

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

УДК 550.4:552.57/.58)

Рег № НИОКТР 121041500059-6

Инв. № _____



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИГХ СО РАН,
Д. Г. - М. Н.

А.Б. Перепелов

«26» января 2024 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

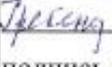
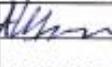
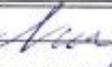
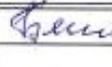
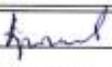
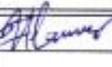
Протокол Ученого совета ИГХ СО РАН
№ 1 от «25» января 2024 г.

Руководитель темы
доктор географических наук

 25.01.2024 Е.В. Безрукова
(подпись, дата)

Иркутск 2023

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ:

Руководитель темы, гнс., д-р географич. наук	 подпись, дата	Е. В. Безрукова (реферат, введение, раздел 5.3, заключение, компиляция отчета)
Исполнители: внс, д-р. геол.-мин. наук	 подпись, дата	В.И. Гребенщикова (раздел 2)
снс, канд. биол. наук	 подпись, дата	М.В. Пастухов (раздел 3)
снс, канд. геол.-мин. наук	 подпись, дата	В.И. Полетаева (раздел 3)
снс, канд. геол.-мин. наук	 подпись, дата	А.А. Щетников (раздел 5.1)
снс, канд. мед. наук	 подпись, дата	Е.А. Мамонтова (раздел 1)
снс, канд. биол. наук	 подпись, дата	А.А. Мамонтов (раздел 1)
снс, канд. геол.-мин. наук	 подпись, дата	Г.А. Белоголова (раздел 4)
нс, канд. геол.-мин. наук	 подпись, дата	М.А. Крайнов (раздел 5.2, оформление отчета по ГОСТу)
нс, канд. геол.-мин. наук	 подпись, дата	А.А. Амосова (раздел 5.3)
нс, канд. геол.-мин. наук	 подпись, дата	Е.В. Иванов (раздел 6)
мнс, канд. геол.-мин. наук	 подпись, дата	Б.А. Баенгуев (раздел 4)
нс	 подпись, дата	С.А. Решетова (раздел 5.3)

Ключевые слова: научно-исследовательская работа, промежуточный отчет.

РЕФЕРАТ

Отчет 74 с., 1 кн., 29 рис., 1 табл., 71 источник, 1 прил.

СТОЙКИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ, РАСТИТЕЛЬНЫЕ СООБЩЕСТВА, УРБАНИЗИРОВАННЫЕ ТЕРРИТОРИИ, ВОДА, ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, БАЙКАЛЬСКАЯ ЭКОСИСТЕМА, МЫШЬЯКОВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ, ФИТОСТАБИЛИЗАЦИЯ, БИОМАГНИФИКАЦИЯ, БИОИНДИКАЦИЯ, ПЛАНКТОН, НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ГЕОХИМИЯ, ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ОЗЕР, ОПОРНЫЕ РАЗРЕЗЫ, ПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕН

Объектами исследования были высшая наземная растительность, химический состав воды в Байкальской экосистеме, техногенные системы «почва-растение», система «вода-планктон» Братского водохранилища, разногенетические отложения плейстоцена-голоцена региона.

Цель исследований – изучение пространственно-временной изменчивости природной среды юга Восточной Сибири в настоящем и прошлом, установление механизмов и причин этих изменений. В результате изучены особенности распределения ПХБ и ХОП в растительных сообществах наземных экосистем в антропогенно-измененном районе Прибайкалья на примере лесных сообществ в рекреационной зоне гор. Иркутска. Исследован механизм поведения As в техногенной системе «почва-растение» и его взаимодействии с биогенными макроэлементами растений. Установлено важнейшее значение корневой системы пырея *Elytrigia repens* для фитостабилизации мышьякового загрязнения. Выявлена связь изменений концентраций урана с геолого-геохимическими особенностями строения Байкальской экосистемы, региональным климатом и сейсмотектонической активностью. Изучено поведение потенциально токсичных элементов в системе «вода – фитопланктон – зоопланктон» и дана биогеохимическая оценка загрязнения заливов Братского водохранилища.

Обоснована роль разреза субаэральных отложений Улан-Жалга в качестве важнейшего опорного разреза континентального квартера Байкальского региона. Показано значение изменчивости величин магнитной восприимчивости в донных отложениях оз. Байкал, еще одного ценного источника информации об эволюции природной среды региона. Реконструирована история осадконакопления в ледниковых озерах Восточных Саян за последние 13200 лет с позиций изменения регионального климата под воздействием его глобальных сдвигов.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	8
Основная часть.....	9
1 Исследование особенностей распределение ПХБ и ХОП в наземной растительности в антропогенно измененном районе Прибайкалья	9
1.1 Введение.....	9
1.2 Материалы и методы.....	9
1.3 Результаты и обсуждение.....	11
1.4 Заключение.....	18
2 Изменения концентраций урана в воде Байкальской экосистемы	19
2.1 Введение.....	19
2.2 Материалы и методы.....	20
2.3 Результаты.....	20
2.3.1 Подземная вода Байкала (скважины).....	20
2.3.2 Вода притоков оз. Байкал.....	23
2.3.3 Вода оз. Байкал.....	25
2.3.4 Исток Ангары.....	26
2.4 Заключение.....	29
3 Техногенные и природные источники поступления, процессы миграции и аккумуляции потенциально токсичных элементов в водных и наземных экосистемах.....	30
3.1 Введение.....	30
3.2 Материалы и методы.....	30
3.3 Результаты и их обсуждение.....	33
3.4 Заключение.....	37
4 Биогеохимические процессы транслокации мышьяка в системе «почва – растения» и его взаимодействие с биогенными макроэлементами на территории бывшего металлургического завода гор. Свирска	38
4.1 Введение.....	38
4.2 Объекты и методы	38
4.3 Результаты исследований и их обсуждение.....	39
4.4 Заключение.....	42
5 Пространственно-временная изменчивость природной среды Восточной Сибири в плейстоцене-голоцене.....	43

5.1	Строение и условия формирования верхнекайнозойских отложений опорного разреза Улан-Жалга (Западное Забайкалье).....	43
5.1.1	Введение.....	43
5.1.2	Методы.....	43
5.1.3	Результаты и их обсуждение.....	45
5.1.4	Заключение.....	48
5.2	Первые результаты изучения донных отложений пролива Малое Море и залива Култук (оз. Байкал).....	48
5.2.1	Введение.....	48
5.2.2	Материалы и методы.....	48
5.2.3	Результаты.....	49
5.2.4	Заключение.....	50
5.3	Эволюция ландшафтов и климата В. Саяна в позднеледниковое время и в голоцене	51
5.3.1	Введение.....	51
5.3.2	Общая характеристика района исследования.....	51
5.3.3	Материалы и методы.....	52
5.3.4	Результаты и их обсуждение.....	53
5.3.5	Заключение.....	57
6	Определение элементных характеристик донных осадков озера Хубсугул (Монголия) для реконструкции условий формирования осадочного выполнения озерной впадины на протяжении последнего миллиона лет.....	57
6.1	Введение.....	57
6.2	Материалы и методы.....	58
6.3	Результаты и обсуждение.....	58
6.4	Заключение.....	60
	Заключение.....	61
	Список использованных источников.....	63
	Приложение А. Список публикаций 2023 г. по теме исследований.....	70

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

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

АМЗ – Ангарский металлургический завод

б. - большой

БВ – Братское водохранилище

в.д. – восточная долгота

ВС – Восточный Саян

в т.ч. – в том числе

г – грамм

г. – год

гг. – года

гор. – город

ГХЦГ – гексахлорциклогексан

ГЭС – гидроэлектростанция

ДДД – дихлордифенилдихлорэтан

ДДТ – дихлордифенилтрихлорэтан

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

др. – другие

зал. – залив

ИК – инфракрасный

ИЮПАК – Международный союз теоретической и прикладной химии

кал. – калиброванный

кг - килограмм

км – километр

КН – коэффициент накопления

л – литр

л.н. – лет назад

ЛПК – лесопромышленный комплекс

м – метр

мг – миллиграмм

мкг – микрограмм

мкм – микрометр

мл – миллилитр

мм – миллиметр
нг – нанограмм
о. – остров
оз. – озеро
ок. – около
осч – относительно соотношение частей
п-в – полуостров
ПДК – предельно допустимая концентрация
ПХБ – полихлорированные бифенилы
пос. – поселок
р. – река
РЗЭ – редкоземельные элементы
РФА – рентгенофлуоресцентный анализ
с – секунда
см – сантиметр
СОЗ – стойкий органический загрязнитель
с.ш. – северная широта
ТЭЦ – тепловая электроцентраль
УМС – ускорительная масс-спектрометрия
ХОП – хлорорганические пестициды
ЦКП – центр коллективного пользования
ч – час
BAF – индексы биоаккумуляции
BMF – индекс биомагнификации
CF – однофакторный индекс загрязнения
CIA – показатель химической изменчивости
M_w – моментная магнитуда
LOI – потери при прокаливании
XRD – рентгеновская дифрактометрия

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Исследование особенностей распределение ПХБ и ХОП в наземной растительности в антропогенно измененном районе Прибайкалья

1.1 Введение

Стойкие органические загрязнители, включая полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды, в т.ч. дихлордифенилтрихлорэтан и его метаболиты и изомеры гексахлорциклогексан, токсичные и способные накапливаться по пищевым цепям и сохраняться в объектах окружающей среды длительное время соединения [1]. В результате регионального и трансграничного атмосферного переноса от источников образования и/или применения ПХБ и ХОП могут распространяться на значительные расстояния [2]. Перераспределение СОЗ в системе почва-воздух регулируется многими факторами, среди которых определенную роль играют растительные сообщества [3], отдельные представители которых могут также служить косвенными показателями загрязнения атмосферного воздуха [4].

