Б. Голоустная), где отмечаются выходы палеопротерозойских гранитоидов, содержащих редкометалльную минерализацию. При этом отчетливо видно, что повышение редких щелочей в воде устьев притоков чаще происходит осенью, когда обилие дождей приводит к интенсивному дренажу вмещающих пород и незначительному дополнительному поступлению не только редких щелочей, но и других подвижных элементов, например, Be, F, Th.

В некоторые годы исследований редкие щелочи в относительно повышенных содержаниях отмечались в р. Селенга и в притоках южной части Байкала – реках Утулик, Переемная, Хара-Мурин, Солзан, и, в основном, это касалось концентраций Li и Cs.

Содержания Rb в притоках на порядок меньше Li, но Rb повышен в воде притоков западного побережья Байкала. Значения концентраций Cs в притоках очень низкие, часто на пределе обнаружения и различаются в пределах 3 порядков значений.

Вода устья притока Усть-Баргузин, в долине которого размещаются исследованные термальные источники, содержит средние концентрации редких щелочей и не выделяется среди других притоков Байкала (таблица 4), что вызывает удивление. Это может свидетельствовать о том, что процессы, происходящие после попадания (стекания) воды из термальных источников в реку Усть-Баргузин, приводят к быстрому перемешиванию воды и осаждению многих элементов в прибрежных осадках реки на геохимических барьерах.

2.3.3 Вода из скважин в береговой зоне

В воде из скважин (глубина от 8 до 70 м) вокруг Байкала разброс данных по концентрациям Li меньше, чем в притоках и находится в пределах одного порядка значений. Однако его медианное значение больше, чем в притоках Байкала. Аналогично изменяются концентрации Rb и Cs, но их медианные значения также меньше (таблица 4). Повышенные значения редких щелочей (Li – 5-6 мкг/л, Rb – до 4,3 мкг/л, Cs – до 0,063 мкг/л) отмечены в скважинах на ю-в берегу Байкала в пос. Листвянка и на острове Ольхон, где вмещающими породами являются древние субщелочные гранитоиды и сиениты, что может свидетельствовать о том, что подземная вода в береговой зоне Байкала незначительно, но может насыщаться редкими щелочами за счет дренирования пород, окружающих скважины, с относительно повышенными концентрациями этих элементов.

2.3.4 Поверхностная и глубинная вода Байкала

Анализ редких щелочей в поверхностной и глубинной воде Байкала выявил отсутствие резких различий в их концентрациях, что нашло отражение в удивительно компактных блок-диаграммах (большинство значений находится в пределах 25%-75%) их распределения (рисунки 9, 10).

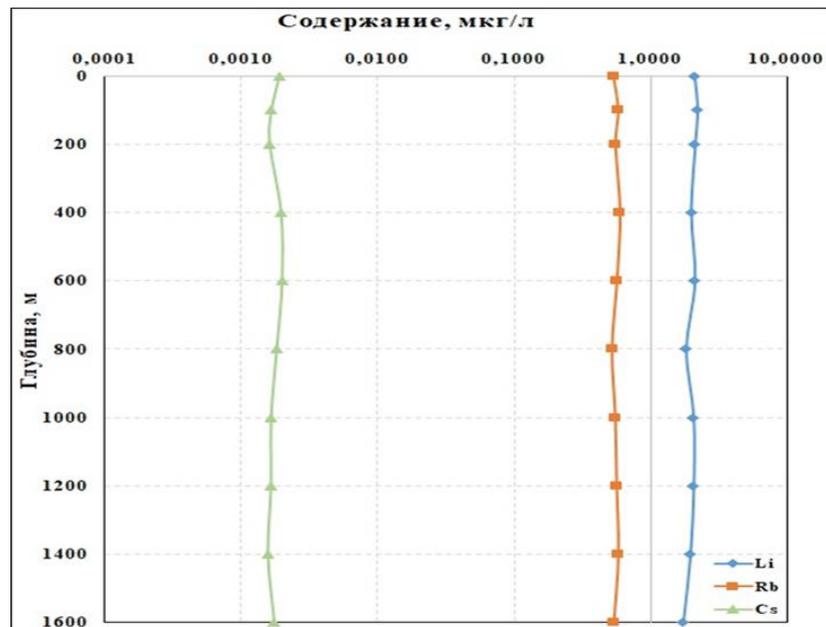


Рисунок 10 – Распределение Li, Rb, Cs на поверхности и в глубинной воде Байкала осенью 2022 г.

Вода Байкала в литоральных зонах специально не отбиралась на анализ, т.к. влияние на нее прибрежных поселков известно. Однако за счет особых горизонтальных и вертикальных течений в Байкале, за счет нахождения в устьях рек геохимических барьеров происходящие изменения быстро нивелируются.

Изменение концентраций Li в воде от поверхности на глубину 1640 м менее стабильное, так как отбор проб воды происходит быстро, и особенности ее подъема к поверхности в самой глубокой котловине Байкала показывают некоторые незначительные вариации изменения значений концентраций, в пределах 1,5–2 раза (рисунок 10) за счет апвеллинга глубинной воды. Ранее в это же время нами также отмечено повышение в воде в этот период концентраций урана [39], но уже более существенное – почти в 10 раз. Сопоставление полученной в разные годы исследований (2007–2022 гг.) информации показало, что такие изменения могут быть обусловлены сейсмическими подвижками в Байкальской рифтовой зоне, особенно заметными в 2020 и 2022 гг. (рисунок 11).

Li, Rb и Cs в байкальской воде имеют более низкие концентрации и, соответственно, их вариабельность в глубинной воде очень не значительна.

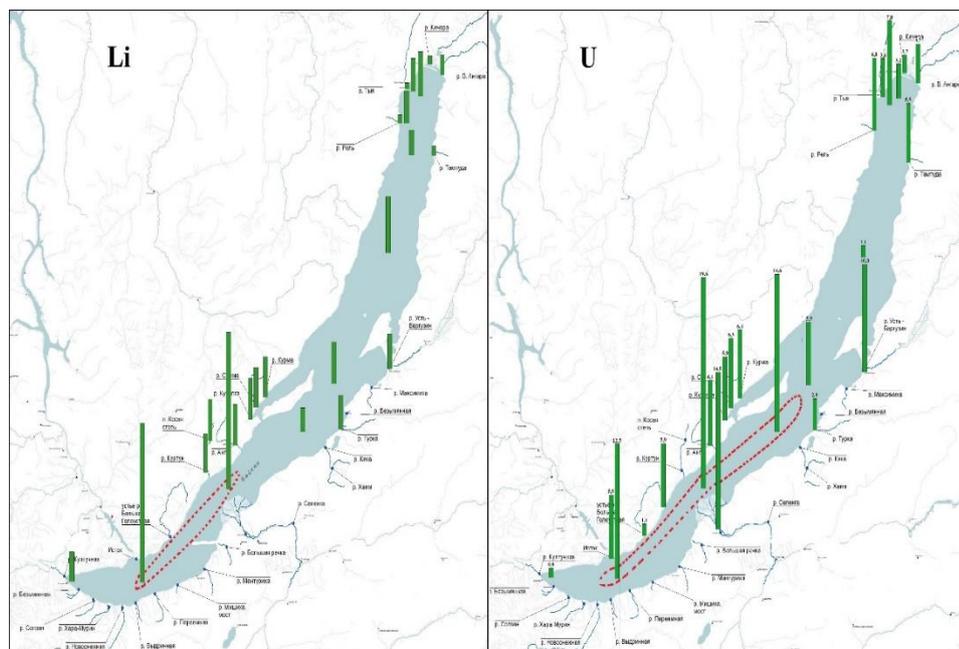


Рисунок 11 – Распределение лития (мкг/л) и урана (мкг/л) в поверхностной воде Байкала и в устьях притоков весной 2020 г. Красным пунктиром выделены повышенные содержания элементов в байкальской воде (пояснения в тексте)

Таким образом, небольшое повышение содержаний редких щелочей весной и осенью в 2020 и 2022 гг. в поверхностной воде в южной пелагиальной части Байкала, вполне возможно, коррелируется с происходящими землетрясениями в это время года (рисунок 11).

2.3.5 Вода истока Ангары (сток Байкала)

Вода в истоке Ангары не замерзает зимой, поэтому многолетний ежемесячный мониторинг воды позволил получить значительное количество данных по концентрациям Li, Rb, Cs (193 пробы) (таблица 4) с 2006 по 2022 гг. Анализ воды показал, что Li изменяется в пределах одного порядка – 0,13–3,13 мкг/л. Для весны 2022 г. характерно максимальное значение Li – 3,13 мкг/л (рисунок 12). Этот год характеризуется повышенным количеством землетрясений именно в южной части БЭ.

По всем редким щелочам в воде истока Ангары получены очень узкие и компактные поля распределения данных (рисунки 9, 12). Медианы значений концентраций редких щелочей в воде истока фактически совпадают с аналогичными данными по воде Байкала, что подтверждает – вода Ангары отражает состав воды Байкала. Однако количество проб с минимальными концентрациями Li в воде истока больше, чем в воде Байкала (рисунок 10). Концентрации Li, Rb и Cs в повышенных количествах единичны.

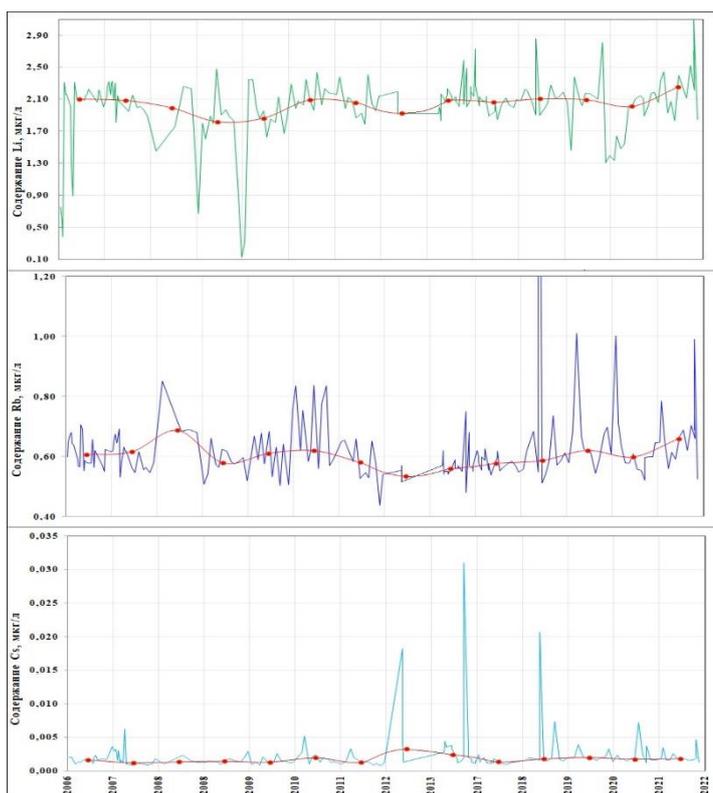


Рисунок 12 – Распределение ежемесячных концентраций Li, Rb, Cs в воде истока р. Ангары в 2006-2022 гг. Красные точки – годовые медианные значения элементов. В 2014-2016 гг. – перерыв в опробовании

2.3.6 Вода родников в береговой зоне Байкала

Вода родников содержит минимальные концентрации редких щелочей по сравнению с другими водными объектами БЭ и близка к воде скважин (рисунок 9, таблица 4). Максимум Li отмечен в роднике вблизи устья р. Усть-Баргузин – 3,45 мкг/л. Концентрации Li в воде других родников близки, несмотря на разный состав дренируемых пород. Значения Rb в воде родников изменяются в пределах одного порядка. Содержания Cs повышено в районе родника возле устья р. Усть-Баргузин. В остальных родниках его концентрации низкие.

Таким образом, выполненный сравнительный анализ распределения концентраций редких щелочей (Li, Rb, Cs) в воде сопряженных компонентов Байкальской экосистемы показал их индикаторную роль и значимые различия в концентрациях. По всем редким щелочам в воде истока Ангары получены очень узкие и компактные поля распределения данных (рисунок 9). Медианы значений концентраций редких щелочей в воде истока Ангары фактически совпадают с аналогичными данными по воде Байкала.

Отсутствие в окружающих гранитоидах Ангаро-Витимского батолита редкометалльных гранитов, а также субвулканических литий-фтористых пород свидетельствует о низких и средних концентрациях редких щелочей в гранитоидной магме батолита, что установлено ранее [49].

С помощью физико-химического моделирования (программа «Селектор») [50] было продемонстрировано, что современные азотные термы не могут сформироваться в гранитоидах с низкими и средними концентрациями редких щелочей и фтора.

Установленная близость значений концентраций редких щелочей в баргузинских горячих источниках и некоторых термальных источниках Камчатки подчеркивает их индикаторную роль в генезисе водных объектов. Геохимические отличия водных объектов Прибайкалья могут свидетельствовать о длительном воздействии глубинного флюидно-гидротермального источника, обусловленного, возможно, Гаргинской гравитационной аномалией в районе действующих термальных источников, а также постоянными сейсמודинамическими подвижками в Байкальской рифтовой зоне, поддерживающими их функционирование. Это подтверждается наличием в водной толще западного берега Байкала вдоль Северобайкальского разлома следов действующих здесь ранее грязевых вулканов [51].

Следует признать, что повышенная сейсмичность, тектонические подвижки в Байкальской рифтовой зоне, отмеченные особенности течения воды в Байкале способствуют глубинному (ювенильному) обновлению воды Байкала и поддерживают ее постоянный геохимический состав и чистоту. Кроме этого, наличие в береговой литоральной зоне Байкала геохимических барьеров в устьях рек способствует существенному осаждению многих элементов, поступающих из термальных источников и притоков Байкала.

2.4 Заключение

Выполненный анализ распределения редких щелочей (Li, Rb, Cs) в сопряженных в пространстве водных объектах Байкальской показал и сходство, и значимые различия между концентрациями элементов в различных водных объектах.

Повышение концентраций редких щелочей в поверхностной воде Байкала иногда совпадает с повышением концентраций урана, но уже более существенным – почти в 10 раз. Такие изменения могут быть обусловлены сейсмическими подвижками в Байкальской рифтовой зоне, особенно заметными в 2020 и 2022 гг.