Искусственные растительные сообщества в виде зеленых насаждений в пределах населенных пунктов играют не только декоративно-художественную, архитектурно-эстетическую, рекреационную и т.п. роли, но и служат для санитарно-гигиенической или оздоровительной цели [5]. При этом растения в таких антропогенно измененных районах подвергаются повышенной нагрузке в сравнении с естественными природными районами (обедненные питательными веществами почвы, задымленность, запыленность воздуха, механические повреждения растений, болезни и вредители растений и т.п.) [5].

Цель настоящей работы: изучить особенности распределения ПХБ и ХОП в растительных сообществах в антропогенно-измененном районе Прибайкалья.

Задачи: определить распределение ХОП и ПХБ в растительности в антропогенно-измененном районе; изучить взаимосвязь концентраций ХОП и ПХБ в растительности с концентрациями в почвах и атмосферном воздухе.

1.2 Материалы и методы

Для исследований были выбраны комплексы фитоценозов лесного типа в рекреационных зонах гор. Иркутска, где поступление ПХБ и ХОП в районы исследования обусловлено региональным и локальным атмосферным переносом атмосферных эмиссий промышленных предприятий городов Иркутско-Черемховского промышленного узла, а также испарений/возгонкой ХОП из почв прилегающих сельскохозяйственных полей, где ранее применяли ХОП [6].

В Иркутске пробы отбирались на станциях (1) в насаждениях лиственных деревьев (лиственный лес), с преобладанием березы и осины, ($52^{\circ}14'38,4''$ с.ш. и $104^{\circ}15'45,6''$ в.д.) и (2) насаждениях хвойных деревьев (сосновый лес) ($52^{\circ}14'38,0''$ с.ш. и $104^{\circ}15'45,0''$ в.д.) (Рисунок 1). На станциях отмечались следы прошлых пожаров.

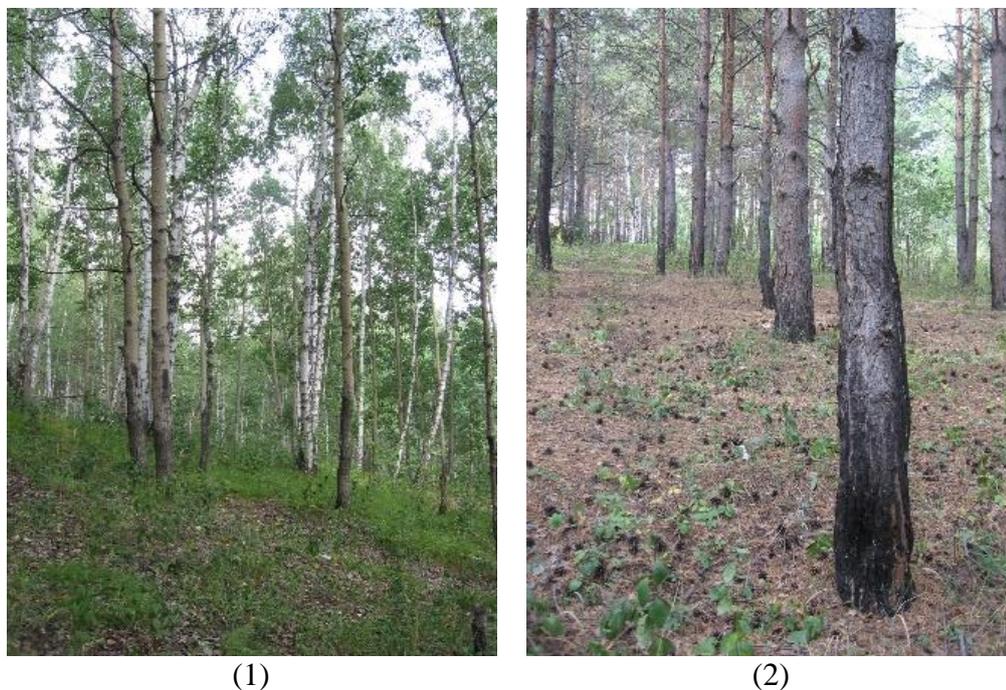


Рисунок 1 – Фотографии исследованных растительных сообществ

На этих же станциях отобраны пробы верхнего слоя почв (0–3 см).

Были исследованы травянистая растительность семейств злаковых и бобовых, мох, листья березы и осины или хвоя второго года и кора сосны. Пробы упаковывали в алюминиевую фольгу и до анализа хранились при температуре -20°C .

Анализ проб производился в ИГХ СО РАН. Листья, хвоя и кора измельчались до размера 0,5–1,0 см с использованием металлических ножниц, предварительно промытых с использованием хозяйственного мыла и затем смесью ацетон-гексан осч (1:1). Пробы были высушены при комнатной температуре до постоянного веса. Пробоподготовка образцов включала экстракцию в аппаратах Сокслетта смесью ацетон:гексан (1:1) в течении 8 ч; очистку с использованием геляпроникающей 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, включая индикаторные ПХБ (№№ ИЮПАК 28, 52, 101, 138, 153, 180), а также хлорорганические пестициды (ХОП), включая p,p'-дихлордифенилтрихлорэтан (p,p'-ДДТ), p,p'-дихлордифенилдихлорэтан (p,p'-ДДД), p,p'-дихлордифенилдихлорэтилен (p,p'-ДДЭ), 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.

1.3 Результаты и их обсуждение

Суммарное содержание ХОП в растительности на станциях 1 и 2 в Иркутске изменяется от 1,00–1,21 нг/г сухого веса в травянистых растениях до 2,32–3,47 нг/г сухого веса в листьях березы и осины и 3,71 нг/г сухого веса в пробе мха.

Наибольшие концентрации ХОП были обнаружены в пробе мха, тогда как в фоновом Ольхонском районе, где концентрация суммы ХОП во мху были одними из самых низких [7], что вероятно связано с загрязнением мха частицами почвы с более высокими концентрациями в Иркутске, чем в исследованных почвах Ольхонского района.

Меньшие величины суммы ХОП были найдены в листе сосны и березы (3,47 и 2,32 нг/г сухого веса, соответственно), затем в коре и хвое сосны (1,85 и 1,61 нг/г сухого веса).

Концентрации ХОП в листьях березы и осины были выше, чем в хвое и коре сосны, несмотря на более длительный период времени экспозиции у хвои и коры сосны, чем у листьев березы и осины. Подобное превышение ХОП в листьях березы над концентрациями в хвое сосны было найдено ранее и на других станциях южного Прибайкалья [8]. Было предположено, что это связано с большей площадью листовой пластинки и особенностями формирования листьев. Например, при осаждении газообразных и связанных с твердыми частицами СОЗ лучше задерживаются на клейких молодые листьях, чем на более сухой поверхности хвои. С другой стороны, в проведенных ранее исследованиях распределения СОЗ в растительных сообществах лесного типа в фоновом районе [7], а также в коре сосны на других станциях в южном Прибайкалье [8] концентрации в коре сосны были самыми высокими в сообществе или значительно превышали уровень содержания СОЗ в листьях березы и коррелировали с уровнями накопления СОЗ в почвах. В настоящем исследовании распределения СОЗ в растительном сообществе на антропогенно-измененной территории концентрации ХОП в коре сосны лишь на 15% выше концентраций ХОП в хвое сосны и в 1,2–1,9 раза ниже, чем в листьях березы и осины, что предполагает сохранение поступления ХОП в окружающую среду на данной территории практически на одном уровне в течении периода времени необходимого для развития исследованного пробкового слоя коры сосны.

В травянистых растениях на урбанизированной территории величины суммы ХОП были наименьшими среди исследованных проб растений, как и в фоновом Ольхонском районе.

Соотношение отдельных соединений в сумме ХОП может изменяться в отдельных пробах растительности и почв в зависимости от физико-химических свойств и, соответственно, степени подвижности каждого соединения в окружающей среде, а также морфологии и физиологии растения.

Соотношение суммы α -ГХЦГ и суммы ДДТ и его метаболитов в растениях несколько отличается от найденного в почвах, отобранных там же. В почвах в суммарной величине ХОП доминируют p,p' -ДДТ и его метаболит p,p' -ДДЭ (59–68 и 24–36%, соответственно), то в большинстве проб растений их доли составляют 41–66 и 16–34%, соответственно. За исключением только пробы хвои сосны, где доминирует α -ГХЦГ (41 % от суммы ХОП), доли p,p' -ДДТ и p,p' -ДДЭ уменьшаются до 29 и 19%, соответственно.

Отношение α -ГХЦГ/ γ -ГХЦГ в пробах растительности и в почвах выше составляет 1,1–4,2 и 2,5–4,8, соответственно, что предполагает поступление технической смеси ГХЦГ, состоящей в основном из α -изомера ГХЦГ (53–70% α -изомера, 3–14% β -изомера, 11–18% γ -изомера, 6–10% δ -изомера, 3–5% других изомеров ГХЦГ [9]), а не линдана (99% γ -ГХЦГ) на данной территории. α -ГХЦГ/ γ -ГХЦГ > 1 предполагает поступление технической смеси, а меньше 1 – линдана [10].

По величине α -ГХЦГ/ γ -ГХЦГ исследованные пробы растительности распределяются в следующем порядке: травянистая растительность (1,10–1,14) < листья осины (1,16) < листья березы (1,29) < мох (2,35) < кора сосны (3,42) < хвоя (4,19). В почвах α -ГХЦГ/ γ -ГХЦГ=2,55–4,82. В атмосферном воздухе в Иркутске в весенне-летний период этого года α -ГХЦГ/ γ -ГХЦГ=2,3 и в зимний период – 7,15 [6].

Такое распределение предполагает фильтрующую способность хвойной древесной растительности ГХЦГ, особенно α -изомера, из атмосферного воздуха в течении года, включая зимний период года, в сравнении с травянистой растительностью и лиственными деревьями (ограничено сезоном вегетации), что подтверждается большими концентрациями α -ГХЦГ в хвое сосны, чем в листьях березы и осины (в 2,6–2,8 раз), в прошлогоднем опаде и в почвах в сосновом лесу, чем в лиственном лесу (0,68 и 0,14 нг/г сухого веса и 0,28 и 0,12 нг/м², соответственно), при схожих концентрациях γ -ГХЦГ в хвое сосны и в листьях березы и осины (0,16 и 0,19–0,20 нг/г сухого веса, соответственно).