Установленные заметные накопления редких щелочей в горячих источниках в условиях гидротермального рифтогенеза свидетельствует о взаимосвязи разломной тектоники и формировании термальных вод в Байкальской экосистеме. Показана близость значений концентраций редких щелочей в баргузинских горячих источниках с источниками Камчатки, что подчеркивает их индикаторную роль и близкие генетические условия происхождения, обусловленные землетрясениями и геодинамическими подвижками.

Вода баргузинских термальных источников содержит максимальные концентрации редких щелочей, но не оказывает значимого влияния на воду Байкала в связи с его природным самоочищением и глубинным обновлением воды.

Концентрации редких щелочей в других водных объектах Байкальской экосистемы имеют близкие средние и медианные значения и особенно близкие значения отмечены в воде Байкала (поверхностной и глубинной) и в его единственном стоке – р. Ангаре, что свидетельствует о их единой природе образования.

3 Исследование динамики ПХБ и ХОП в почвенных разрезах из антропогенно-измененных районов Прибайкалья

3.1 Введение

Полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды, включая p,p' -дихлордифенилтрихлорэтан и его метаболиты и α - и γ - изомеры гексахлорциклогексана – представители группы биоаккумулятивных и персистентных токсикантов. Физико-химические свойства ПХБ и ХОП способствуют межсредовому перераспределению этих соединений в абиотических и биотических компонентах наземных экосистем [52]. Главной депонирующей средой ПХБ и ХОП в наземных экосистемах является почва, куда они поступают в результате сухого и влажного осаждения, а также с отмершими частями растений [53]. В толще почвы ПХБ и ХОП способны мигрировать в глубокие слои почвы и/или испаряться обратно в атмосферу в составе воздушной и водной фаз, переноситься живыми организмами и т.п. [52]. Данный процесс является составной частью глобального фракционирования ПХБ и ХОП с трансграничным переносом серий циклов испарения и осаждения в направлении от регионов с теплым климатом в полярные области [54] и он в значительной мере подвержен влиянию климатических факторов (особенно температур атмосферного воздуха и почв). Изменения климата могут привести как к интенсификации, так и замедлению процессов миграции ПХБ и ХОП между почвой и воздухом, что приводит, соответственно, к усилению нагрузки на экосистемы или полярных областей,

или районов расположения источников токсикантов. Таким образом, изучение миграции в почвах важно для понимания общей картины межсредовой миграции таких токсикантов как ПХБ и ХОП в условиях меняющегося климата. В настоящее время выполнено ограниченное количество исследований, в которых фактически измерялось вертикальное распределение стойких органических загрязнителей и проводились они, в основном, в природных или сельскохозяйственных почвах [55, 56]. Известна взаимосвязь в распределении ПХБ и ХОП с органическим углеродом (C_{org}) почв [57]. Однако недостаточно понятным остается влияние растительных остатков и корневой системы растений на распределение ПХБ и ХОП в почвах.

Цель настоящей работы: изучить особенности вертикального распределения ПХБ и ХОП в почвах антропогенно-измененных районов на примере лесных экосистем рекреационных зон городов Иркутск и Усолье-Сибирское.

Задачи:

- изучить вертикальное распределение ХОП и ПХБ в почвах и в растительных остатках (корни и отмершие части растений) в антропогенно-измененном районе;
- определить изменения качественного состава ПХБ и ХОП по глубине в почвах;
- изучить взаимосвязь распределения ПХБ и ХОП с органическим веществом по глубине в почвах.

3.2 Материалы и методы

Для исследований была выбрана почвы лиственных и хвойных лесных насаждений конца 1960х гг. в рекреационной зоне гор. Иркутска и почвы природного хвойного леса на территории бывшего санатория в пригороде гор. Усолье-Сибирское. Данные территории находятся в зоне влияния промышленных предприятий городов Иркутско-Черемховского промышленного узла, включая бывший комплекс хлорорганического синтеза Усольехимпром, с прилегающими сельскохозяйственными угодьями. Отбор проб проведен в августе после прекращения сезонного роста вегетативных органов растений, но до начала осеннего опада.

Станции отбора проб:

- (1) рекреационная зона гор. Иркутска - лиственный лес, с преобладанием березы и осины, ($52^{\circ}14'38,4''$ с.ш. и $104^{\circ}15'45,6''$ в.д.)
- (2) рекреационная зона гор. Иркутска - сосновый лес ($52^{\circ}14'38,0''$ с.ш. и $104^{\circ}15'45,0''$ в.д.).

(3) территория бывшего санатория в пригороде гор. Усолье-Сибирское – сосновый лес (52°53'1.05" с.ш. и 103°38'46.80" в.д.).

На всех станциях отмечались следы прошлых пожаров, причем в Усольском районе пожар прошел в предыдущий к отбору проб год (остались обгоревшие растительные остатки в верхнем слое почвы наряду с не обгоревшим опадом прошлого года) и его проявления были сильнее выражены (стволы деревьев обгорели на большую высоту), чем в Иркутске, где пожар прошел в более давний период.

На каждой станции отобраны опад, почва по слоям до глубины 20 см. (рисунок 13). Пробы упаковывали в алюминиевую фольгу и до анализа хранились при температуре – 20°С.



(1)

(2)

(3)

(1) – лиственный лес (гор. Иркутск), (2) – хвойный лес (гор. Иркутск), (3) – хвойный лес (гор. Усолье-Сибирское)

Рисунок 13 – Отбор проб почв

Анализ проб проводился в ИГХ СО РАН. Опад измельчался 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). Почвы измельчались перед сушкой с помощью металлического шпателя. Пробы опада и почв были высушены при комнатной температуре до постоянного веса. Почвы просеяны, чтобы получить фракцию < 2 мм, а из оставшейся фракции отобраны растительные остатки, включающие корни и отмершие части растений. Дальнейшая пробоподготовка образцов включала экстракцию в аппаратах Сокслетта смесью ацетон:гексан (1:1) в течении 8 ч; очистку с использованием гельпроникающей хроматографии (Bio-Beads S-X3) и Al-Si-колонки; упаривание в токе азота до 0,1 мл. В каждой пробе были определены 42 конгенера ПХБ, в т.ч. индикаторные

конгенеры ПХБ (№№ ИЮПАК 28, 52, 101, 138, 153, 180), а также хлорорганические пестициды (ХОП), включая *p,p'*-ДДТ, *p,p'*-дихлордифенилдихлорэтан, *p,p'*-дихлордифенилдихлорэтилен, α -ГХЦГ и γ -ГХЦГ. Анализ производился с использованием газового хроматографа HP 5890 series II GC, совмещенного с детектором электронного захвата и хромато-масс-спектрометра Хроматэк Кристалл 5000 оснащенных капиллярными колонками DB-5, 0,25 мкм длиной 60 м (J&W Scientific).

Качество анализа проверялось с помощью лабораторных бланков в каждой серии проб и с использованием сертифицированных референтных материалов CRM814 и CRM962.

Содержание органического углерода (C_{org}) в почвах определялось персульфатным окислением [58].

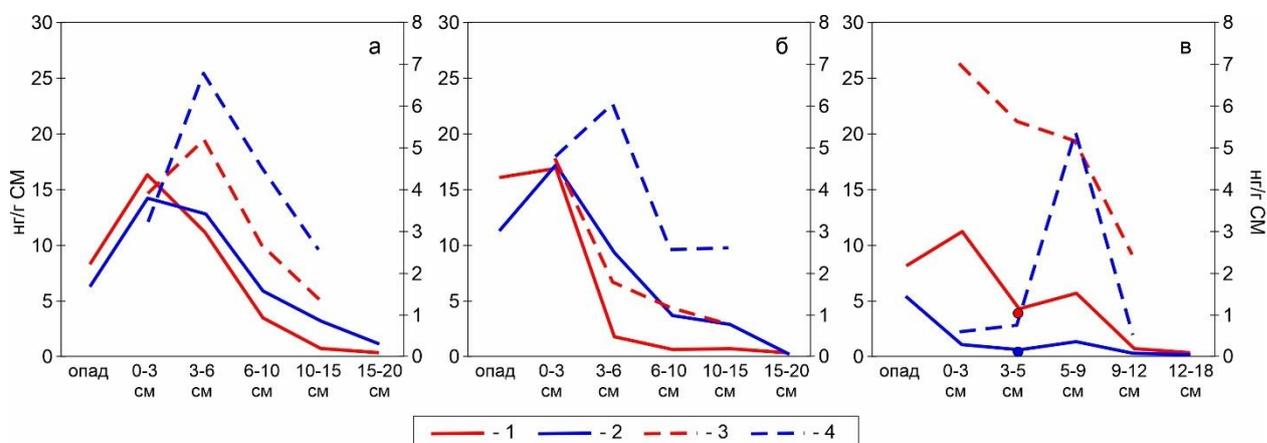
В работе использованы данные содержания ПХБ и ХОП в надземных органах растений на тех же станциях в Иркутске, представленные ранее в отчете ИГХ СО РАН за 2023 г., а также не опубликованные ранее данные по станции в г. Усолье-Сибирское.

3.3 Результаты и обсуждения

Характер распределения сумм ХОП и ПХБ в почвах по вертикали в почвах схож на станциях 1 и 2 в Иркутске (рисунок 14). Наибольшие суммы ПХБ и ХОП найдены в слое – 0-3 см на всех станциях. В лиственном лесу в Иркутске концентрации в следующем слое 3-6 см снижаются на 10-30 %, а затем уже в 2-4,5 раза по сравнению с вышележащим слоем. В хвойном лесу в Иркутске концентрации ПХБ снижаются в 9 раз уже на глубине 3–6 см. В лесной подстилке в лиственном лесу содержание ПХБ и ХОП ниже, чем в поверхностных слоях почв, в 2–4 раза, а в хвойном – или примерно одинаковые (для суммы ПХБ), или несколько ниже (в 1,5 раза для суммы ХОП). Такая же картина распределения полиароматических углеводородов, ПХБ и ХОП по глубине была получена в сельскохозяйственных и природных почвах в Европе [55, 56], Тибетского нагорья [59] и в дельте реки Янцзы [60].

В свою очередь в подстилке лиственного леса содержание сумм ХОП и ПХБ ниже, чем в листве доминирующих видов деревьев в 1,4-2 и 3-4,8 раз, соответственно, что вероятно связано с испарением в атмосферный воздух, а также деградацией под действием ультрафиолета и почвенной микрофлоры. В хвойном лесу наоборот, в подстилке концентрации ПХБ и ХОП выше, чем в хвое и коре сосны в 1,6-2 и 1,6-1,8 раз, соответственно. Вероятно, это связано с разной скоростью деструкции компонентов растительного опада и подстилки. Скорость разложения в лесной подстилке листьев

березы, осины и др. деревьев составляет 30-50% в год, хвой – менее 30% [61]. Кроме того, смолистые вещества хвойных растений способствуют удержанию органических токсикантов от возгонки из лесной подстилки.



1 – сумма ПХБ в почве, 2 – сумма ХОП в почве, 3 – сумма ПХБ в растительных остатках, 4 – сумма ХОП в растительных остатках, а, б и в – результаты по станциям 1, 2 и 3 соответственно

Рисунок 14 – Распределение ПХБ и ХОП в лесной подстилке, почве и растительных остатках по вертикали на станциях 1 (а), 2 (б) и 3 (в) (нг/г сухой массы (СМ)) ()

В почве 3 станции в хвойном лесу в Усолье-Сибирском распределение ПХБ и ХОП по вертикали (рисунок 14в), несколько отличается от найденного на станциях 1 и 2. Общая тенденция к снижению концентраций по глубине также наблюдается, хотя и в меньшей степени. Суммарные концентрации ПХБ в поверхностном слое почвы 3 станции ниже, чем на 1 и 2, несмотря на близость к источнику атмосферных эмиссий ПХБ на территории промплощадки Усольехимпром и найденные ранее более высокие концентрации в почвах районов прилегающих к промплощадке Усольехимпрома [62]. Это может быть обусловлено влиянием прошлогоднего пожара, в результате которого произошла возгонка части токсикантов с поверхности почвы, что подтверждается и более высокими концентрациями в глубже лежащих слоях почв на станции 3 по сравнению с 1 и 2 станциями. Снижение концентрации полихлорированных дибензо-пара-диоксинов и дибензофуранов в почве после весеннего пала была ранее показана в Прибайкалье [63].

В 2024 г. впервые были проведены определения ПХБ и ХОП в растительных остатках, которые обычно отбрасываются при подготовке проб почвы к химическому анализу согласно [64]. На 1 и 2 станциях в Иркутске в поверхностном слое почвы (0–3 см) концентрации ПХБ и ХОП на сухую массу во фракции до 2 мм и в растительных остатках

были примерно одинаковыми. В более глубоких слоях почвы концентрации ПХБ и ХОП в растительных остатках больше, чем во фракции < 2 мм в 1,8–5,7 и 2–3,3 раз, соответственно. На станции 3 в Усолье-Сибирском разница между концентрациями ПХБ и ХОП во фракции < 2 мм и в растительных остатках еще выше: 2,5–13 и 1,8–15, соответственно. Причем эта разница увеличивается с глубиной на всех станциях и связана с содержанием $C_{\text{орг}}$ в почве (коэффициент корреляции (–0.7) – (–0.99) – на станциях 1 и 2 и (–0,35) – (–0,55) – на станции 3). Заметное накопление хлорорганических соединений корнями растений показано только для очень ограниченного количества видов семейства *Cucurbitaceae* [65]. Одним из механизмов повышения концентраций ПХБ и ХОП в растительных остатках может быть следующее. Так как растительные остатки при подготовке к анализу не промывались водой, то, соответственно, содержали микрочастицы почвы, прилипшие на корни растений. Для формирования полезных симбиотических связей с другими организмами почвенной биоты, питания минеральными веществами и др., растения выделяют корневой экссудат [66]. Здесь также активно развиваются ризосферные микроорганизмы. Это приводит к повышению содержания органического вещества в прикорневой почве, что и способствует накоплению гидрофобных органических соединений в ризосферной зоне. С глубиной почвы количество корней растений и содержание органического вещества в почве уменьшается, что и приводит к перераспределению органических токсикантов в ризосферу и найденному увеличению разницы между содержанием токсикантов во фракции < 2 мм и растительных остатках. Полученные результаты по содержанию ПХБ и ХОП в растительных остатках необходимо учитывать при мониторинговых исследованиях и при изучении судьбы органических токсикантов в наземных экосистемах.

В слое 3–5 см на станции 3 исследовано содержание ПХБ и ХОП во фракции > 2 мм, представленной мелкими камешками до 5 мм. Полученные концентрации соответствовали найденным во фракции < 2 мм (красная (ПХБ) и синяя (ХОП) точки на рисунке 14в).

Качественный состав ХОП и ПХБ также изменяется по глубине почвы. Например, соотношение метаболитов ДДТ и его исходной формы *p,p'*-ДДТ (рисунок 15) увеличивается от 0,63 в листья, листовой подстилке и поверхностном слое почвы до 2,04 на глубине 15–20 см. Увеличение величины отношения (ДДД+ДДЭ)/ДДТ говорит о деградации этого пестицида под действием почвенной микрофлоры [67], что подтверждается многократным снижением суммарного содержания ДДТ и его метаболитов.

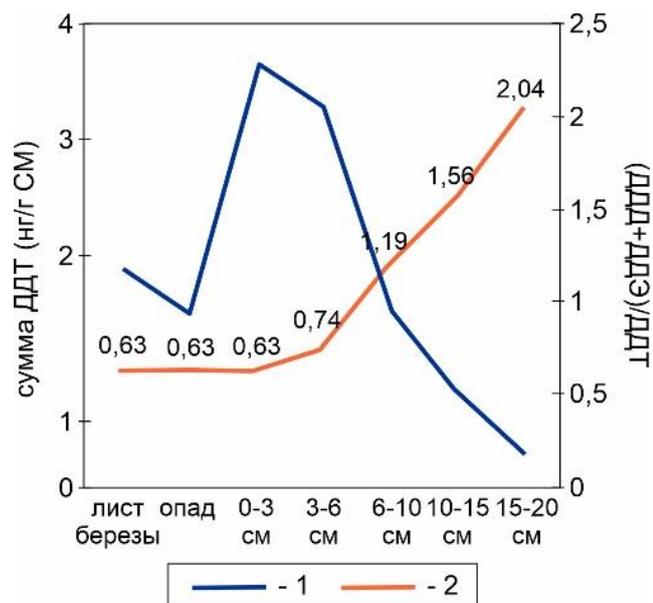


Рисунок 15 – Изменение суммы ДДТ и его метаболитов (1) и отношения ((ДДД+ДДЭ)/ДДТ) (2) по глубине в почве лиственного леса в г. Иркутск

Относительный гомологический состав ПХБ также изменяется как во фракции до 2 мм, так в растительных остатках (рисунок 16).

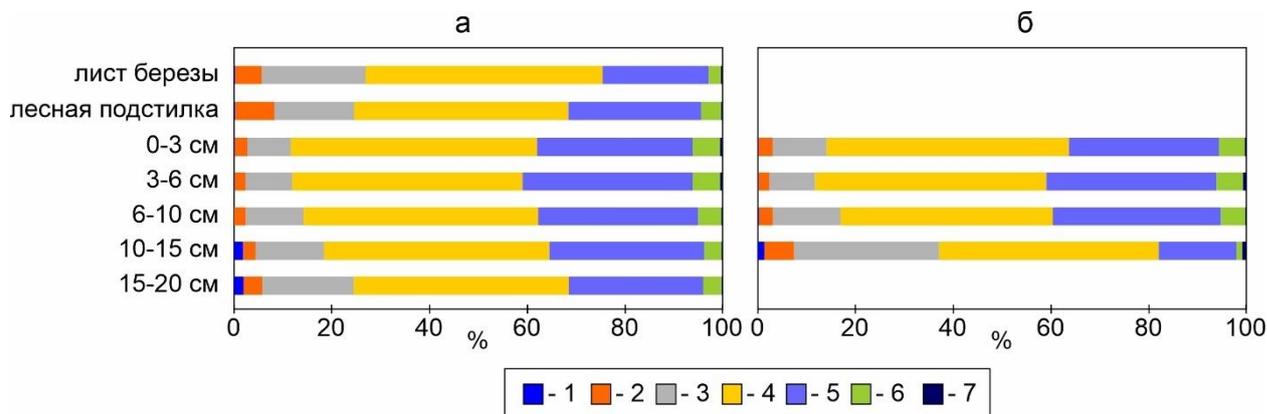


Рисунок 16 – Изменение относительного состава гомологов ПХБ в листьях березы, лесной подстилке и почве (фракция до 2 мм) (а) и в растительных остатках (б) в почве по глубине в лиственном лесу в г. Иркутск (1 – диХБ, 2 – триХБ, 3 – тетраХБ, 4 – пентаХБ, 5 – гексаХБ, 6 – гептаХБ, 7 – октаХБ)

Так, в лиственном лесу в Иркутске относительный состав ПХБ в лесной подстилке близок к таковому в листьях доминирующих видов деревьев. В поверхностном слое почвы доля три- и тетрахлорбифенилов (триХБ и тетраХБ) снижается с 8,2 и 16% в подстилке до 2,7 и 8,8% в почве 0–3 см, а затем постепенно увеличивается до 3,8 и 19% на глубине 15–20 см, соответственно. И наоборот, доля пентаХБ и гексаХБ несколько снижается от 50 и 32% на глубине 0–3 см до 44 и 27% – на глубине 15-20 см,

соответственно. Такое распределение обусловлено большей способностью низкохлорированных гомологов ПХБ перемещаться в составе водной и воздушной фазы в толще почвы относительно высокохлорированных.

Найдена также зависимость содержания низкохлорированных конгенов и гомологов ПХБ и ГХЦГ от содержания органического вещества почвы (Таблица 5).

Таблица 5 – Статистически достоверные величины корреляции $S_{орг}$ и отдельных ХОП и ПХБ в почвах (* – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$, *** – $p < 0.001$)

	α -ГХЦГ	γ -ГХЦГ	ДДД	ПХБ-28	ПХБ-52	диХБ		триХБ	тетраХБ
Ст. 1	0,82*	0.83*	0.84*	0,96**	–	–		0.90*	–
Ст. 2	0.99***	0.99***	–	0,98***	0,91*	0,99*		0,99***	0,94**
Ст. 3	0.98*	0.98*	0.99*	0.97*	0.98*	–		–	0.81*

Таким образом, в 2024 г. изучены особенности вертикального распределения ПХБ и ХОП в почвах антропогенно-измененных районов на примере искусственно созданных в конце 1960 гг. лесных экосистем рекреационных зон г. Иркутск и природной лесной экосистемы в рекреационной зоне гор. Усолье-Сибирское. Показано, что основное количество ПХБ и ХОП накапливается в почвах до глубины 5–6 см и зависит от содержания органического вещества в почвах. Найдено, что в растительных остатках (корнях и отмерших органов растений) концентрация ПХБ и ХОП выше, чем во фракции до 2 мм почвы и разница между этими фракциями увеличивается с глубиной отбора. На изменение качественного состава ПХБ и ХОП в почве по глубине оказывают влияние метаболизм почвенными микроорганизмами (увеличивается доля метаболитов ДДТ по сравнению с исходным соединением) и физико-химические свойства самих соединений (миграция низкохлорированных конгенов ПХБ).

4 Эволюция озерных экосистем Восточной Сибири в голоцене

4.1 Природная среда высокогорного пояса Окинского плато в голоцене

4.1.1 Введение

Донные отложения сравнительно небольших озер в мире рассматриваются как ценнейшие природные архивы. Они позволяют изучать долгосрочные природные изменения и влияние деятельности человека на озера и их водосборные бассейны.

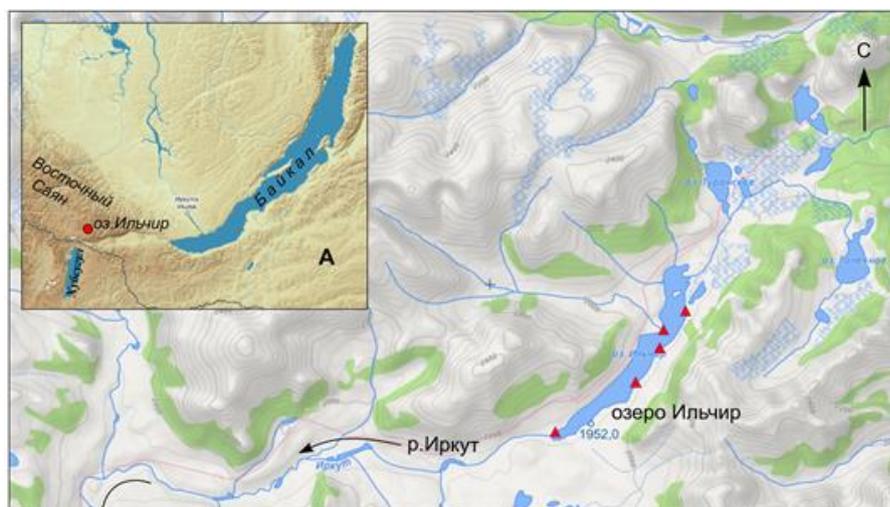
Большинство исследований, проведенных для донных отложений пресноводных озер Окинского плато, были сосредоточены на интерпретации результатов палинологических, литологических, геоморфологических, петро- и палеомагнитных исследований [68–75]. Однако такой доступный вид анализа донных отложений озер как РФА является быстрым и недорогим инструментом для количественного определения литогенных элементов, таких как Ti, Zr, Rb, Sr, Fe, Mn и др., которые могут дать представление о причинах, времени и масштабах изменений в режиме выветривания водосбора, в окислительно-восстановительных условиях (соотношение Mn/Fe). Среди долгосрочных палеоэкологических изменений, отраженных в геохимии озерных отложений, большой интерес представляет влияние климата. Климатические флуктуации влияют на перенос литогенных элементов из водосбора в озеро: так, в теплые периоды химическое выветривание может усиливаться, в то время как более плотный растительный покров и более стабильные почвы могут снижать физическое выветривание например [76]. Донные отложения оз. Ильчир уже позволили реконструировать изменения растительности и климата Ильчирского грабена (Окинское плато) за последние 11 тыс. лет [68, 73]. Однако для реконструкции новой, дополненной палеоэкологической модели природной среды и климата Окинского плато методом РФА был изучен новый керн из донных отложений оз. Ильчир. Новые данные улучшат наше понимание динамики пресноводных озер – источников воды для населения подгорно-равнинных территорий Иркутской области.

4.1.2 Район исследования

Район исследования приурочен к Ильчирскому грабену на границе Окинского плато и Тункинских Гольцов. Фундамент озерного водосбора слагают докайнозойские метаморфические и неогеновые вулканические породы, частично перекрытые ледниковыми отложениями позднего плейстоцена [68]. Климат района умеренно-холодный, континентальный. Средняя температура июля, января и года составляет +11 °С, –26 °С, –6,6 °С, соответственно. Минимальные температуры часто опускаются ниже 40 °С, а максимальные летние температуры могут превышать 25 °С. Среднегодовое количество осадков составляет около 400 мм, из которых только 10% выпадает в холодное время года с октября по март. С октября по июнь озеро покрыто льдом [77]. В озеро впадают несколько постоянных водотоков (рисунок 17), и из него берет начало р. Иркут.

В растительности склонов котловины озера Ильчир преобладают травяно-мохово-кустарниковые тундры с подлеском из кустарниковой березки, наземным покровом из лишайников рода *Cladonia* и сфагновых мхов рода *Sphagnum*. Участки мохово-

лишайниковой тундры чередуются с пятнами осоково-злаковых и кобрезиевых травяных лугов в понижениях рельефа. Выше по склонам прерывистый пояс формируют лиственничные редколесья (рисунок 18).



А – общее положение озера в горах Восточного Саяна; Б – котловина озера с впадающими в него безымянными постоянными водотоками. Красные треугольники – точки отбора поверхностных проб

Рисунок 17 – Местонахождение озера Ильчир



Рисунок 18 – Вид на оз. Ильчир и его котловину. Темная полоса на переднем плане – лиственничное редколесье. Фото Безруковой Е.В.

4.1.3 Материалы и методы

Длина керн Ильчир-13 составила 132 см. Возраст отложений определен методом радиоуглеродного датирования с применением ускорительной масс-спектрометрии (УМС ^{14}C) в Познаньской радиоуглеродной лаборатории (Польша) и в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) СО РАН. Всего получено пять дат. Для оценки резервуарного эффекта (РЭ) применена полиномиальная регрессия по значениям ^{14}C датировок в стратиграфическом порядке с использованием «метода перехвата» [78]. Значение в 1970 лет в точке пересечения осей было принято за величину РЭ. Затем даты, скорректированные на значение РЭ, были откалиброваны с использованием программы IntCal20 [79]. Возрастная модель построена с применением пакета Bacon в статистической среде R [80]. Далее в тексте все значения возраста приводятся в калиброванном летоисчислении (лет назад до 2000 года = л.н.).

Для рентгено-флуоресцентного анализа был отобран каждый сантиметр отложений в керне. Образцы были подготовлены для анализа согласно опубликованной методике, позволяющей формировать плавленные стекла диаметром 10-12 мм [81]. Измерения рентгеновских эмиссионных спектров выполнены на волнодисперсионном XRF-спектрометре S8 Tiger (Bruker AXS, Германия). Калибровочные кривые построены по сертифицированным стандартным образцам осадочных пород.

Определение минерального состава проводили на рентгеновском порошковом дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker). Образцы для измерения готовили набивкой и выравниваем порошка в кювете. Относительное стандартное отклонение (RSD) подготовки пробы и измерения интенсивности главных пиков кварца и полевого шпата, оцененное по результатам измерения шести приготовленных образцов смеси кварца и микроклина, составило 5.2 % при содержаниях в диапазоне 25–75 мас. %. Количественный фазовый анализ по методу Ритвельда выполняли с помощью программы TOPAS 4 пакета DIFFRACplus дифрактометра D8 ADVANCE [82, 83] с базой данных порошковой дифрактометрии PDF-2 [84] и по варианту метода ссылочных интенсивностей (RIR) с помощью программного пакета [85], разработанного в лаборатории рентгеновских методов анализа Сибирского федерального университета.

Содержание биогенного кремнезема ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$) определено в каждом сантиметре отложений по методу [86]. Кроме того, для каждого сантиметра рассчитаны влажность (Wt) и сухая объемная плотность (DBD) [87].