Отношение (p,p' -ДДД+ p,p' -ДДЭ)/ p,p' -ДДТ во всех пробах растительности и почв в настоящем исследовании были ниже 1, что говорит о «свежем», недавнем поступлении ДДТ в экосистему данной территории [10]. Наименьшая величина отношения (p,p' -

ДДД+р,р'-ДДЭ)/р,р'-ДДТ найдена в пробе мха (0,35). В остальных пробах растительности она изменялась от 0,63 в листьях березы до 0,72 в коре сосны и с максимумом в травянистой растительности (0,85–0,86). В почвах $(p,p'-\text{ДДД}+p,p'-\text{ДДЭ})/p,p'-\text{ДДТ} = 0,39-0,63$. В год отбора проб растительности в воздухе весной-летом это отношение составляло 1,12–1,45 и зимой – 1,82, при том, что в предыдущие года в воздухе часто отмечались $(p,p'-\text{ДДД}+p,p'-\text{ДДЭ})/p,p'-\text{ДДТ}$ меньше единицы [6], что говорит о постепенном прекращении «свежего» поступления ДДТ в рассматриваемую экосистему посредством атмосферного переноса. Однако, испарение накопленного в почвах ДДТ еще оказывает влияние на содержание и относительный состав исходного пестицида ДДТ и его метаболитов в растениях.

Суммарное количество ПХБ в исследованных пробах растительности в среднем составляют 16,4 нг/г сухого веса, медиана – 13 нг/г сухого веса. Доля шести индикаторных конгенов ПХБ в сумме всех конгенов ПХБ составляет в среднем 29% (27–31%), как и в растительных сообществах в фоновом Ольхонском районе [7]. Наибольшие величины суммы всех исследованных конгенов ПХБ найдены в листьях березы и осины (24–40 нг/г сухого веса), меньшие значения найдены в пробах мха и травянистых растений семейства бобовые. Самое низкое содержание ПХБ найдено в коре сосны < травянистые растения травах семейства злаковых < хвое сосны (7,7–9,7 нг/г сухого веса).

Уровни накопления ПХБ в почвах лиственного леса составляют 29 нг/м², соснового леса – 25 нг/м². Доля шести индикаторных конгенов ПХБ – 33% в обеих пробах. В гомологическом составе ПХБ в почвах доминируют пентаХБ (46–51%) и гексаХБ (32–33%) (Рисунок 2).

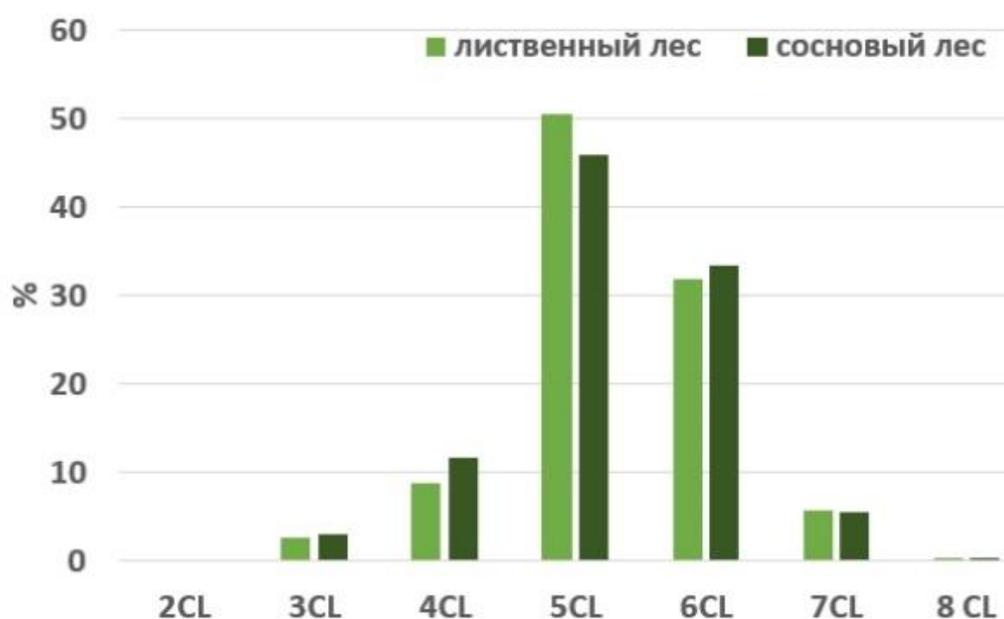


Рисунок 2 – Относительный гомологический состав ПХБ в исследованных почвах лиственного и соснового лесов в рекреационной зоне г. Иркутска [6] (%)

В гомологическом составе ПХБ в растительных почвах также доминируют пентаХБ (до 51% в листьях осины и травянистых растениях семейства бобовые) (Рисунок 3). Доли тетраХБ и гексаХБ в сумме ПХБ примерно одинаковые (20–22 и 18–22%, соответственно), что отличается от состава ПХБ в почвах и атмосферном воздухе (Рисунки 2, 4). Смещение в сторону увеличения низкохлорированных (триХБ и тетраХБ) относительно высокохлорированных (пентаХБ и гексаХБ) соединений происходит в результате большей способности низкохлорированных ПХБ к испарению с поверхности почв и к атмосферному транспорту.

Исключение составляет гомологический состав в пробе мха, в котором тетраХБ вносят 12%, а гексаХБ – 32% в сумму ПХБ, что близко по относительному составу гомологов ПХБ в почвах (Рисунок 2) и предполагает преимущественное поступление ПХБ абсорбированных на частицах почв, что подтверждается взаимосвязью распределения конгенов ПХБ в почвах и во мхе (Рисунок 5).

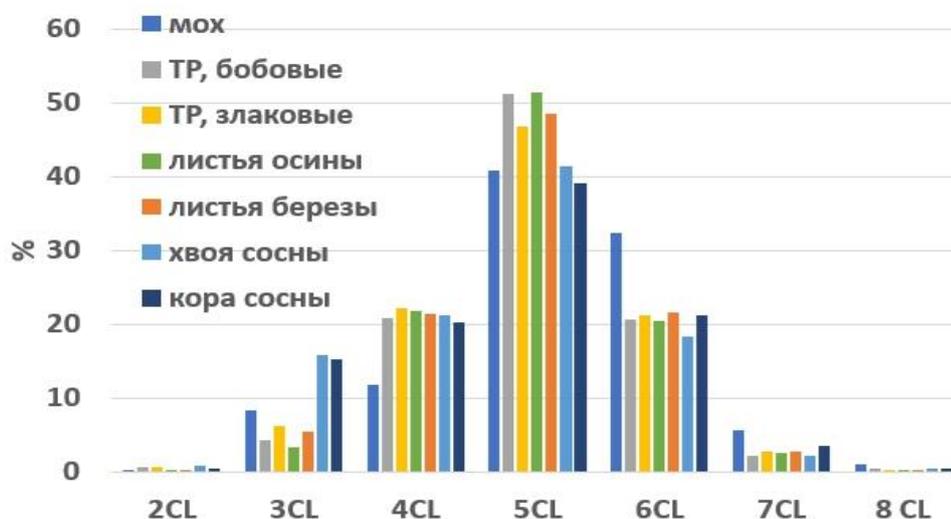


Рисунок 3 – Гомологический состав ПХБ в растениях (%)

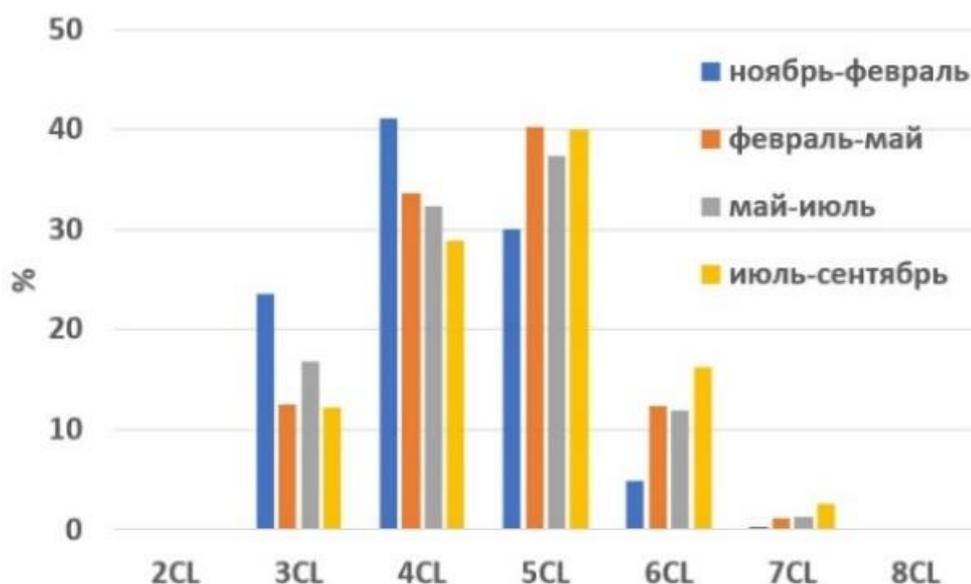


Рисунок 4 – Относительный гомологический состав ПХБ в атмосферном воздухе в Иркутске в год исследования (б) [б] (%)

В пробах коры и хвои сосны в гомологическом составе ПХБ увеличена доля триХБ (15-16%, в остальных пробах растительности, кроме мха, – 3,3-8,3%) за счет некоторого уменьшения доли пентаХБ (39-41%, в остальных пробах растительности – 47-51%).

Учитывая более длительный период экспозиции коры и хвои сосны относительно исследованных органов других растений и смещение гомологического состава ПХБ в атмосферном воздухе зимой в сторону низко хлорированных гомологов ПХБ (Рисунок 4), можно предположить значительное влияние на накопление ПХБ в данных органах хвойных растений за счет осаждения из атмосферного воздуха. При этом нет значительной разницы в гомологическом составе ПХБ в коре и хвое сосны, что говорит об примерно одинаковом уровне экспозиции ПХБ в течении формирования как пробкового слоя коры (несколько лет), так и хвои сосны (до 2х лет).

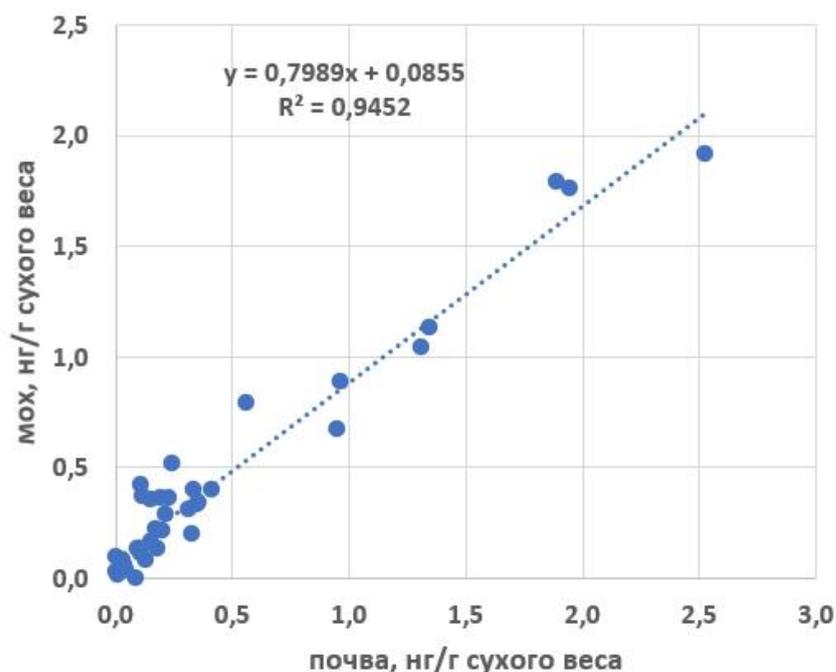


Рисунок 5 – Взаимосвязь содержания отдельных конгенов ПХБ в почвах и во мхе в лиственном лесу

Таким образом, гомологический состав ПХБ в исследованных органах растений представляет собой результат преимущественно комбинированного поступления ПХБ из атмосферного воздуха и посредством испарения ПХБ с поверхности почв в районе произрастания растений, а также непосредственно ПХБ, адсорбированных на частицах почв. Возможно также поступление в растения токсикантов в результате поглощения из почв ПХБ подземной частью растения и транспорта в надземную часть растения [11].

Для характеристики накопления растениями рассмотренных ПХБ и ХОП рассчитаны коэффициенты накопления растение/почва (Рисунки 6, 7) и растение/воздух (Рисунки 8, 9).

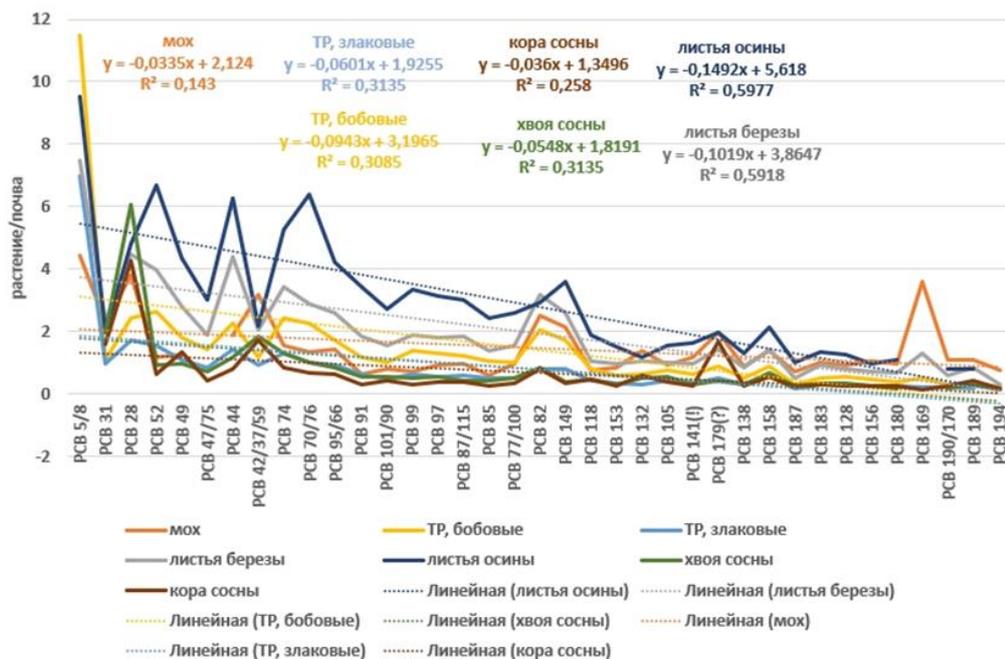


Рисунок 6 – Коэффициенты накопления отдельных конгенов ПХБ растения / почва (номера конгенов ПХБ в соответствии с классификацией ИЮПАК)

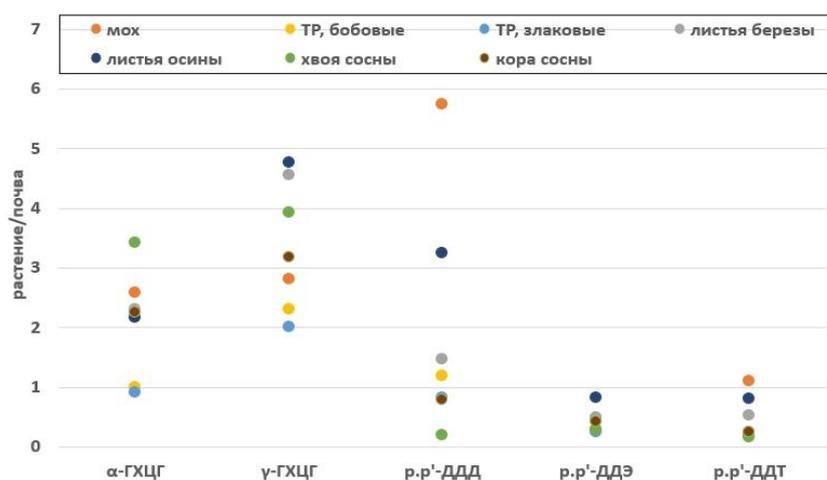


Рисунок 7 – Коэффициенты накопления отдельных ХОП растения / почва

Установлено, что КН зависят от вида и структурной части растения, а также от химической структуры СОЗ (например, уровня хлорирования конгенера ПХБ). КН в листьях деревьев обычно выше, чем в остальных растительных объектах. При этом в листьях осины выше, чем в листьях березы. КН растение/почва уменьшаются по мере увеличения количества атомов хлора в молекуле ПХБ, а КН растение/воздух – наоборот увеличиваются.

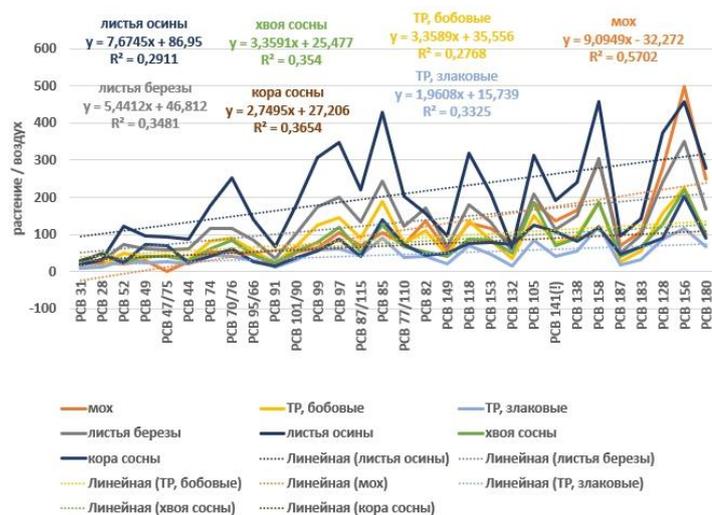


Рисунок 8 – Коэффициенты накопления отдельных конгенов ПХБ растения / воздух (номера конгенов ПХБ в соответствии с классификацией ИЮПАК)

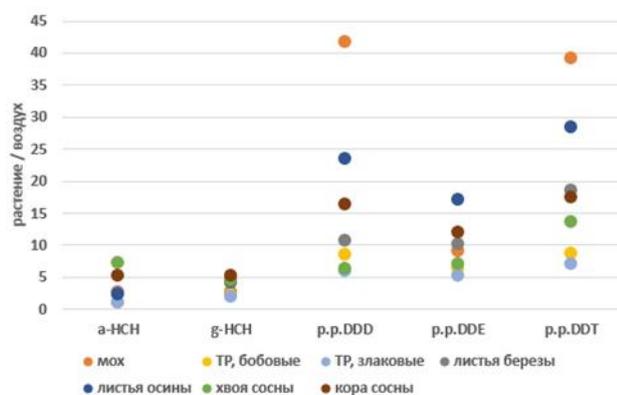


Рисунок 9 – Коэффициенты накопления отдельных ХОП растения / воздух

И эти изменения также более выражены для листьев деревьев (Рисунки 6, 8). Среди исследованных ХОП КН растение/почва выше для изомеров ГХЦГ (КН (γ -ГХЦГ) > КН (α -ГХЦГ)), а КН растение/воздух – для ДДТ и его метаболиты ДДЭ (КН (ДДЭ) < КН (ДДТ)). Четкой зависимости накопления от вида растительности нет. Однако, для листьев осины также КН γ -ГХЦГ и ДДЭ были одними из самых высоких.

1.4 Заключение

Таким образом, в 2023 г. изучены особенности распределения ПХБ и ХОП в растительных сообществах наземных экосистем в антропогенно-измененном районе Прибайкалья на примере лесных сообществ в рекреационной зоне гор. Иркутска. Показано, что хвойные деревья в сравнении с травянистой растительностью и лиственными деревьями обладают фильтрующей способностью СОЗ в течении года. Относительный состав гомологов ПХБ и ДДТ и его метаболитов в растениях, почве и атмосферном воздухе предпола-

гает комбинированное поступление в растения ПХБ и ДДТ в результате атмосферного переноса, испарения с поверхности почв в районе произрастания растений и с частицами почв. Величины коэффициентов накопления растения-почва и растение-воздух зависят от вида и структурной части растения, а также от химической структуры СОЗ.