4.1.4 Результаты

Вскрытая керном Ильчир-13 толща донных отложений озера состоит из ритмичного чередования тонких слоев светло-бурого – светло-коричневого - темно-коричневого цвета, толщина которых изменяется от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров (рисунок 19). Ранее проведенный анализ литологического состава отложений методом смен-слайдов показал преобладание в них частиц глинистой размерности (61%, в среднем), которым сопутствует илистая фракция (27%, в среднем) и песчаная, не превышающая 10%.

Применение CONISS позволило выделить четыре интервала изменения естественной природной среды в бассейне озер (Рисунок 19, 1–4). Для отложений, сформированных в интервале 4 (6600–5800 л.н.) и состоящих, главным образом, их полевых шпатов, кварца и слюды, характерны самая высокая средняя скорость аккумуляции (Рисунок 19). Значения плотности, Ca/Ti, K/Al, Ti/Al высокие, но с тенденцией снижения к верхней границе интервала.

В интервале 3 (5800–4300 л.н.) скорости аккумуляции отложений оставались высокими, а в их минеральном составе несколько снизилась доля полевых шпатов и кварца, повысилась доля слюды (хлорит + мусковит). Значения части геохимических показателей (Ca/Ti, K/Al) в этом интервале несколько снижаются, а для Ti/Al – повышаются. Также снижаются значения плотности отложений при одновременном повышении содержания в них общего органического вещества (рисунок 19, потери при прокаливании = ППП 550 °С) и биогенного кремнезема SiO₂био.

Для отложений, аккумуляция которых происходила в интервале 2 (4200–700 л.н.), характерно небольшое снижение доли слюды, кварца, повышение – полевых шпатов. Отношения Ca/Ti, демонстрируют немного повышенные значения, в то время как K/Al, Ti/Al – пониженные. Отношение Mn/Fe значения которых ранее почти не изменялись, в интервале 2 имеет несколько повышенные значения за счет ряда коротковременных максимумов ок. 2200, 2000, 1800 л.н. (рисунок 19). Значения плотности отложений и содержание в них органики и SiO₂био постепенно снижается к верхней границе интервала.

В минеральном составе отложений интервала 1 (последние ок. 700 лет) заметно повышается доля слюды. Значения части геохимических показателей (Ca/Ti, Mn/Fe, K/Al) несколько повышаются, а для Ti/Al – снижаются. Значения плотности существенно снижается, а содержание в них SiO₂био и органического вещества повышается.

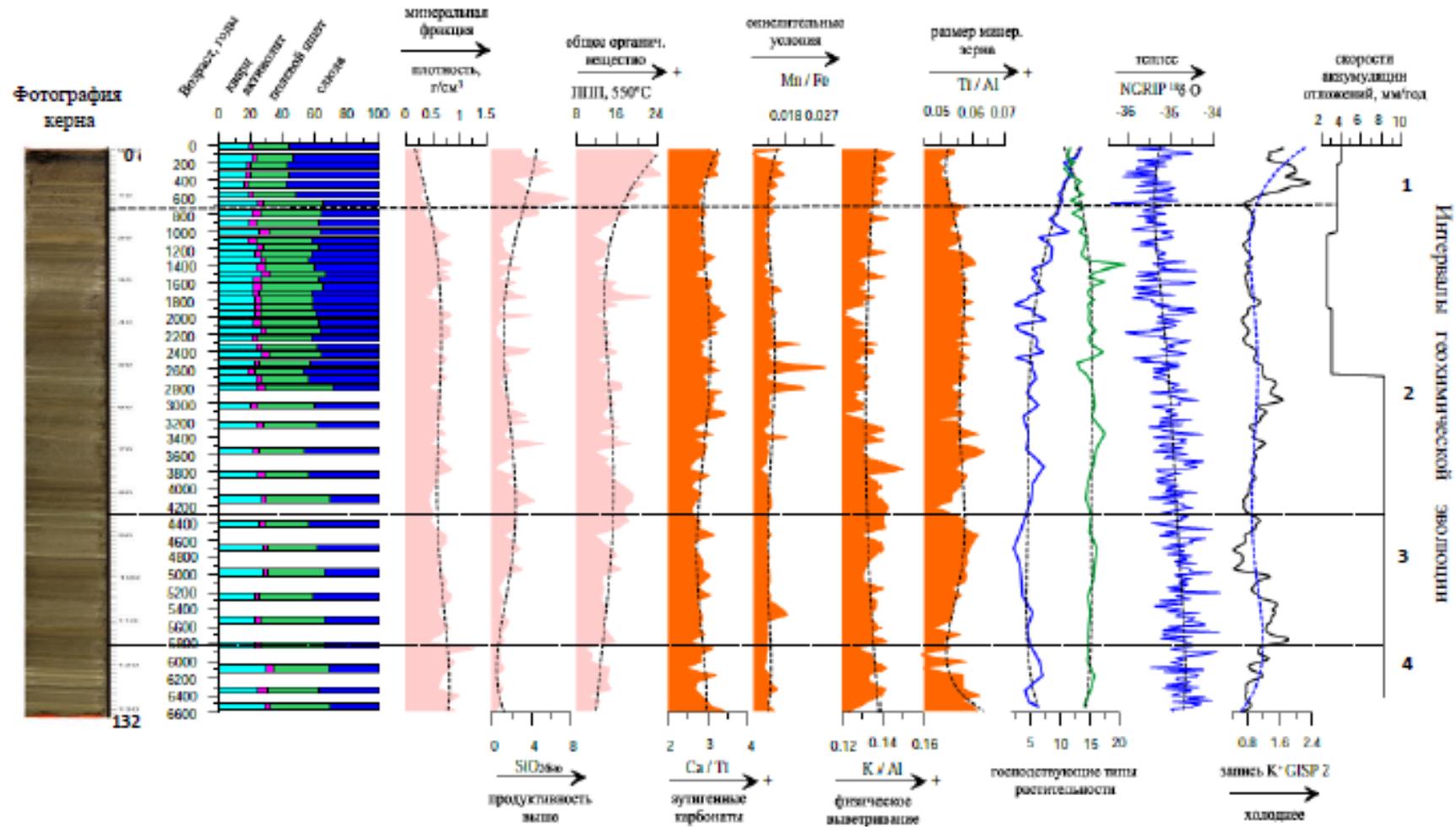


Рисунок 19 – Обобщающий график изменений литолого-минералогических и геохимических показателей в донных отложениях озера Ильчир (кern Ильчир-2013) в сравнении с эволюцией реконструированных господствовавших типов растительности в бассейне озера и изменениями климата северного полушария за последние 6600 лет, полученными из изотопно-кислородных и геохимических записей ледников Гренландии (NGRIP $\delta^{18}O$ и K⁺ GISP 2)

4.1.5 Обсуждение

Известно, что озерные осадки обычно состоят из двух источников материала: аллотогенного, поступающего озеро извне, и аутигенного, образующегося в озерной воде. Следовательно, пропорции и потоки этих компонентов отражают меняющуюся динамику водосбора, включая колебания стока, эрозии почвы, процессов выветривания и внутриозерных процессов, таких как испарительная концентрация или биологическая активность [88]. В настоящее время основным источником поступления минеральной фракции в оз. Ильчир является ее привнос водами р. Голечной и руч. Жерголанта, впадающих в озеро с севера, талыми снеговыми водами со склонов котловины в летнее время, прямое поступление накопившейся вследствие зимнего эолового переноса минеральной фракции на поверхности тающего летом ледового покрова озера, в меньшей степени – летний эоловый привнос.

Согласно возрастной модели отложения в керне Ильчир-13 накапливались на протяжении последних 6600 лет. В самый ранний интервал осадконакопления, ок. 6600–5800 л.н., в озеро поступал повышенный объем минеральной фракции, способствуя высокой средней скорости аккумуляции отложений с господством частиц глинистой размерности, указывая на преобладание низкоэнергетических процессов в относительно глубоком водоеме. Постепенное снижение значений Ti/Al , K/Al от 6600 к 5800 л.н. также подтверждает уменьшение размера зерен минеральной фракции (параллельно со снижением содержания кварца) вследствие увеличения глубины водоема и, возможно, незначительную активизацию процессов химического выветривания. Низкие значения $SiO_{2\text{био}}$ и ППП подразумевают низкопродуктивную озерную экосистему, малоприспособленную для развития кремнепанцирных организмов, в частности, диатомовых водорослей, створки которых, как показал анализ смер-слайдов, присутствуют во всех образцах. Реконструированными преобладающими типами растительности в котловине оз. Ильчир ок. 6600-5800 л.н. были кустарниковые тундры, а в бассейне озера – холодные разреженные хвойные леса с господством лиственницы [73].

Позднее, в интервале ок. 5800-4300 л.н., реконструированные характеристики отложений свидетельствуют об устойчивом процессе преобладающего физического выветривания в бассейне оз. Ильчир (K/Al), небольшом повышении размера зерен минеральной фракции поступавших в озеро отложений (повышающееся Ti/Al), что может соответствовать усилению энергии воды в водоеме из-за повышения атмосферных осадков и повышенному притоку воды в озеро, ослаблявшему аккумуляцию в отложениях аутигенных карбонатов ($> Ca/Ti$). При этом, в озеро стало поступать больше

органического вещества, которое обеспечивало необходимые элементы питания для диатомовых водорослей, в конечном счете приводя к повышенному статусу озерной экосистемы. Снижение доли мелких (глинистых) частиц также благоприятствовало развитию диатомовой флоры, особенно ок. 5000–4300 л.н.

Преобладающими типами растительности в котловине оз. Ильчир ок. 5800–4300 л.н. оставались кустарниковые тундры. В то же время холодные хвойные леса с господством лиственницы в бассейне озера стали менее разреженными [73].

Минеральный состав отложений, сформировавшихся ок. 4300–700 л.н. существенно не изменился, но вдвое снизились скорости аккумуляции отложений. При этом размер поступающей в озеро минеральной фракции постепенно уменьшался, что, вероятно, было одной из причин снижения продуктивности озерной системы ($> \text{SiO}_{2\text{био}}$). Другой причиной могло быть расширение травянистых тундр наряду с кустарниковыми [73], что повысило задернованность склонов, ослабило склоновую эрозию, ослабив поступление крупной минеральной фракции в озеро. Более сухие условия снижали поступление литогенных элементов с водосбора ($> \text{Ti/Al}$), что приводило к концентрации растворенных веществ в толще воды, вызывая повышенное осаждение аутигенного карбоната. При этом ок. 2800, 2600, 2300 л.н. в озере возникали краткие, но высоко изменчивые редокс-условия на границе вода-дно, что нашло выражение в максимумах значений Mn/Fe . Вероятно, в вышеперечисленные короткие интервалы времени происходило усиленное перемешивание воды в озере, вызванное понижением в нем уровня воды и/или усилением скоростей ветра. Не исключено, что именно перемешивание приводило к длительному присутствию в толще воды частиц глинистой размерности (повышение плотности осадка), препятствовавших развитию диатомовых. Неустойчивое состояние и наземной экосистемы бассейна озера нашло отражение в частых сдвигах реконструированных значений тундрового биота и, в итоге, постепенном расширении тундровой растительности в котловине оз. Ильчир.

Особенно заметные изменения в состоянии водной экосистемы оз. Ильчир и природной среды его бассейна произошли в последние примерно 700 лет. В минеральном составе донных отложений значительно возросла доля слюды. Геохимические индексы свидетельствуют об усилении процессов физического выветривания, обогащенной алюминием мелкой минеральной фракции, органического вещества. Повышенные значения Mn/Fe указывают на обогащенные кислородом придонные воды. Реконструкции

типов растительности предполагают значительное расширение тундрового биома в условиях похолодания регионального климата. Однако, природно-климатические условия последних 700 лет стали самыми благоприятным для развития в оз. Ильчир диатомовой флоры.

Сравнение новых комплексных записей изменений природно-климатических условий высокогорной зоны Восточного Саяна за последние 6600 лет, полученных из донных отложений оз. Ильчир, с записями климата северного полушария за это же время позволяют лучше понять причины вариаций регионального климата.

Так, изотопно-кислородная записей из ледникового щита Гренландии (рисунок 19, NGRIP $\delta^{18}\text{O}$), используемая как показатель изменения температуры северного полушария, характеризует постепенное понижение температуры воздуха от примерно 5800 л.н. до примерно 700 л.н. и ее слабое повышение в последние 700 лет с максимумом ок. 150 л.н. Выраженному в этой записи тренду климатических изменений, в общем, следуют тренды снижения плотности донных отложений оз. Ильчир, усиления процессов физического выветривания, повышения доли слюды в минеральном составе отложений, снижения роли лесного и расширение – тундрового биома в структуре региональных/локальных ландшафтов.

Сибирский максимум признан доминирующим режимом зимнего и весеннего климата в высоких и умеренных широтах Евразии. В сглаженной через 200 лет (рисунок 19) записи ионов калия K^+ из ледяного ядра GISP2 [89], рассматриваемой как косвенный показатель интенсивности Сибирского максимума, выражены несколько интервалов усиления его интенсивности, соответствующим похолоданиям: ок. 5800–5000, 3000–2800, 600–150 л.н. Возможно, похолодание ок. 5800–5000 л.н. стало одной из причин изменения модели притока в оз. Ильчир, выразившееся в заметном уменьшении размерности минеральной фракции, снижении поступления органики. Следующий интервал похолодания ок. 3000–2800 л.н. мог привести к снижению продуктивности озерной экосистемы, резкому смену редокс-условий на границе вода-дно в озере и также небольшому уменьшению размерности минеральной фракции и расширению тундровой растительности в бассейне озера. Третий же, самый молодой холодный интервал, случившийся ок. 700–150 л.н., привел к самым заметным сдвигам в экосистеме как самого озера, так и его бассейна. Такие значимые реконструированные изменения локальных/региональных условий природной среды Ильчирского грабена согласуются с

реконструированным снижением летних температур в Восточной Сибири позднее ок. 650 л.н. в начале Малого ледникового периода [90].

Предварительные результаты спектрального анализа геохимических отношений, выполненные с помощью пакета "dplR"(3.4.5) программного языка 'R'(6) в программе 'redfit' (1,2) выявили один значимый пик для Mn/Fe отношения с периодом 230 лет и пик с периодом в 2000 лет для K/Al, Ti/Al, предполагая довольно частую смену редокс-условий на границе вода-дно в оз. Ильчир за последние 6600 лет и гораздо более длительную периодичность возникновения условий поступления в озеро минеральных фракций разной размерности.