2 Изменения концентраций урана в воде Байкальской экосистемы

2.1 Введение

Уран относится к числу довольно распространенных в земной коре элементов, и в небольших количествах он есть везде: в горных породах, почвах, воде, растениях и других средах. Различные концентрации урана есть и в сопряженных водных объектах Байкальской рифтовой зоны: в воде Байкала и его притоков и в воде его единственного стока – реке Ангаре. Озеро Байкал занимает центральную часть сейсмически активной Байкальской рифтовой зоны, что подтверждается постоянными здесь землетрясениями и геодинамическими подвижками [12]. В регионе интенсивно протекала вулканическая, магматическая деятельность [13, 14], в результате в геологическом строении Байкальского региона представлены разновозрастные образования от архея до кайнозоя, имеющими состав от основных до кислых и щелочных. Соответственно, комплекс горных пород вокруг Байкала имеет различную геохимическую и металлогеническую специализацию, что, несомненно, оказывает влияние на химический состав многочисленных притоков Байкала и, соответственно, на воду самого озера.

С восточной стороны оз. Байкал находится огромный Ангаро-Витимский батолит палеозойского возраста, также представленный большим разнообразием пород от габброидов, монцодиоритов до гранитов и щелочных сиенитов [15]. Породы батолита дренируют многочисленные притоки Восточного Прибайкалья (реки Томпуда, Усть-Баргузин, Турка и др.).

В самом озере вода вдоль берегов и в каждой из его трех котловин движется против часовой стрелки, кроме того, система течений в озере осложнена подъемом глубинной воды в пелагиальной зоне Байкала и опусканием поверхностной воды в литоральных зонах (апвеллинг/даунвеллинг) Байкала [16]. За счет последнего процесса происходит постоянное перемешивание и обновление воды Байкала. Кроме этого, возможно поступление глубинной (ювенильной) воды при землетрясениях и геодинамических подвижках [17–19], что также способствует постоянному обновлению воды Байкала. Зимой Байкал замерзает, а исток Ангары нет [20], что позволяет проводить геохимические исследования воды истока Ангары в мониторинговом (ежемесячном) режиме.

Целью наших исследований было нахождение возможных причин значимых различий в распределении урана в воде ряда компонентов Байкальской экосистемы – в скважинах в береговой зоне озера и на острове Ольхон, в воде самого озера, устьев его крупных притоков и в воде озерного стока – реки Ангары. Ранее такие отличия были выявлены преимущественно при сравнении воды истока Ангары и Байкала [21].

2.2. Материалы и методы

Для анализа мы использовали результаты многолетнего ежегодного (и ежемесячного) мониторинга состава воды истока Ангары (1997–2022 гг.), а также данные анализа проб воды устьев притоков, скважин, поверхностной и глубинной воды оз. Байкал. Химический анализ включал определение содержаний широкого круга элементов, урана в том числе. Определение концентрации урана в воде проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ELEMENT 2, “Finnigan MAT”, Германия) с использованием научного оборудования аккредитованного и сертифицированного аналитического центра “Изотопно-геохимические исследования” Института геохимии СО РАН [22]. На месте отбора проб воды на анализ использовался фильтр 0,45 мкм, консервация пробы проводилась азотной кислотой.

Из значительного числа притоков Байкала (> 360) опробовались устья, в основном, крупных и доступных для изучения притоков, всего исследовано 35-40 притоков. Анализы выполнены в 228 пробах воды. Соответственно, в связи с неоднократным опробованием, анализ в некоторых притоках на определение урана выполнялся 3–7 раз в разное время года на протяжении последних 15 лет.

В течение 2011–2022 гг. в самом озере Байкал опробование глубинной и поверхностной воды проводилось преимущественно в самой глубоководной центральной котловине, реже – в южной. Всего определение концентрации урана выполнено для 140 проб воды, из них 80 – вода из глубинных проб и 60 – поверхностных, отобранных в пелагиальной части на всем протяжении оз. Байкал.

2.3 Результаты

2.3.1 Подземная вода Байкала (скважины)

В питьевых водах уран нормируется по химической токсичности. В России предельно допустимая концентрация (ПДК) урана в питьевых водах принята равной 15 мкг/л [23]. Всемирная организация здравоохранения рекомендует норматив 15 мкг/л.

Распределение концентраций урана изучено в скважинах, расположенных в западной береговой части Байкала и на острове Ольхон (рисунок 10). На Ольхоне пробы воды

отбирались в скважинах глубиной до 70 м и анализировались в 2018 и 2020 гг. (весна, осень, зима).

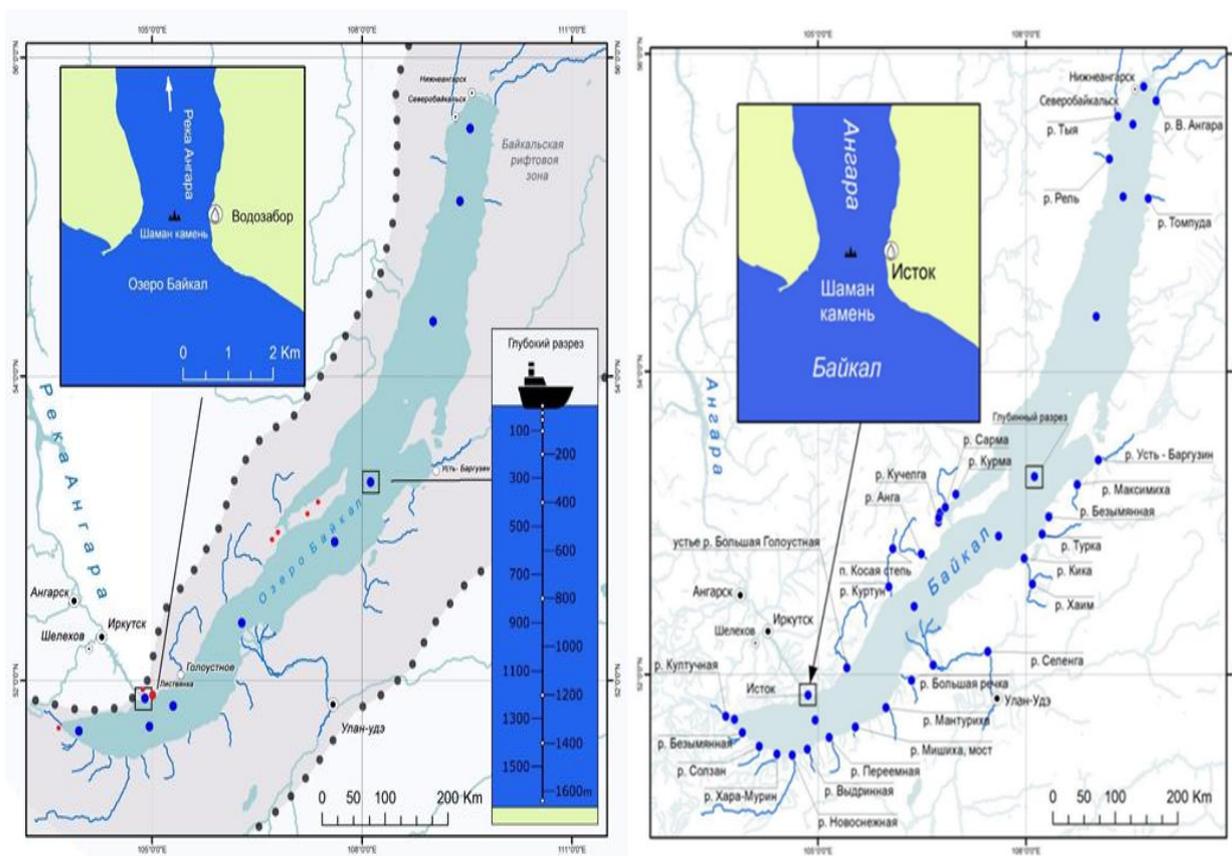


Рисунок 10 – Карта-схема отбора проб воды в Байкальской экосистеме, красным цветом показаны скважины

В пробах подземной воды на о. Ольхон установлены самые высокие концентрации урана (рисунок 11), однако особых различий в содержаниях в зависимости от года отбора проб и сезона не отмечено: 8,2–12,6 мкг/л.

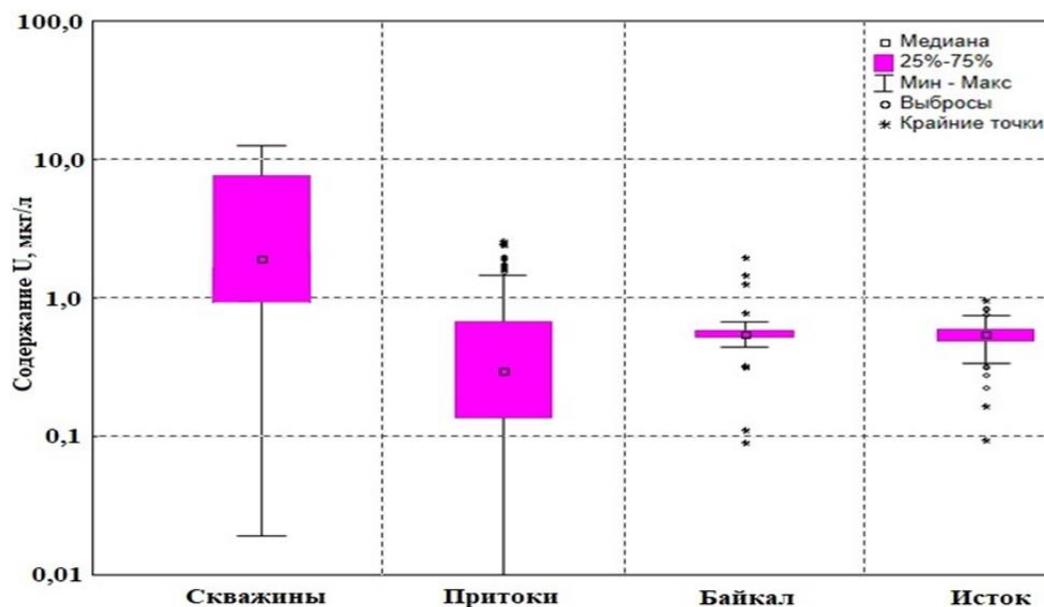


Рисунок 11 – Блок-диаграмма распределения концентраций урана в воде Байкальской экосистемы

Повышенные концентрации урана в подземных водах Ольхона могут быть обусловлены наличием в породах не только обнаруженного В.И. Вернадским урансодержащего «менделеевита», позднее диагностированного как оксиуранобетафит надгруппы пирохлора [24], но и урансодержащего ортита в пегматоидных жилах, характерных для субщелочных габброидов и древних гранитоидов Ольхона [13].

В береговой части Байкала анализ подземной воды из 2 скважин глубиной 60-70 м показал значения концентраций урана в 3,2–5,1 мг/л.

Южнее о. Ольхон, на берегу Байкала в пос. Еланцы, в скважине глубиной около 30 м концентрации урана оказались на порядок ниже и составили 0,74 мг/л. В юго-западной береговой части Байкала (примерно 200–250 км от пос. Еланцы) опробование подземных вод выполнено в двух местах. В пос. Листвянка в береговой части на расстоянии 5 км перед истоком Ангары опробовано 8 скважин разной глубины (5–130 м) (рисунок 10). В геологическом разрезе здесь представлены четвертичные аллювиально-делювиальные отложения и протерозойские магматические породы (граниты, гранодиориты) [25]. Концентрации урана в подземной воде пос. Листвянка изменяются от 0,03 до 5,5 мг/л. Зависимости их значений с глубиной скважин не обнаружено.

В 4 км южнее Байкала, в пос. Никола, в роднике на берегу р. Ангары концентрации урана в 8 пробах 2019–2020 гг. изменяются в пределах 0,7–1,9 мг/л. В воде скважины глубиной 60 м, расположенной недалеко от этого источника, они составляют 0,65 мг/л. Для сравнения, в роднике у пос. Худяково, вода которого пользуется большим спросом у

жителей г. Иркутска, концентрации урана в воде пяти проб в 2019–2020 гг. почти не менялись, составляя 0,04–0,05 мкг/л.

Таким образом, повышенные концентрации урана в подземных водах отмечены только на о. Ольхон и на противоположном берегу через пролив Ольхонские ворота.

2.3.2 Вода притоков оз. Байкал

Результаты анализа воды притоков озера показали повышенные концентрации урана в воде некоторых притоков независимо от сезона и года опробования. К притокам Байкала с повышенными концентрациями урана в воде относятся устья следующих рек: р. Анга (взято 7 проб), концентрации урана - 1,5–2,6 мкг/л; р. Рыты (1 проба) – 2,5 мкг/л, р. Селенга (8 проб) – 1,3–1,6 мкг/л; р. Бугульдейка (3 пробы) – 1,3–1,7 мкг/л (рисунки 12, 13). В остальных изученных притоках концентрации урана в воде составляли меньше 1 мкг/л.

В зависимости от места нахождения рек установлено, что максимальные концентрации урана отмечались на западном берегу оз. Байкал в устьях р. Анги и на северо-западном - р. Рыты. В устьях этих рек в породах залегают палеопротерозойские граниты [14], и найдены урансодержащие минералы [24]. В нескольких близлежащих к р. Анге притоках (Кучелга, Курма, Шида, Бугульдейка и ключ Смородиновый) концентрации урана также повышены и составляют 1,2–2 мкг/л (рисунок 12).

В притоках восточной части Байкала повышенные концентрации урана (до 1–2 мкг/л) отмечены в устьях рек Селенга, Усть-Баргузин и Томпуда. В этой береговой части Байкала расположен крупнейший (площадь более 300 км²) Ангаро-Витимский батолит, сложенный ранне- и познепалеозойскими гранитоидами. Главным носителем урана являются монцони-тоидные породы батолита и более поздние щелочные граниты и сиениты [25]. Источником урана в воде устьев восточных притоков оз. Байкал также может быть поступление урана в притоки при дренировании небольших штоков альбитизированных гранитов, расположенных вблизи восточного берега Байкала, с урансодержащими минералами – фергусонитом и самарскитом [26].

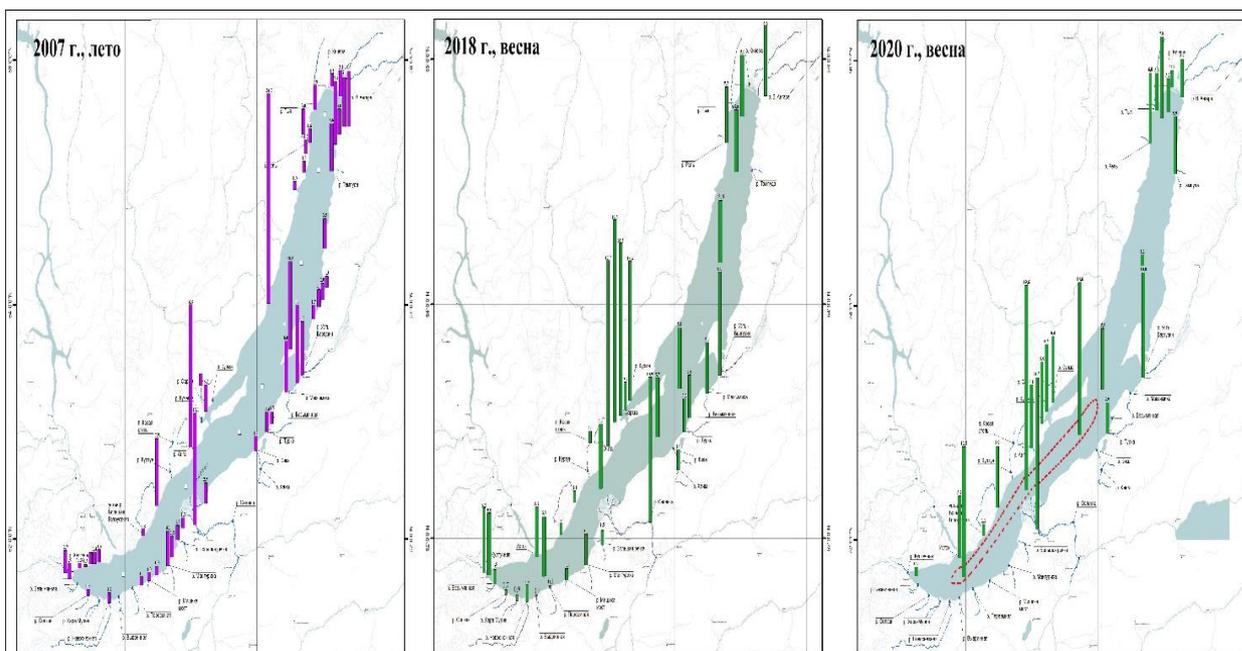


Рисунок 12 – Распределение концентраций урана в поверхностной воде Байкала и в устьях некоторых притоков летом 2007 г., весной 2018 и 2020 гг., красным пунктиром выделены повышенные содержания урана в поверхностной воде южной котловины во время землетрясения весной 2020 г.

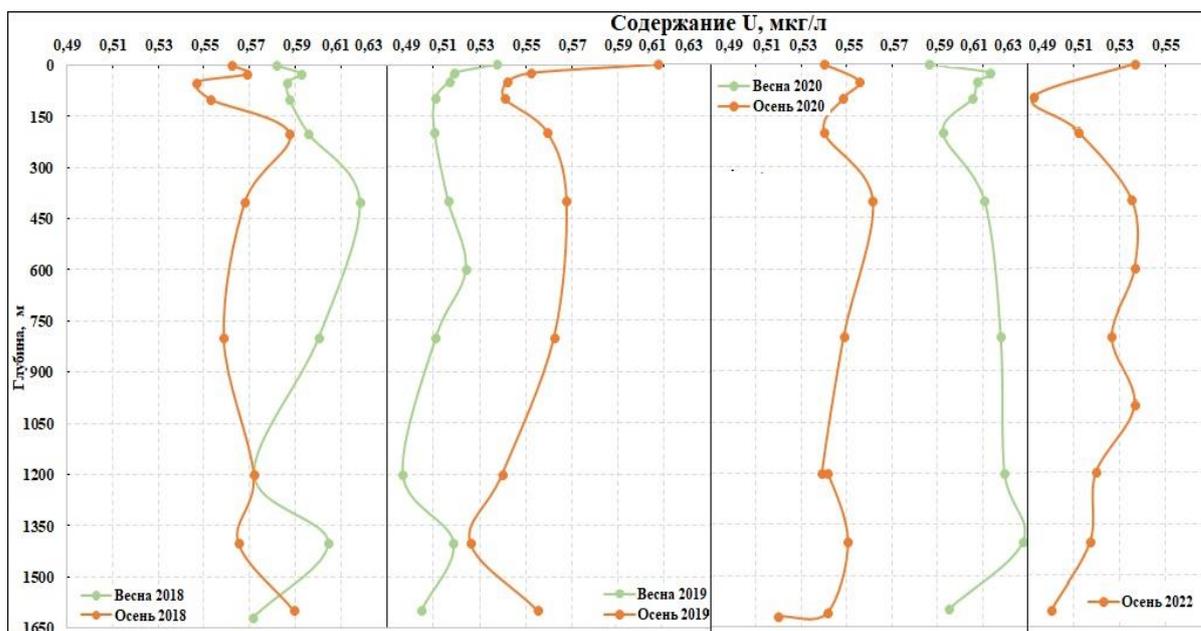


Рисунок 13 – Распределение концентраций урана в глубинной воде Байкала весной (зеленые линии) и осенью (оранжевые линии) в 2018–2022 гг.