4.1.6 Заключение

Первые минералогические и геохимические записи из донных отложений оз. Ильчир дают дополненное, детальное, с шагом в 50 лет представление о природно-климатической истории экосистемы озера, его водосборного бассейна и высокогорных районов Восточного Саяна, в целом. Результаты показали, что в пост-оптимальное время голоцена экосистема оз. Ильчир как и природная среда высокогорной зоны Восточного Саяна не претерпевала глубоких изменений. В пределах хронологических неопределенностей реконструировано общее совпадение значимых изменений регионального климата и связанных с ним сдвигов озерной экосистемы с временными рядами изотопно-кислородных и геохимических записей из Гренландии, что свидетельствует о том, что крупномасштабная динамика атмосферной циркуляции оказывала решающее влияние на изменение климата Восточного Саяна, условия формирования донных отложений озер его высокогорной зоны и функционирования озерных систем в последние 6600 лет. Однако, показано, что и изменения в растительном покрове водосборного бассейна оз. Ильчир также заметно влияли на соотношение органической и минеральной фракций в его донных отложениях, причем расширение травяно-кустарниковых тундр снизило потери грубозернистых фракций почвы. Следует ожидать, что при реализации сценария дальнейшего потепления климата верхняя граница горно-лесного пояса продвинется выше по склонам. возрастет сомкнутость травяно-кустарниковых тундровых ассоциаций. В результате, повысится приток органического вещества и мелкой фракции в озеро, что может привести к негативным изменениям для озерной биоты и качества поступающей через р. Иркут пресной воды. В целом, потенциал

геохимического изучения донных отложений следует продолжать использовать в палеолимнологических исследованиях озер Восточного Саяна для получения информации о региональных палеоэкологических условиях.

4.2 Результаты петромагнитных исследований донных отложений оз. Ордынское

4.2.1 Введение

При изучении озёрных отложений значительный интерес представляют литологические границы, маркирующие изменения условий осадконакопления, что приближает к решению одной из важнейших палеоэкологии – реконструкции природной среды в период формирования донных отложений. Задачей настоящего исследования было изучение изменений петромагнитных параметров последовательности донных отложений из оз. Ордынское, вскрытых керном Ордынское-2022-1.

4.2.2 Материалы и методы

Летом 2022 г. было отобрано два керна из оз. Ордынское, расположенного широкой долине рр. Ордушка и Ирсай, в 15 км к северо-востоку от пос. Усть-Ордынский. Петромагнитные исследования проводились на материале керна Ордынское-2022-1, длиной 139 см в ИЗК СО РАН (г. Иркутск) и в КФУ (г. Казань) на следующем оборудовании: спин-магнитометр JR-6 (Agico, Чехия), капамост KLY-3, коэрцитивный спектрометр J_meter, авторегистрирующие крутильные магнитные весы, катушка переменного магнитного поля.

4.2.3 Результаты

Результаты петромагнитных исследований приведены на рисунке 20.

Результаты петромагнитных исследований позволили выделить четыре этапа формирования осадков.

1 этап (0–22 см) характеризуется низкими значениями магнитной восприимчивости, идеальной намагниченности и остаточной намагниченности насыщения.

2 этап (22–77 см) отмечен значительным ростом K, ARM и SIRM.

3 этап (77–82 см), на котором все три параметра снова уменьшаются до минимальных значений.

4 этап (82–139 см) похож по своим характеристикам на второй этап.

Измерение коэрцитивных характеристик позволило построить диаграмму Дзя-Данлопа [91, 92], используемую для анализа типа хранителей магнитного сигнала (рисунок 21).

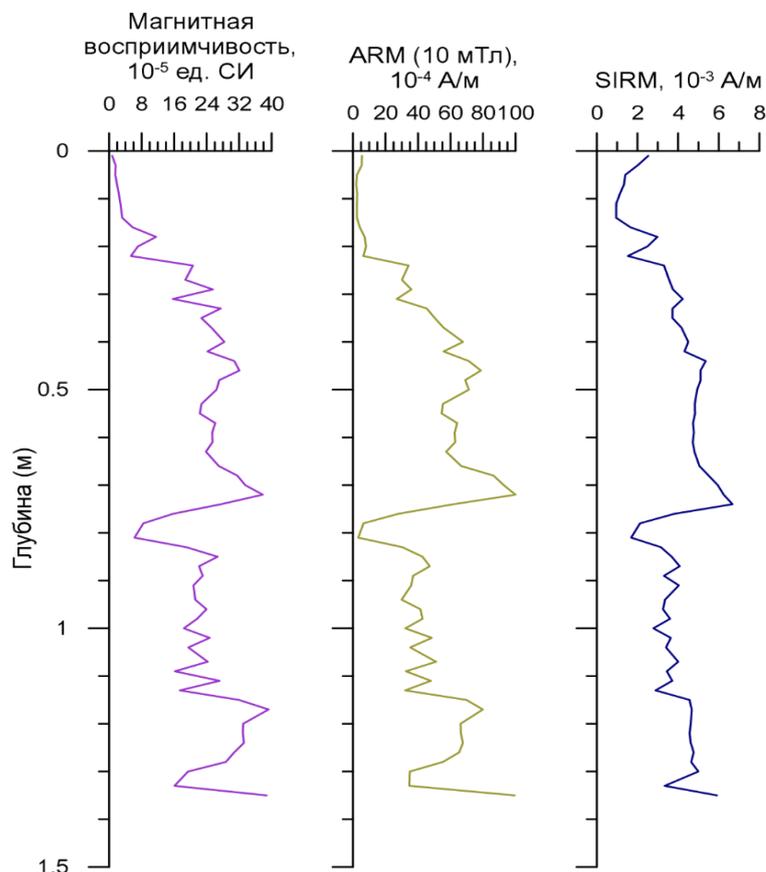


Рисунок 20 – Петромагнитные характеристики донных отложений оз. Ордынское

Согласно диаграмме Дзя-Данлопа, большая часть образцов плотно локализуется в псевдооднородной области, указывая на стабильный источник поступления осадочного материала. Исключением являются образцы первого и третьего этапов, расположенных в области, указывающей на наличие суперпарамагнетиков и почти полное отсутствие ферромагнетиков.

4.2.4 Заключение

Условия осадконакопления в оз. Ордынском на протяжении изученного интервала существенно не изменялись. Исключением является короткий интервал, на протяжении

которого формировался горизонт на глубине 77–82 см – его характеристики резко отличаются от выше- и нижележащих горизонтов. Также в отличных от ранее условиях проходила аккумуляция отложений в интервале 0–22 см.

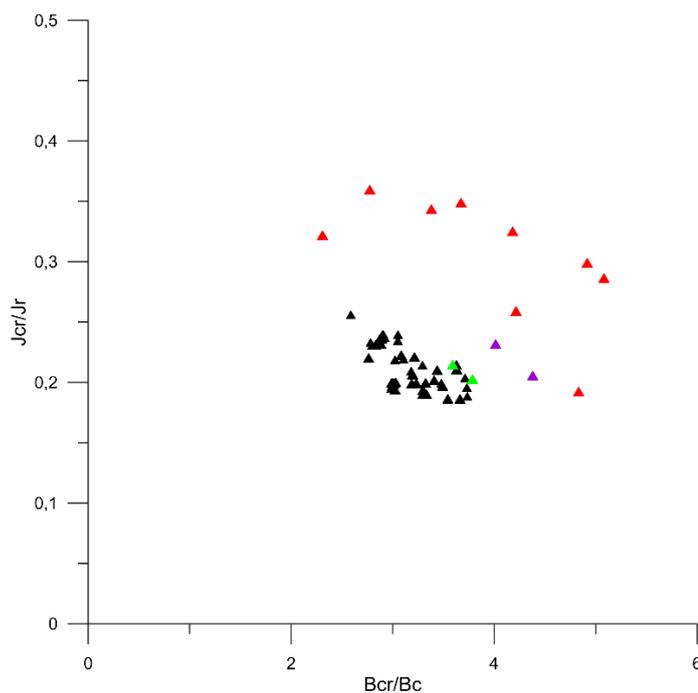


Рисунок 21 – диаграмма Дэя-Данлопа для образцов донных отложений оз. Ордынского. Образцы первого этапа показаны красным цветом, за исключением образцов с глубин 18 и 20 см (зелёный цвет); третьего этапа – сиреневым цветом, остальные – чёрным

4.3 Строение и условия формирования отложений нового многослойного геoarхеологического местонахождения Китайский Мост (верхний палеолит, Предбайкалье)

4.3.1 Введение

На обширной территории Иркутского амфитеатра в настоящее время известно два стратиграфически наиболее полных и детально датированных опорных разреза верхнего плейстоцена – Игетей, расположенный в береговой зоне Осинского залива Братского водохранилища и Усть-Одинский, локализованный на правом берегу р. Китой (левый саянский приток р. Ангары). Оба эти разреза являются многослойными археологическими местонахождениями и относятся к числу ключевых геoarхеологических объектов (ГАО) Предбайкалья. В 2014 г. вблизи опорного разреза Усть-Одинский нашим коллективом обнаружено новое многослойное археологическое местонахождение, получившее название Китайский Мост. В результате его предварительного изучения был определен

среднесартанский возраст культуросодержащих горизонтов. В Предбайкалье археологические стоянки сартанского возраста в целом относительно немногочисленны, а местонахождения конца среднего сартана практически отсутствуют [93], фиксируя хиатус в развитии культур территории Предбайкалья в интервале sr 32 ~17–14.7 тыс. кал. л. н. Обнаружение таких археологических объектов имеет принципиальное значение и вызывает повышенный интерес специалистов.

Цель настоящей работы: подведение итогов мультидисциплинарных исследований отложений разреза Китойский Мост (верхний палеолит, Предбайкалье).

Задачи: комплексная характеристика литолого-стратиграфического строения разреза Китойский Мост, реконструкция обстановок и условий осадконакопления в геоархеологическом контексте.

4.3.2 Материалы и методы

Раскопки на ГАО Китойский Мост проводились двумя ступенчатыми врезками в уступе 20–25 м поверхности террасовала. После зачистки обнажения по стандартной методике выполнено послойное описание разреза, проведен пробоотбор. Помимо этого, в ходе полевых работ была охарактеризована геоморфологическая позиция разреза, установлены общие черты и особенности местного морфолитогенеза.

С целью получения многокомпонентных записей при изучении разреза отложений Китойский Мост был задействован широкий спектр аналитических методов: литолого-минералогические, палео- и петромагнитные, литохимические, геоархеологические, радиоуглеродное датирование.

Возраст отложений определен на основании радиоуглеродных дат, полученных методом AMS, а также закономерностей, характерных для последовательности позднеплейстоценовых отложений региона [93]. Калибровка дат выполнена в программе OxCal 4.4.4 [94] с использованием атмосферной кривой IntCal20 [79].

Петромагнитные исследования выполнялись в лаборатории палеомагнетизма ГИН РАН. Величина объемной магнитной восприимчивости (k) и ее анизотропия (AMS) измерялись на каппа-мосте MFK-1 (AGICO, Чехия), а их интерпретация выполнена с помощью программного комплекса Anisoft-5.1.08 (Agico, Чехия). Все параметры магнитного гистерезиса получены с помощью коэрцитивного спектрометра J_meter.

Гранулометрические исследования мелкозернистых фракций (<1000 мкм) отложений (79 образцов) были выполнены в лаборатории палеомагнетизма ГИН РАН (Москва) на лазерном анализаторе размеров частиц *Bettersizer S*. Диспергирование образцов проводилось путем ультразвуковой обработки. Результаты получены в виде содержания 84 фракций (размером от 0.1055 до 948.05 мкм) в объемных процентах по каждому образцу.

Геохимические исследования включали определение содержаний оксидов породообразующих элементов, редких и рассеянных элементов в породах, которое выполнено рентгенофлуоресцентным методом в ИГХ СО РАН. Определение потерь при прокаливании (LOI) проводилось при 1000°C. Результаты анализа содержаний оксидов пересчитаны на прокаленную бескарбонатную навеску, а затем на молярную массу для расчета основных петрохимических параметров.

Для общей характеристики отложений проведен анализ распределения по разрезу основных литохимических индикаторов интенсивности процессов выветривания и почвообразования (петрохимические модули: ГМ – гидролизатный, ТМ – титановый, НМ – натриевый, КМ – калиевый, ЩМ – щелочной, НКМ – нормированная щелочность, АМ – алюмокремниевый [95]; коэффициента интенсивности химического выветривания $СIA = (Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)) \times 100$ [96], индекса зрелости осадков $ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + TiO_2) / Al_2O_3$ [97].

4.3.3 Результаты и их обсуждение

По своим литологическим свойствам разрез делится на три толщи - верхнюю песчаную (слои 1–10, общая мощность 6.5–7.0 м), среднюю супесчано-суглинистую (слои 11–18, общая мощность 5.5–6.0 м) и нижнюю валунно-галечную (слой 19, видимая мощность более 1 м). Отложения слоя 9 (рисунок 22) идентифицированы как расщепленная мальтинская почва среднесартанского возраста (sr^3_1), которая впервые была выделена и описана по результатам исследования ГАО Мальта-Мост 1 [93]. Ее подстилают слоистые пески с эмбриональными почвенными образованиями (слой 10). Супесчано-суглинистая толща отложений (слои 11–18) накапливалась в интервале от МИС 5e до МИС 3. Здесь отмечено две почвы: каргинская (слой 11) и более древняя казанцевская (слой 18), возраст которой (~115–104 тыс. кал. л. н.) определен по аналогии с датированной $^{230}Th/U$ -методом почвой в расположенном в непосредственной близости и

в идентичной геоморфологической позиции Усть-Одинском опорном разрезе [98], с которым Китайский Мост в основных своих элементах строения хорошо коррелируется.