Если рассматривать притоки восточного побережья оз. Байкал, то в воде р. Селенги за последние 15 лет постоянно отмечалось повышенные концентрации урана. Река вместе с ее притоками формирует в Забайкалье огромную часть своего водосборного бассейна. Содержание урана в воде р. Селенги заметно выше, чем в других притоках восточного берега озера. Известно, что в одном из притоков р. Селенги расположено урановое место-

рождение, разведка которого приводит к выщелачиванию урана из руд, поступление его в воду и дальнейшему переносу р. Селенгой и ее притоками в оз. Байкал. Кроме этого, промышленные предприятия Монголии также могут оказывать негативное влияние на воду р. Селенги. Однако, в дельте реки формируется обширный геохимический барьер, благодаря которому большая часть токсичных компонентов осаждается в литоральной части оз. Байкала и не вызывает серьезного загрязнения воды Байкала.

2.3.3 Вода оз. Байкал

О.А. Складорова [27] отмечала, что концентрации урана в воде озера приближаются к максимальным значениям, принятым для чистых поверхностных вод мира и характеризуют геохимический фон воды в оз. Байкал. Концентрации ряда других микроэлементов либо близки к средним мировым значениям воды, либо находится на уровне их минимальных показателей.

Результаты показали, что концентрации урана в воде озера довольно стабильны: его медиана и среднее значение различаются в небольших пределах 0,52–0,59 мкг/л. Такие же слабые различия характерны для распределения урана в поверхностной воде оз. Байкал на всем его протяжении с севера на юг (рисунки 11, 12). По глубинному профилю отбора воды в центральной котловине в спокойное время года также не выявлено значимых различий концентраций урана. Не установлено их зависимости в воде оз. Байкал и от сезонов года (весна-осень), они остаются стабильными и близкими (рисунок 13).

В 2018 году в поверхностной воде оз. Байкал повышенных концентраций урана не установлено. Однако в это время зафиксировано повышение концентрации ртути почти в 2 раза выше ПДК рыбохозяйственных водоемов [28]. Именно в начале июня 2020 года, после землетрясения, в поверхностной пелагиальной воде озера были зафиксированы повышенные в 2-4 раза содержания урана. Максимальные концентрации урана, превышающие среднее (0,56 мкг/л) и медиану (0,55 мкг/л), отмечаются за время исследования только в июне 2020 г. и преимущественно в южной части оз. Байкал от о. Ольхон до пос. Листвянка и пос. Танхой (рисунок 12, выделено красным пунктиром). На этом расстоянии (примерно 200–250 км) концентрации урана в поверхностной воде озера в трех точках достигали значений 1,3, 1,5 и 2,0 мкг/л, что в 2–4 раза выше средних и медианных значений для воды оз. Байкал. При этом на севере и юге в пелагиальной части озера значения для урана были минимальными 0,1–0,3 мкг/л, что заметно ниже среднего значения по озеру – 0,54 мкг/л. Эта информация отчетливо отображена на графике (рисунок 12) как максимальными (три крайних нижних точки в южной части озера обведены красным пунктиром), так и минимальными (три крайних точки в северной части озера) значениями урана

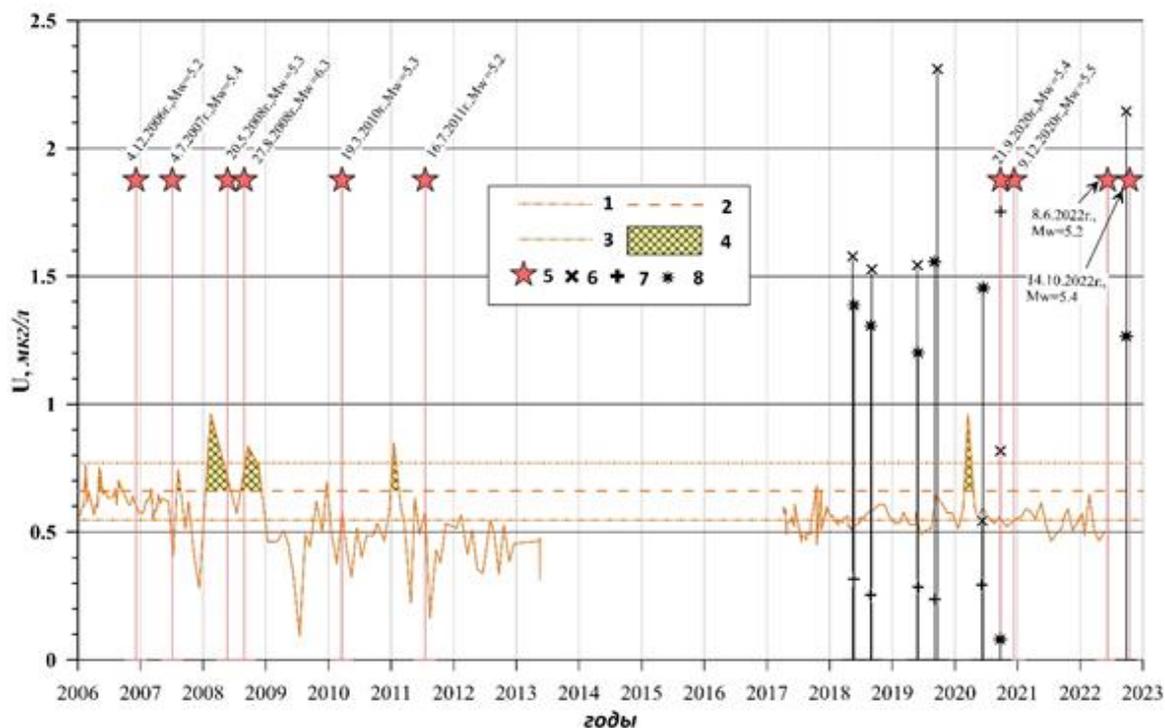
и в изменении распределения концентраций урана на глубину (рисунок 13, весна 2020 г. содержания урана повышено до 0,62–0,63 мкг/л). Такого повышения урана в поверхностной воде в центральной части оз. Байкала за все годы исследований ранее не отмечалось.

Разница между минимальными и максимальными значениями концентраций некоторых других микроэлементов в поверхностных водах Байкала достигает нескольких порядков [28].

Отмеченный период 2020 г. совпадает с многочисленными сейсмическими событиями в районе оз. Хубсугул, которые менее интенсивно отразились на событиях в оз. Байкал. Возможно, что отсутствие более сильных движений в оз. Байкал привели к перемещению и частичному воздействию на придонные железомарганцевые конкреции, характеризующиеся повышенным содержанием в них урана [29]. Заметные изменения в придонной части оз. Байкал происходили в его наиболее глубокой центральной части, что зафиксировано повышением в воде урана, а также других элементов (Th, Nb, Ta, W), характерных для таких конкреций. Последнее свидетельствует о том, что во время землетрясений в Прибайкалье уран мог дополнительно поступать в оз. Байкал с водой притоков, а также при разрушении Fe-Mn конкреций. Возможен также и глубинный привнос [30].

2.3.4 Исток Ангары

За прошедшие годы (2006–2022 гг.) для воды истока выполнено 194 анализа. Концентрации урана находятся в пределах одного порядка значений – от 0,1 до 0,96 мкг/л, среднее – 0,54 мкг/л, медиана – 0,55 мкг/л. Максимальные концентрации за весь период исследований отмечены только трижды: в марте 2008 г., январе 2011 г. и феврале 2020 г., когда его концентрации повышались почти в 2 раза (рисунок 14). Возможно, высокий уровень воды в оз. Байкал именно в эти годы способствовал размыву и разрушению берегов озера, и, соответственно, разрушению и выщелачиванию элементов из вмещающих пород с последующим растворением в воде, выносом их из устьев притоков в озеро и лишь частичному захоронению на геохимических барьерах. Поскольку течения в оз. Байкал двигаются против часовой стрелки и только затем подходят к истоку р. Ангары, то повышенные значения урана в воде притоков могут фиксироваться и в воде истока, но уже в разбавленном виде (пониженные концентрации).



1 – среднее значение; 2 – сигма; 3 – 2 сигмы; 4 – область значений графика, превышающих сигму; 5 – землетрясения с $mb \geq 5$; значения концентрации в притоках: 6 – р. Анга; 7 – р. Турка; 8 – р. Селенга

Рисунок 14 – График распределения значений концентрации U в воде истока Ангары в 2006–2022 гг

Сильные геодинамические изменения в Байкальском регионе могут приводить к кратковременному раскрытию локальных участков зон глубинных разломов, поступлению мантийных флюидов в кору, проницаемость которой повышается в результате деструкции литосферы, и вследствие разломно-блоковой структуры Байкальской рифтовой зоны способствуют геодинамической активизации блоков литосферы. Эти факторы могут приводить к поступлению урана на поверхность по зонам раскрытых разломов.

С учетом этих представлений приведём результаты анализа изменения концентраций урана в воде оз. Байкала, беря за основу пункт замеров в истоке р. Ангары в соотношении с сейсмическим процессом, на примере сильных землетрясений ($M \geq 5$) в районе оз. Байкал (рисунок 14).

В 2006 г. было отмечено три пика концентрации урана, что может быть соотнесено с активизацией блоков литосферы в районе центрального котловины озера, где произошло ряд умеренных землетрясений. В следующем году в июле были сделаны замеры в притоках оз. Байкал (рисунок 12). Были отмечены повышенные значения урана на севере Байкала, где в это время произошло Томпудинское землетрясение 4 июля 2007 г. с $KP=14.2$, $Mw=5.4$, $I_0=7-8$. Повышенные значения урана отмечались в притоках рек Рыты, Анга, Бу-

гульдейка, на п-ве Святой Нос, дельте р. Селенга. В истоке р. Ангары максимальное значение было зафиксировано в 8 августа (0,74 мкг/л), соотносящееся с наиболее сильным в районе землетрясением 19 августа с $KP=11.7$. В 2008 году было зафиксировано максимальная концентрация урана в истоке р. Ангары за время наблюдений (0,96 мкг/л). Проба была взята 14 февраля, за три месяца до Максимихинского землетрясения 20 мая 2008 г. с $M_w=5.3$, $I_0=7$ (центральная часть оз. Байкал, около 300 км от истока) и за 6 месяцев до Култукского землетрясения 27 августа с $M_w=6.3$, $I_0=8-9$ (южная часть оз. Байкал, около 60 км от истока). В июле концентрация снизилась (0,57 мкг/л), а в сентябре и ноябре повысилась до максимальных значений (0,83 мкг/л и 0,75 мкг/л). Максимальные значения 2008 года превышают 2 сигмы, что свидетельствует о связи повышенных концентраций урана в воде с Култукским землетрясением, сильнейшим за исследуемый период, а возможно и с Максимихинским землетрясением.