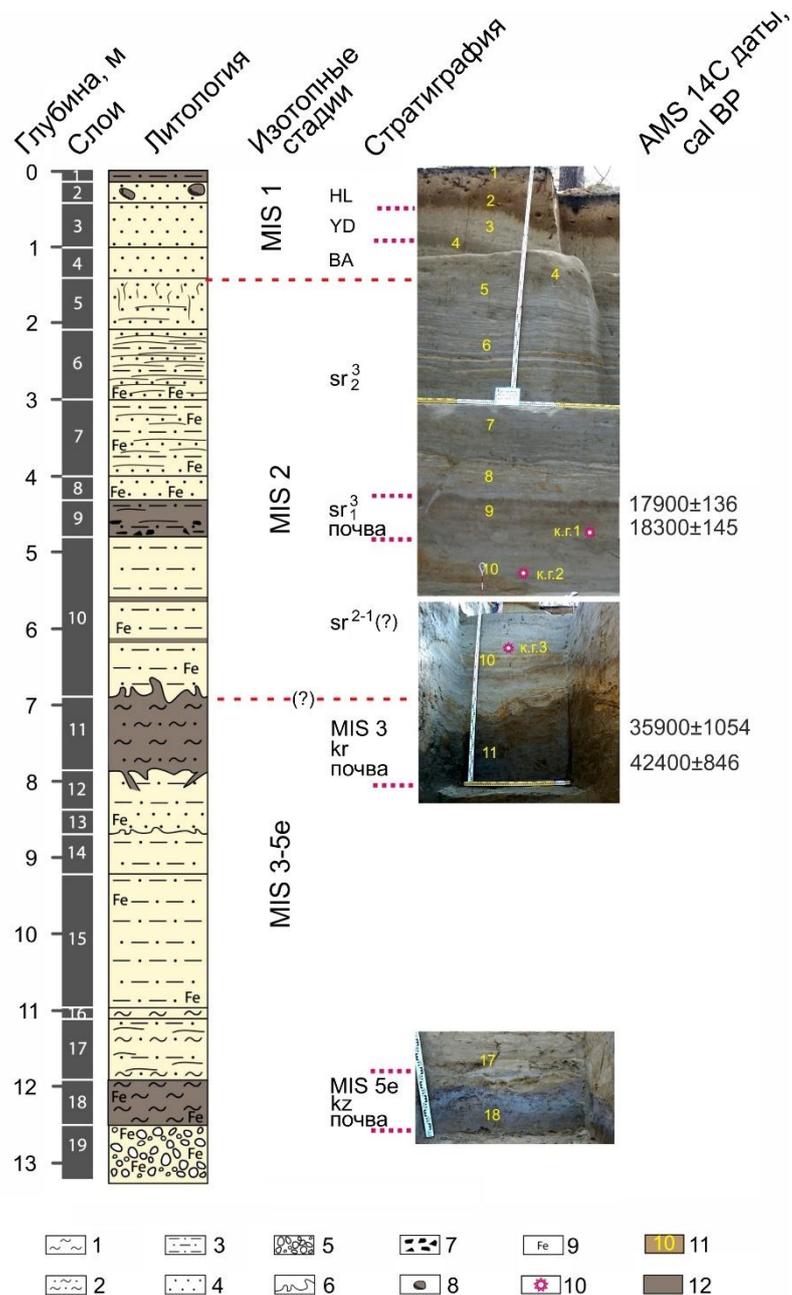


Рисунок 22 – Литолого-стратиграфическое строение разреза Китайский Мост и фотографии отдельных секций. Условные обозначения: 1 - глина; 2 - суглинки; 3 - супеси; 4 - пески; 5 - валунный галечник; 6 - криогенные нарушения; 7 - частицы древесного угля; 8 - отдельные валуны; 9 - ожелезнение; 10 - культурный горизонт (к. г.); 11 - номер слоя; 12 - почвы. Sr - сартанский горизонт (МИС 2), Kr - каргинский горизонт (МИС 3), Kz - казанцевский горизонт (МИС 5)

Согласно гранулометрических данных отложения верхней супесчаной части разреза Китойский Мост характеризуются преимущественно эоловым происхождением, о чем свидетельствуют унимодальные гранулометрические спектры и близкие значения их мод. Изредка в формировании песков верхней толщи принимали участие делювиальные процессы, о чем свидетельствуют прослойки песков с бимодальными распределениями гранулометрических фракций. Нижняя часть разреза также образована эоловыми и склоновыми процессами, за исключением сложенного русловыми валунными галечниками слоя 19 и пойменных суглинков и супесей слоя 18. Согласно распределению гранулометрических фракций нижняя часть разреза (слои 11-18) представлена преимущественно лессами и ископаемыми почвами с прослоями делювиальных отложений, а в основании разреза - пойменными отложениями (слой 18), по которым развилась гидроморфная почва (слой 17).

В супесчано-суглинистой части разреза магнитные характеристики существенно ниже, чем в верхней части: k_{fer} не превышает $250 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, а NRM - 98 мА/м, этих значений существенно не отличаются от таковых в соседнем разрезе Усть-Одинский. Формирование магнитных свойств отложений супесчано-суглинистой толщи соответствует "сибирскому" механизму [99]: магнитная восприимчивость лессов существенно выше, чем восприимчивость ископаемых почв, в палеопочвах присутствует значительное количество суперпарамагнитных частиц, что говорит об интенсивном педогенезе, при этом уменьшается эффективный размер магнитных зерен. "Сибирский" механизм является наложением двух механизмов "китайского", объясняющего присутствие суперпарамагнитных частиц в почвах результатом педогенеза и "аляскинского" (ветрового) [100], обуславливающего различия в магнитной восприимчивости лессов и ископаемых почв изменением в интенсивности ветровой деятельности.

Суммируя полученные данные, можно констатировать, что мелкообломочная часть разреза Китойский Мост сложена отложениями преимущественно эолового генезиса с заключенными в них почвами. Это подтверждается результатами следующих исследований:

- по гранулометрии - это унимодальные гранулометрические спектры с близкими значениями мод, соответствующих лессовидным алевролитам и эоловым пескам;

- по магнитной анизотропии - это типичная осадочная магнитная текстура, свидетельствующая о формировании осадков на субгоризонтальной поверхности, отсутствие ярко выраженного направления переноса осадочного материала и низкая степень анизотропии;

- по петромагнитным данным - соответствие механизма формирования магнитных свойств "сибирскому" варианту, характерному для эоловых образований.

Необходимо подчеркнуть, что в разрезе Китайский Мост мы сталкиваемся с особым типом субаэральных накоплений - нивейно-эоловыми образованиями с характерным параллельным, порой горизонтальным залеганием поверхностей седиментации и ленточной текстурой. Их формирование происходит в условиях криоаридного климата и обусловлено захоронением в эоловых песках фрагментов снежного покрова, который постепенно преобразуется в горизонтальные или полого наклонные шпирсы осадочно-метаморфического льда, по которому часто развиваются тонкие (от первых мм до первых см) параллельные псевдоморфозы - денивационные структуры. Нивейно-эоловые образования - весьма специфичный тип отложений, в Байкальском регионе они ранее не выделялись.

Синхронное распределение петрохимических модулей, индексов CIA и ICV подтверждает различия в минеральном и литологическом составе отложений, слагающих верхнюю (0-7 м) и нижнюю (7-12.5 м) толщи мелкообломочной части разреза, отражая различный механизм переноса осадков при их формировании. В полученных геохимических профилях разреза Китайский Мост четко фиксируются этапы, в период которых на территории преобладали криоаридные условия. Для отложений этих уровней характерны минимальные значения коэффициентов засоления и высокие - окарбонирования, а также низкие значения коэффициентов выщелачивания. Смягчение климатических условий отмечаются при формировании слоев 18 и 11, соответствующих циклам педогенеза каргинского (МИС 3) и казанцевского (МИС 5) времени соответственно. Исследованные выборки отложений характеризуются значительными дисперсиями распределений ряда геохимических коэффициентов, связанных с Ti, Mn, Ca, Mg, что связано, по всей видимости, с влиянием на химические характеристики осадков процессов сортировки при переносе и осаждении, заметным вкладом геохимически более гетерогенного материала притоков, абразией берегов (локальные источники сноса) и рядом других факторов. Климатические условия седиментации были в целом

семиаридными. В сарганское время (МИС 2) фиксируется наиболее сильное ухудшение климатических условий, осадконакопление проходит в глубоко криоаридной обстановке с незначительными колебаниями, что отражается на климатических кривых. Известно, что изменение палеоклиматических условий сопровождается сменой механизмов мобилизации и переноса осадков. При похолоданиях и аридизации климата усиливается эоловый вынос пылеватых продуктов выветривания, при гумидификации возрастает роль водной эрозии илисто-глинистого материала. Изменения в минеральном и химическом составе осадков, например, отражаются в индексе их зрелости (ICV). Для тонкодисперсных отложений горизонтов МИС-2 изученного разреза характерны более высокие значения индекса, что может служить доказательством возрастания роли эолового накопления. Значения индекса зрелости осадков, большие единицы, свидетельствуют о низкой степени зрелости пород в области седиментации.

4.3.4 Заключение

Таким образом, в результате проведенных в 2024 г. комплексных исследований разреза Китайский Мост получены следующие основные выводы:

1. По своим литологическим свойствам разрез четко делится на три толщи - верхнюю песчаную (слои 1-10, общая мощность 6.5-7.0 м), среднюю супесчано-суглинистую (слои 11-18, общая мощность 5.5-6.0 м) и нижнюю валунно-галечную (слой 19, видимая мощность более 1 м).

2. В разрезе присутствует полный набор региональных хроностратиграфических уровней верхнего плейстоцена и голоцена. На начальном этапе (МИС 5) формирование разреза происходило преимущественно в аллювиальной обстановке (накопление валунно-галечного слоя 19 и пойменных супесей с суглинками слоя 17) с интервалами педогенеза, а впоследствии (МИС 4-1) преимущественно в субэразальных условиях с периодическим проявлением педогенеза и усилением роли делювиальных процессов.

3. Образование магнитных свойств отложений облессованной толщи разреза соответствует "сибирскому" механизму, который является наложением двух механизмов: "китайского", объясняющего присутствие суперпарамагнитных частиц в почвах результатом педогенеза и "аляскинского" (ветрового), обуславливающего различия в магнитной восприимчивости лессов и ископаемых почв изменением в интенсивности ветровой деятельности.

4. В полученных геохимических профилях разреза Китойский Мост отражаются этапы осадконакопления, в период которых на территории преобладали криоаридные условия. Снижение тепло- и влагообеспеченности фиксируется при формировании слоев 17-15 и 10-6, соответствующих криохронам позднего плейстоцена. Смягчение климатических условий осадконакопления отмечаются при формировании слоев 18 и 11, соответствующих циклам педогенеза казанцевского (МИС 5e) и каргинского (МИС 3) времени соответственно.

5. Наибольший интерес представляет сартанский (МИС 2) горизонт субаэральных отложений разреза, выделяющийся повышенной для региона мощностью (5.5 м) и литолого-стратиграфической дробностью строения. Во время его формирования фиксируется наиболее резкое ухудшения климата, осадконакопление проходит в криоаридной обстановке с незначительными колебаниями.

6. В отложениях сартанского горизонта установлено наличие нивейно-эоловых ленточных песков, перекрывающих культуросодержащие слои и свидетельствующих о периоде наиболее глубокой криоаридизации условий во второй половине среднего сартана с проявлением экстремально сильных ветровых воздействий. Можно полагать, что в данных критически неблагоприятных условиях человек был вынужден переселяться с привычных мест обитания, менять форму адаптации и свою миграционную стратегию в регионе в целом, что объясняет проблему культурного хиатуса на территории Верхнего Приангарья ~17–14.7 тыс. кал. л. н.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация плана научно-исследовательских работ 2024 года позволила получить следующие результаты:

– установлена высокая степень постоянства концентраций главных ионов в воде русловой части Иркутского водохранилища, во временном и пространственном аспектах, обеспечиваемого доминирующим влиянием стабильных по составу вод оз. Байкал;

– выявлены повышенные концентрации ионов хлора в заливах приплотинной части Иркутского водохранилища, связанные с воздействием антропогенных факторов, в то время как обнаруженное увеличение концентраций сульфатов в заливах верхней части водоема обусловлено особенностями природного состава вод впадающих притоков;

– установлено, что максимальная аккумуляция свинца происходит в корневой системе пырея *Elytrigia repens* L., что указывает на повышенную толерантность этого растения и имеет большое значение для фитостабилизации свинцового загрязнения;

– показано, что периодически затопляемые острова р. Ангара в разные периоды водности могут являться как барьерами для дальнейшего распространения техногенной ртути, так и вторичными источниками ее поступления;

- выявлено сходство и значимые различия между концентрациями редких щелочей (Li, Rb, Cs) в сопряженных в пространстве водных объектах Байкальской экосистемы;

- установлена значимая аккумуляция редких щелочей в горячих источниках в условиях гидротермального рифтогенеза и показана близость значений концентраций редких щелочей в горячих источниках Баргузинской впадины с источниками Камчатки, что подчеркивает близкие генетические условия происхождения, обусловленные землетрясениями и геодинамическими подвижками;

- показано, что концентрации редких щелочей в других водных объектах Байкальской экосистемы имеют близкие средние и медианные значения и особенно близкие значения отмечены в воде Байкала и в его – р. Ангаре;

- установлено, что основное количество ПХБ и ХОП накапливается в почвах до глубины 5-6 см и зависит от содержания органического вещества в почвах;

- обнаружено, что в растительных остатках (корнях и отмерших органах растений) концентрация ПХБ и ХОП выше, чем во фракции до 2 мм почвы, и разница между этими фракциями увеличивается с глубиной отбора;

- выявлено, что вариации качественного состава ПХБ и ХОП в почве по глубине зависят от метаболизма почвенных микроорганизмов и физико-химических свойств самих соединений;

- обнаружено, что в пост-оптимальное время голоцена экосистема оз. Ильчир как и природная среда высокогорной зоны Восточного Саяна, не претерпевала глубоких изменений. В пределах хронологических неопределенностей реконструировано общее совпадение значимых изменений регионального климата и связанных с ним сдвигов озерной экосистемы с временными рядами изотопно-кислородных и геохимических записей из Гренландии, что свидетельствует о том, что крупномасштабная динамика атмосферной циркуляции оказывала решающее влияние на изменение климата Восточного Саяна, условия формирования донных отложений озер его высокогорной зоны и функционирования озерных систем на последних 6600 лет;

- предположено, что при реализации сценария продолжающегося потепления климата верхняя граница горно-лесного пояса продвинется выше по склонам, возрастет сомкнутость травяно-кустарниковых тундровых ассоциаций. В результате, повысится приток органического вещества и мелкой фракции в озеро, что может привести к негативным изменениям озерной биоты и качества поступающей через р. Иркут в многочисленные поселки Иркутско-Черемховской равнины пресной воды;

- установлено, что в разрезе Китойский Мост присутствует полный набор региональных хроностратиграфических уровней верхнего плейстоцена и голоцена;

- показано, что в геохимических профилях разреза Китойский Мост отражаются этапы осадконакопления, когда на территории преобладали криоаридные условия;

- впервые в отложениях сартанского горизонта юга Восточной Сибири установлено наличие нивейно-эоловых ленточных песков, свидетельствующих о периоде наиболее глубокой криоаридизации условий во второй половине среднего сартан, позволяя предполагать, что в таких критически неблагоприятных условиях человек был вынужден переселяться с привычных мест обитания, менять форму адаптации и свою миграционную стратегию в регионе в целом, что объясняет проблему культурного хиатуса на территории Верхнего Приангарья ~17–14.7 тыс. кал. л. н.

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 эко- и геосистем Восточной Сибири в недавнем прошлом, закономерностей их функционирования и выработке прогнозных рекомендаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Zhao Q., Liu S., Deng L., Yang Z., Dong S., Wang C., Zhang Z. Spatio-temporal variation of heavy metals in fresh water after dam construction: A case study of the Manwan Reservoir, Lancang River // *Environ Monit Assess* – 2012. – V. 184. – P. 4253–4266.
- 2 Ochoa-Contreras R., Jara-Marini M.E., Sanchez-Cabeza J.A., Meza-Figueroa D.M., Pérez-Bernal L.H., Ruiz-Fernández A.C. Anthropogenic and climate induced trace element contamination in a water reservoir in northwestern Mexico. // *Environ. Sci. Pollut. Res* – 2021. – V. 28. – P. 16895–16912.
- 3 Meybeck M. Global occurrence of major elements in rivers. In *Treatise on Geochemistry*; Holland H.D., Turekian K.K. // Elsevier: Amsterdam, The Netherlands – 2003. V. 5. – P. 207–223.
- 4 Khodzher T.V., Domysheva, V.M., Sorokovikova L.M., Sakirko, M.V., Tomberg, I.V. Current chemical composition of Lake Baikal water. // *Inland Waters* – 2017. – V. 7. – P. 250–258.
- 5 Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Андрулайтис Л.Д., Гапон А.Е., Склярова О.А., Чернигова С.Е. Гидрохимические характеристики поверхностного стока озера Байкал (1997-2003 гг.). // *Докл. РАН.* – 2005. – Т. 401. – № 5. – С. 663–665.
- 6 Домышева В.М., Сороковикова Л.М., Синюкович В.Н., Онищук Н.А., Сакирко М.В., Томберг И.В., Жученко Н.А., Голобокова Л.П., Ходжер Т.В. Ионный состав воды озера Байкал, его притоков и истока реки Ангара в современный период. // *Метеорология и Гидрология.* – 2019. – № 10. – С. 77–86.
- 7 Николаева М.Д. К гидрохимии Иркутского водохранилища // *Биология Иркутского водохранилища / Под ред. Г.И. Галазия. Труды Лимнологического института.* – М.: Издательство «Наука», 1964. – Т. II (31). – С. 17–40.
- 8 Карнаухова Г.А. Изменение гидрохимического состава воды в процессе эксплуатации Иркутского водохранилища. // *Метеорология и Гидрология.* – 2018. – № 7. – С. 87–96.
- 9 Вотинцев К.К. Гидрохимия озера Байкал. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 311 с.
- 10 Кожова О.М. Общая физико-географическая характеристика Иркутского водохранилища // *Труды Лимнологического института Сибирского отделения Академии наук СССР.* – М.: Издательство «Наука», 1964. – Т. II (31). – С. 3–16.

- 11 Berner E.K., Berner R.A. Global Environmental: Water, Air and Geochemical Cycles. – NJ, USA: Englewood Cliffs, 1996. –376 p.
- 12 Li S., Ye C., Zhang Q. 11-Year change in water chemistry of large freshwater Reservoir Danjiangkou, China. // *Journal of Hydrology* - 551:508–517.
- 13 Kushwah V.K., Singh K.R., Gupta N., Berwal P., Alfaisal F.M., Khan M.A., Alam S., Qamar O. Assessment of the Surface Water Quality of the Gomti River, India, Using Multivariate Statistical Methods. // *Water* – 2023. – V.15. – P. 3575.
- 14 Kuzmin M.I., Tarasova E.N., Mamontova E.A., Mamontov A.A., Kerber E.V. Seasonal and interannual variations of water chemistry in the headwater streams of the Angara River (Baikal) from 1950 to 2010. // *Geochem. Int* – 2014. V. 52. – P. 523–532.
- 15 Silow E.A. Lake Baikal: Current Environmental Problems. // In *Encyclopedia of Environmental Management*; Taylor and Francis: New York, NY, USA. – 2014. – P. 1–9.
- 16 Ongley E.D., Zhang X., Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source Pollution assessment in China. // *Environ. Pollut* – 2010. – V. 158. – P. 1159–1168.
- 17 Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soil and Plants. (4rd edn.) CRC Press Taylor and Francis Group, LLC. New York. 2011.
- 18 Кашин В. К. Содержание микроэлементов в пырее в Западном Забайкалье // *Агрохимия*. – 2020. – № 3. – С. 55-61.
- 19 СанПиН 2.3.2.1078. Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. – М.: Минздрав России. – 2022.
- 20 Chandra R., Kumar V., Tripathi S., Sharma P. Heavy metal phytoextraction potential of native weeds and grasses from endocrine-disrupting chemicals rich complex distillery sludge and their histological observations during in-situ phytoremediation // *Ecol Eng* – 2018. –V. 111. – P. 143–156.
- 21 Zhou C., Huang M., Li Y., Luo J., Ping Cai L. Changes in subcellular distribution and antioxidant compounds involved in Pb accumulation and detoxification in *Neyraudia reynaudiana* // *Environ Sci Pollut Res* – 2016. – V. 23. – P. 21794–21804.
- 22 Rudakova E. V., Karakis K. D., Sidorshina E. T. The role of plant cell walls in the uptake and accumulation of metal ions // *Fiziol Biochim Kult Rast*. – 1988. – V. 20. – P. 3–12.
- 23 Wierzbicka M. H., Przedpełska E., Ruzik R., Ouerdane L., Polec-Pawlak K., Jarosz M., Szpunar J., Szakiel A. Comparison of the toxicity and distribution of cadmium and lead in plant cells // *Protoplasma* – 2007. – V. 231. – P. 99–111.

- 24 Yan Z. Z., Ke L., Tam N. F. Y. Lead stress in seedlings of *Avicennia marina*, a common mangrove species in South China, with and without cotyledons // *Aquat Bot* – 2010. – V. 92. – P. 112–118.
- 25 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.
- 26 Серегин И. И., Кожевникова А. Д. Роль тканей корня и побега в транспорте и накоплении кадмия, свинца, никеля и стронция // *Физиология растений.* – 2008. – Т. 55, № 1. – С. 3–26.
- 27 Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Tirskikh E.N. Long-term dynamics of mercury pollution of the Bratsk reservoir bottom sediments, Baikal region, Russia // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* – 2019. – V. 321. – P. 012041.
- 28 Калинин В.В., Аксентов К.И., Иванов М.В. и др. Атомарная ртуть в приводном слое воздуха северо-западной части Японского моря осенью 2011 г. // *Вестник ДВО РАН.* 2012. – № 3. – С. 58–66.
- 29 Михайленко А.В. Оценка содержания ртути в почвах и донных отложениях дельты реки Дон // *Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона».* – 2015. – № 3.
- 30 Bloom N.S., Preus E., Katon J., et al. Selective extractions to assess the biogeochemically relevant fractionation of inorganic mercury in sediments and soils // *Analytica Chimica Acta* – 2003. – V. 479. – P. 233–248.
- 31 Gordeeva O., Pastukhov M. Forms of mercury in soils and its accumulation by herbs in the zone of influence of the sludge storage of a chlor-alkali plant (Southern Baikal region) // *E3S Web of Conferences* – 2023. – V. 417. – P. 02013.
- 32 Gordeeva O., Belogolova G., Pastukhov M. Mercury bioaccumulation by higher plants and mushrooms around chlor-alkali and metallurgical industries in the Baikal region, Southern Siberia, Russia // *Chemistry and Ecology* – 2021. – V. 37 (8). – P. 729–745.
- 33 Ключевский А.В., Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Демьянович В.М., Ключевская А.А. О связи сильных геодинамических воздействий с повышением

- содержания ртути в воде истока р. Ангара (Байкальская рифтовая зона). Геология и геофизика.– 2021.– № 2.– С. 293–311.
- 34 Турутанов Е.Х. Ангаро-Витимский батолит: форма и размеры по гравиметрическим данным // Доклады Академии наук. 2011.– Т. 440.– № 6.– С. 815–818.
- 35 Sklyarova O.A., Sklyarov E.V., Och L., Pastukhov M.V., Zagorulko N.A. Rare earth elements intricutaries of Lake Baikal (Siberia, Russia) // Applied Geochemistry– 2017.– 82.– pp. 164-176.
- 36 Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Демьянович В.М. Разнонаправленная динамика химического состава воды Байкальской экосистемы (Байкал, притоки, исток р. Ангара // Геология и геофизика.– 2024.– Т. 65.– № 3.– С. 386–400.
- 37 Травин А.В., Владимиров А.Г., Цыганков А.А., Ханчук А.И., Эрнст Р., Мурзинцев Н.Г., Михеев Е.И., Хубанов В.Б. Термохронология Ангаро-Витимского гранитодного батолита, Забайкалье, Россия // ДАН. Науки о Земле.– 2020.– Т. 494.– № 1.– С. 53–59.
- 38 Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Повышенные содержания ртути в воде истока р. Ангара: отклики на геодинамические воздействия и сильные землетрясения // ДАН. Науки о Земле.– 2020.– Т. 491.– № 2.– С. 77–81.
- 39 Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Демьянович В.М. Уран в воде Байкальской экосистемы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.– 2023.– Т. 512.– № 2.– С. 332–340.
- 40 Шимараев М.Н., Троицкая Е.С., Блинов В.В., Иванов В.Г., Гнатовский Р.Ю. Об апвеллингах в озере Байкал // ДАН.– 2012.– т. 442.– № 5.– С. 696–700.
- 41 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.
- 42 Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М. Сходство и различие в развитии позднекайнозойских Витимской и Даригангской расплавленных аномалий: обоснование потенциальной возможности подъема флюидов нижней мантии под Баргузинской долиной, средним и Северным

- Байкалом // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту).– 2023.– Выпуск 21.– С. 222–223.
- 43 Skuzovatov S.Yu., Belozerova O.Yu., Vasil'eva I.E., Zarubina O.V., Kaneva E.V., Sokolnikova Yu.V., Chubarov V.M., Shabanova E.V. Centre of Isotopic and Geochemical Research (IGC SB RAS): Current State of Micro- and Macroanalysis // *Geodynamics & Tectonophysics*– 2022.– V 13.– N 2.– Article 0585.
- 44 Арсанова Г.И. Происхождение термальных вод вулканических областей // *Вулканонология и сейсмология*.– 2014.– № 6.– С. 44-58
- 45 Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск. Наука.– 1974.– 168 с.
- 46 Трошин Ю.П., Ломоносов И.С., Брюханова Н.Н. Условия формирования рудно-геохимической специализации современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны // *Геология и геофизика*.– 2008.– Т. 49.– № 3.– С. 226–234.
- 47 Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токаренко О.Г., Чернявский М.К. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // *Геология и геофизика*.– 2013.– Т. 54.– № 5.– С. 647–664.
- 48 Sklyarov E.V., Sklyarova O. A., Lavrenchuk A.V. & Menshagin Yu.V. Natural pollutants of Northern Lake Baikal // *Environmental Earth Sciences*.– 2015.– Т. 74.– P. 2143–2155.
- 49 Гребенщикова В.И., Носков Д.А., Герасимов Н.С. Геохимия и условия формирования Ангаро-Витимского батолита (Прибайкалье) // *Вестник ИГТУ*.– 2009.– N 3.– С. 24-30.
- 50 Павлов С.Х., Чудненко К.В. Формирование азотных терм в системах «гранит-вода» и «вода-порфирит» // *Геохимия*.– 2023.– Т. 68.– № 3.– С. 285–293.
- 51 Лунина О.В., Кучер К.М., Наумова Т.В., Ситникова Т.Я. Новые находки грязевого вулканизма у северо-западного побережья оз. Байкал по данным подводной видеосъемки // *ДАН. Науки о Земле*.– 2023.– Т. 513.– № 2.– С. 218-223.
- 52 Mackay D., Shiu W. Y., Lee S. C. Handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals. 2nd ed. – CRC press: Taylor & Francis Group, 2006. – 4216 p.
- 53 McLachlan M.S., Horstmann M. Forests as filters of airborne organic pollutants: a model // *Environmental Science & Technology* – 1998. – Vol. 32. – P. 413-420.

- 54 Wania F., Mackay D. Tracking the distribution of persistent organic pollutants // *Environ. Sci. Technol* – 1996. – vol. 30, N 9. – Pp. 390A-396A.
- 55 Armitage J.M., Hanson M., Axelman J., Cousins I.T. Levels and vertical distribution of PCBs in agricultural and natural soils from Sweden // *Science of the Total Environment* – 2006. – Vol. 371. – P. 344–352.
- 56 Komprdová K., Komprda J., Menšík L., Vaňková L., Kulhavý J., Nizzetto L. The influence of tree species composition on the storage and mobility of semivolatile organic compounds in forest soils // *Science of the Total Environment* – 2016. – Vol. 553. – P. 532–540.
- 57 Sweetman A.J., Valle M.D., Prevedouros K., Jones K.C. The role of soil organic carbon in the global cycling of persistent organic pollutants (POPs): interpreting and modelling field data // *Chemosphere* – 2005. – Vol. 60. – P. 959–972.
- 58 Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
- 59 Luo Y., Yang R., Li Y., Wang P., Zhu Y., Yuan G., Zhang Q., Jiang G. Accumulation and fate processes of organochlorine pesticides (OCPs) in soil profiles in Mt. Shergyla, Tibetan Plateau: A comparison on different forest types // *Chemosphere* – 2019. – Vol. 231. – P. 571–578.
- 60 Zhang H., Luo Y., Li Q. Burden and depth distribution of organochlorine pesticides in the soil profiles of Yangtze River Delta Region, China: Implication for sources and vertical transportation // *Geoderma* – 2009. – Vol. 153. – P. 69–75.
- 61 Пристова Т.А. Скорость разложения растительного опада в лиственных насаждениях послерубочного происхождения в условиях средней тайги Республики Коми // *Тр. СПб. НИИ лесного хозяйства*. – 2020. – № 3. – С. 62–72
- 62 Mamontov A.A., Mamontova E.A., Tarasova E.N., McLachlan M.S. Tracing the sources of PCDD/Fs and PCBs to Lake Baikal // *Environ. Sci. & Technol* – 2000. – Vol.34. – P. 741-747.
- 63 Мамонтов А.А. Полихлорированные дибензо-пара-диоксины и родственные соединения в экосистеме озера Байкал. М.: Академия наук о Земле, 2001. – 68 с.
- 64 ГОСТ 17.4.4.02-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовка проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2018. – 10 с.

- 65 Otani T., Seike N., Sakata Y. Differential uptake of dieldrin and endrin from soil by several plant families and Cucurbita genera // *Soil Sci. Plant Nutr* – 2007. – Vol. 53. – P. 86–94.
- 66 Ларикова Ю.С., Волобуева О.Г. Современные представления об эколого-физиологической роли корневых экссудатов растений // *Зернобобовые и крупяные культуры*. – 2021. – № 4 (40). – С. 93-101.
- 67 Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Эколого-геохимическая оценка «отпечатков» стойких хлорорганических пестицидов в системе почва – поверхностная вода // *Агрохимия*. – 2008. – № 1. – С. 52–56.
- 68 Mackay A.W., Bezrukova E.V., Leng M., Meaney M., Nunes A., Piotrowska N., Self A., Shchetnikov A., Shilland E., Tarasov P., Wang L., White A. Aquatic ecosystem responses to Holocene climate change and biome development in boreal, central Asia // *Quaternary Science Review*– 2012.– V. 41.– P. 119-131.– doi:10.1016/j.quascirev.2012.03.004
- 69 Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Krivonogov S.K. Late Glacial to Holocene volcanism of Jom-Bolok Valley (East Sayan Mountains, Siberia) recorded by microtephra layers of the Lake Kaskadnoe-1 sediments // *Journal of Asian Earth sciences*– 2019.– V. 173.– P. 291-303.– DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.01.025
- 70 Безрукова Е.В., Кулагина Н.В., Волчатова Е.В., Кузьмин М.И. Постледниковая история растительности и климата Окинского плато (Восточный Саян, Южная Сибирь) // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*.– 2021. 496 (2).– С. 211-214.– DOI: 10.31857/S2686739721020043
- 71 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
- 72 Bezrukova E.V., Amosova A.A., Chubarov V.M. Geochemical Records of the Late Glacial and Holocene Paleoenvironmental Changes from the Lake Kaskadnoe-1 Sediments (East Sayan Mountains, South Siberia) // *Minerals*– 2023.– 13(3).– 449.– DOI: 10.3390/min13030449

- 73 Волчатова Е.В., Безрукова Е.В., Кулагина Н.В., Кербер Е.В., Решетова С.А., Щетников А.А., Филинов И.А. История растительности бассейна озера Ильчир (Восточный Саян) за последние 8500 лет // Геосферные исследования.– 2021.– № 1.– С. 49-60.– DOI: 10.17223/25421379/18/4
- 74 Волчатова Е.В., Безрукова Е.В., Кулагина Н.В., Решетова С.А., Щетников А.А., Крайнов М.А. История растительности долины реки Сенцы (Окинское плато, Восточный Саян) за последние 4700 лет. // Геосферные исследования.– 2024.– №1.– С 60-71.– DOI: 10.17223/25421379/30/4
- 75 Harding P., Bezrukova E.V., Kostrova S.S., Lacey J.H., Leng M.J., Meyer H., Pavlova L.A., Shchetnikov A., Shtenberg M.V., Tarasov P.E., Mackay A.W. Hydrological (in)stability in Southern Siberia during the Younger Dryas and early Holocene // *Global and Planetary Change*– 2020.– V. 195.– 103333.– DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103333
- 76 Koinig K.A., Shotyk W., Lotter A.F., Ohlendorf Ch., Sturm M. 9000 years of geochemical evolution of lithogenic major and trace elements in the sediment of an alpine lake – the role of climate, vegetation, and land-use history // *Journal of Paleolimnology*– 2003.– 30.– p. 307–320.– DOI:10.1023/A:1026080712312
- 77 Bondarenko N.A., Sheveleva N.G. Domysheva V.M. Structure of plankton communities in Il'chir, an alpine lake in eastern Siberia // *Limnology*– 2002.– 3.– p. 127–133.– DOI:10.1007/s102010200015
- 78 Zhang J., Ma X., Qiang M., Huang X., Li S., Guo X., Henderson A.C.G., Holmes J.A., Chen F. Developing Inorganic Carbon-Based Radiocarbon Chronologies for Holocene lake Sediments in Arid NW China // *Quaternary Science Review*– 2016.– Vol. 144.– p. 66–82.– DOI:10.1016/j.quascirev.2016.05.034
- 79 Reimer P.J., Austin W.E. N., Bard E., Bayliss a., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Lawrence Edwards R., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kromer B., Manning S.W., Muscheler R., Palmer J.G., Pearson C., van der Plicht J., Reimer R.W., Richards D.A., Marian Scott E., Turney C.S.M., Wacker L., Adolphi F., Büntgen U., Capano M., Fahrni S.M., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Köhler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. The INTCAL120 northern hemisphere radiocarbon

- age calibration curve (0–55 cal kBP) // Radiocarbon– 2020.– Vol. 62 (4).– P. 725–757.– DOI:10.1017/RDC.2020.41
- 80 Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process // Bayesian Analysis– 2011.– 6.– P. 457–474.– DOI:10.1214/ba/1339616472
- 81 Amosova A.A., Panteeva S.V., Chubarov V.M., Finkelshtein A.L. Determination of major elements by wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometry and trace elements by inductively coupled plasma mass spectrometry in igneous rocks from the same fused sample (110 mg) // Spectrochimica Acta. Part B – 2016. – V. 122. – P. 62-68. DOI:10.1016/j.sab.2016.06.001
- 82 DIFFRAC Plus Evaluation package EVA. User’s Manual, Bruker AXS.– Karlsruhe.– Germany.– 2007
- 83 Topas V4: General profile and structure analysis software for powder diffraction data. User’s Manual, Bruker AXS.– Karlsruhe.– Germany.– 2008
- 84 ICDD Products. [Электронный ресурс]: <http://www.icdd.com/products/> дата обращения 15.02.2023
- 85 Якимов И.С., Дубинин П.С., Залого А.Н., Пиксина О.Е., Якимов Я.И. Регуляризация методов нестандартного рентгенофазового анализа // Журнал структурной химии.– 2011.– Т. 52(2).– С. 329-335
- 86 Mortlock R.A. and Froelich P.N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments // Deep-Sea Research– 1989.– 36.– P. 1415–1426.– DOI: 10.1016/0198-0149(89)90092-7
- 87 BDP Members. High-resolution sedimentary record in a new BDP-99 core from Posol’sk Bank in Lake Baikal // Russian Geology and Geophysics.– 2004.– 45 (2).– P. 149–175
- 88 Croudace Ian W., Rothwell R. Guy, eds. Micro-XRF Studies of Sediment Cores: Applications of a non-destructive tool for the environmental sciences.– Dordrecht.– The Netherlands.– Springer.– 2015.– 688 pp.– DOI:10.1007/978-94-017-9849-5
- 89 Mayewski P.A., Rohling E.E, Stager J.C., Karlen W., Maasch K.A., Meeker L.D., Steig E.J. Holocene Climate Variability // Quaternary Research– 2004.– 62.– P. 243-255.– <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2004.07.00>
- 90 Stepanova O.G., Trunova V.A., Osipov E.Y.; 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 from biogeochemical proxies from bottom sediments of proglacial lakes // *Quaternary International*– 2019.– Vol. 524.– P. 4–12.– <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.003>
- 91 Day R., Fuller M., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*– 1977.– vol. 13.– no. 4.– pp. 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
- 92 Dunlop D.J. Theory and application of the Day plot (Mrs /Ms versus Hcr/Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*– 2002.– vol. 107.– no. B3.– pp. EPM 4-1–EPM 4-22. <https://doi.org/10.1029/2001JB000486>.
- 93 Vorobieva G., Vashukevich N., Berdnikova N. Soil Formation, Subaerial Sedimentation and Ancient Cultures during MIS 2 and the Deglaciation Phase MIS 1 in the Baikal–Yenisei Siberia (Russia) // *Geosciences*– 2021.– Vol. 11.– P. 323-335
- 94 Ramsey Bronk C. (2009). Bayesian analysis of radiocarbon dates // *Radiocarbon*– 51(1).– P. 337-360
- 95 Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука.– 2000.– 479 с.
- 96 Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature*– 1982.– Vol. 299 (5885).– P. 715-717
- 97 Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudroc chemistry in southwrstern United States // *Geochimica et Cosmochimica Acta*– 1995.– Vol. 59.– P. 2919-2940
- 98 Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V. Maksimov F.E. Environmental and climate reconstructions of the Fore-Baikal area during MIS 5-1: Multiproxy record from terrestrial sediments of the Ust-Oda section (Siberia, Russia) // *Journal of Asian Earth Sciences*– 2016.– Vol. 129.– P. 220-230
- 99 Matasova G., Kazansky A.Y. Magnetic properties and magnetic fabrics of Pleistocene loess/palaeosol deposits along west-central Siberian transect and their palaeoclimatic implications // *Geological Society of London*– 2004.– Vol. 238.– P. 145-173
- 100 Beget J.E., Stone D.B., Hawkins D.B. Paleoclimatic forcing of magnetic susceptibility variations in Alaskan loess during the Late Quaternary // *Geology*– 1990.– Vol. 18.– P. 40-43

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций 2024 г. по теме исследований

Статьи

- 1 Krikunova A.I., Kobe F., Long T., Leipe C., Gliwa J., Shchetnikov A.A., Olschewski P., Hoelzmann P., Wagner M., Bezrukova E.V., Tarasov P.E. Vegetation and fire history of the Lake Baikal Region since 32 ka BP reconstructed through microcharcoal and pollen analysis of lake sediment from Cis- and Trans-Baikal // *Quaternary Science Reviews.*– 2024.– V. 340.– 108867 (15.09.2024).– DOI: 10.1016/j.quascirev.2024.108867
- 2 Mamontova E.A., Mamontov A.A. Persistent Organic Pollutants and Suspended Particulate Matter in Snow of Eastern Siberia in 2009–2023: Temporal Trends and Effects of Meteorological Factors and Recultivation Activities at Former Industrial Area // *Toxics.*– 2024.– 12(1): 11. (22.12.2023).– DOI: 10.3390/toxics12010011.
- 3 Sheinkman V., Kurgaeva A., Sedov S., Bezrukova E. Multiphase cryogenesis and incipient paleosol development during MIS 2 in North-Western Siberia: Detailed chronostratigraphy, paleoenvironmental significance, and comparison with the global and European records // *Quaternary International.*– 2024.– Vol. 686-687.– P. 142–159. (Available online 01.05.2023; 20.03.2024)).– DOI: 10.1016/j.quaint.2023.04.011
- 4 Bezrukova E.V., Reshetova S.A., Kulagina N.V., Shchetnikov A.A., Filinov I.A., and Academician Kuzmin M.I. Vegetation and Climate in the North of the Minusinsk Basin in the Late Holocene: A Record from Shira Lake Resolved by Decade // *Doklady Earth Sciences.*– 2024.– 518(2).– P. 1755–1760. (11.08.2024).– DOI: 10.1134/S1028334X2460316X.
- 5 Волчатова Е.В., Безрукова Е.В., Кулагина Н.В., Решетова С.А., Щетников А.А., Крайнов М.А. История растительности долины реки Сенцы (Окинское плато, Восточный Саян) за последние 4700 лет. // *Геосферные исследования.*– 2024.– №1.– С. 60-71.– DOI: 10.17223/25421379/30/4
- 6 Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Демьянович В.М. Разнонаправленная динамика химического состава воды Байкальской экосистемы (Байкал, притоки, исток р. Ангара) // *Геология и геофизика.*– 2024.– т. 65 (3).– с. 386–400.– DOI: 10.15372/GiG2023162

- 7 Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I. The Role of Rare Alkalis (Li, Rb, and Cs) as Indicators in Water of the Baikal Geosystem, Russia // *Doklady Earth Sciences.*– 2024.– 518(1).– P. 1457–1464 (01.07.2024).– DOI: 10.1134/S1028334X2460261X
- 8 Долгих П.Г., Полетаева В.И., Пастухов М.В. Условия формирования гидрохимического режима р. Вихорева и Усть-Вихоревского залива (Усть-Илимское водохранилище) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.*– 2024.– Т. 335(3).– с. 92-107.– DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4524
- 9 Reshetova S.A., Bezrukova E.V., Academician Kuzmin. Variability of *Ephedra Dahurica* Turcz. Pollen as an Indicator of Humidity for the Modern Climate of Southeastern Transbaikalia // *Doklady Earth Sciences.*– 2024.– Vol. 518 (2).– P. 1747-1754. (11.08.2024) DOI: 10.1134/S1028334X24603158
- 10 Solotchina E.P., Solotchin P.A., Bezrukova E.V., Zhdanova A. N., Shchetnikov2 A.A., Danilenko I.V., Kuzmin M.I. Mineralogical Indicators of the Holocene Climate in Sediments of the High-Mountain Lake Sagan-Nur (East Sayan Mountains) // *Doklady Earth Sciences.*– 2024.– 517(2).– P. 1332–1339. (11.06.2024).– DOI: 10.1134/S1028334X24602220 (ИФ = 0,7 Q4))
- 11 Цветкова Е.А., Полетаева В.И., Пастухов М.В. Характеристика сточных вод промышленной зоны г. Усолья-Сибирского и их влияние на гидрохимический состав р. Ангары в периоды с разной техногенной нагрузкой // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.*– 2024.– Т. 335.– № 5.– С. 39–58.– DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4314

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2024 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	11
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	единиц	11
Количество монографий (глав в монографиях)	единиц	1
Количество публикаций в сборниках конференций	единиц	3
Число тезисов в конференциях	единиц	15