В следующем, 2009 году, сейсмическая активность значительно снизилась. Уровень концентрации урана в истоке значительно понизился, большую часть года был ниже среднего значения. Лишь в конце года был небольшой всплеск (0,69 мкг/л), за два месяца до землетрясения, зарегистрированного в Южном Байкале к востоку от бухты Песчаной. Несмотря на умеренный энергетический уровень, оно отчетливо ощущалось на территории Южного Прибайкалья. В 2010 году уровень концентрации урана был ниже среднего значения. Следующий пик (0,84 мкг/л), превышающий 2 сигмы, был зафиксирован в начале января 2011 года, за 6 месяцев до сильного Туркинского землетрясения 16 июля с $KP=14.5$, $M_w=5.2$, $I_0=7-8$ (центральное Прибайкалье, более 250 км от истока). Вероятно, это свидетельствовало о геодинамической активизации блоков литосферы в центральной части оз. Байкал, где также произошел ряд умеренных землетрясений. В следующий период времени до середины 2013 года уровень концентрации урана значительно понижается, опустившись ниже средних значений. Сильных землетрясений в этот период не произошло.

С мая 2013 года до апреля 2017 года мониторинговые наблюдения состава воды в истоке р. Ангары не проводились. С апреля 2017 года до марта 2020 года концентрации урана в воде истока р. Ангары находились на среднем уровне. Сильных землетрясений в исследуемом районе не происходило. Пик концентрации урана в истоке р. Ангары был зафиксирован 17 марта 2020 года за 6 месяцев до Быстринского землетрясения с $M_w=5.4$ (100 км от истока) и за 9 месяцев до Кударинского землетрясения 9 декабря с $M_w=5.5$ (130 км от истока). С 2018 года раз в полгода стали проводиться измерения в воде притоков озера. На рисунке 12 показаны высокие значения концентрации урана в притоках и глубинной воде центре оз. Байкал, свидетельствующие о сейсмо-геодинамической активизации с

последующей реализацией Кударинским землетрясением. В 2022 году максимальные значения концентрации урана были зафиксированы в притоках рек Анга и Селенга за полмесяца до второго Голоуспенского землетрясения 14 октября с $M_w=5.4$.

Полученные результаты позволяют заключить, что со всеми сильными землетрясениями ($M \geq 5$), произошедшими в районе Южного и Центрального Байкала, связаны значимые увеличения концентрации урана в воде озера. В отдельных случаях это подтверждено и для северной части озера. Причем, повышения уровня концентрации происходили за несколько месяцев до землетрясений. В ряде случаев наблюдалось увеличение концентрации непосредственно перед землетрясением и сразу после него (несколько дней), но, учитывая большие перерывы между наблюдениями, это зафиксировать удавалось не всегда.

2.4 Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что стабильные концентрации урана в воде оз. Байкал и его стока – р. Ангары поддерживаются как его поступлением с глубинной водой во время частых активизаций блоков литосферы, так и дополнительным выщелачиванием из урансодержащих пород и рудопроявлений в береговой зоне и в бассейне оз. Байкал. Достоверность этой связи подтверждена статистически, когда всем значимым максимумам урана в воде Байкальской экосистемы соответствуют сильные сейсмогеодинамические воздействия. Проведенные исследования показали, что состояние воды оз. Байкал зависит не только от состава пород его котловины и водосбора, но и от природных катаклизмов. В связи с этим необходимо продолжение постоянных геохимических и геодинамических исследований в мониторинговом режиме в Байкальской экосистеме.

Сравнительный анализ распределения концентраций урана в воде в сопряженных компонентах Байкальской экосистемы позволил выявить различия в концентрациях между подземными водами вокруг оз. Байкал и водой устьев его притоков, при этом установить близкие концентрации урана в глубинной и поверхностной воде самого озера с его единственным стоком – водой реки Ангары. На фоне отмеченных различий отчетливо просматривается возможность дополнительного поступления в оз. Байкал и обновления его воды глубинной (ювенильной) водой при многочисленных землетрясениях в Байкальской рифтовой зоне.

Таким образом, анализ распределения концентраций урана в воде сопряженных компонентов Байкальской экосистемы – в воде Байкала, притоков, истока Ангары, в подземной воде из скважин на о. Ольхон и в юго-западной береговой части оз. Байкал показал значимые различия в максимальных концентрациях урана в подземной воде озера и его

притоках, но близкие средние и медианные значения элемента в воде оз. Байкал и его стока – р. Ангары. Полученные данные по распределению концентраций урана показывают связь изменений концентраций урана с геолого-геохимическими особенностями строения Байкальской экосистемы и его окружения и происходящих в регионе климатических и сейсмо-тектонических событий.

3 Техногенные и природные источники поступления, процессы миграции и аккумуляции потенциально токсичных элементов в водных и наземных экосистемах

3.1 Введение

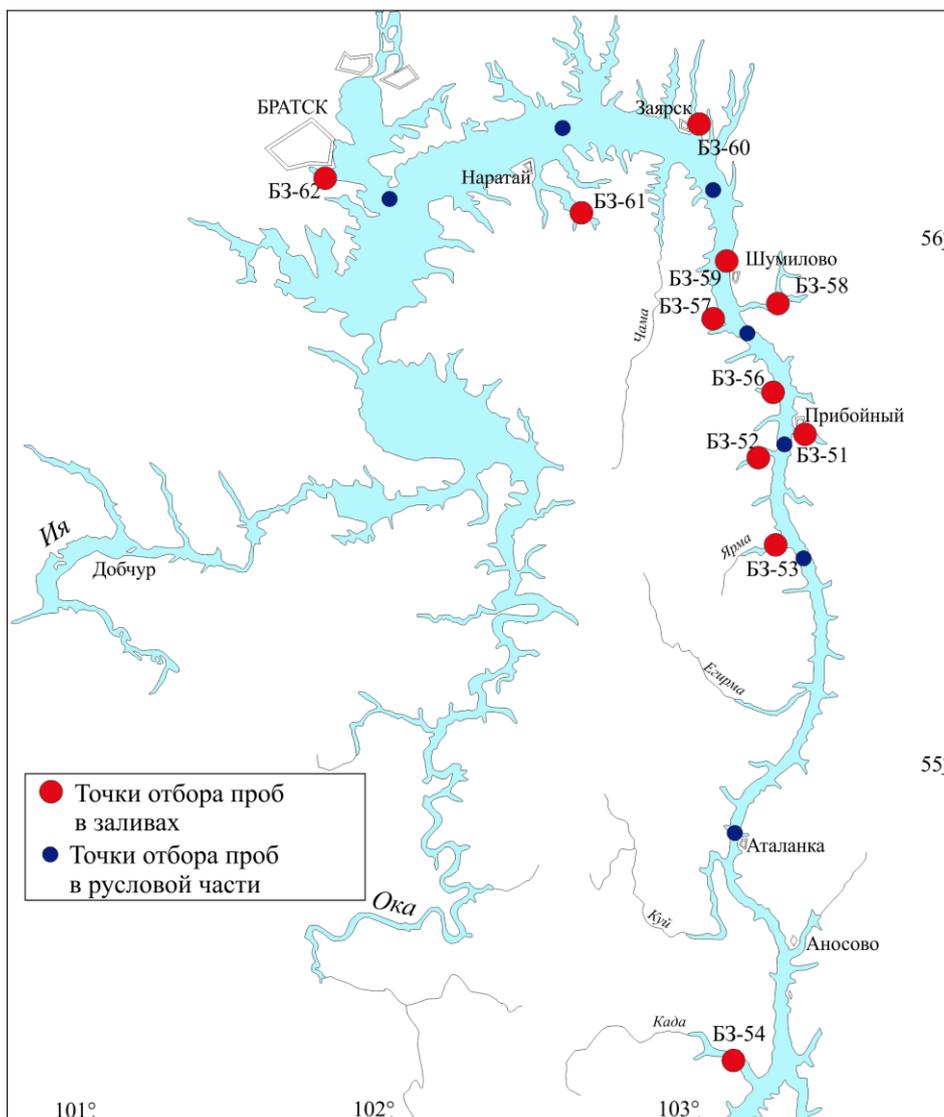
Резкое сокращение мировых запасов и снижение качества пресных вод в результате антропогенной трансформации водных экосистем стало одной из крупнейших экологических проблем современности. Особую тревогу вызывает рост поступления в водную среду тяжелых металлов и As, в связи с их потенциальной токсичностью и биоаккумулятивным эффектом [31]. Фито- и зоопланктон, занимающие нижние трофические уровни и обладающие биомассой на порядки превышающей биомассу других гидробионтов, являются ключевыми звеньями ввода токсичных элементов в пищевые цепи водоемов. Способность планктона многократно концентрировать пространственно-неоднородные вещества, которые часто затруднительно выявить непосредственно в окружающей среде, позволяет рассматривать его как перспективный объект биогеохимического мониторинга состояния водных экосистем. В связи с этим, целью представленного исследования стало изучение особенностей накопления и трофической передачи потенциально токсичных металлов и мышьяка в системе «вода – фитопланктон – зоопланктон» для выявления биоиндикационных возможностей планктонных организмов при эколого-геохимической оценке техногенного воздействия на заливы Братского водохранилища, второго в каскаде Ангарских ГЭС. БВ - часть крупнейшей в мире Байкало-Ангарской водной системы. Доля байкальских вод, поступающих в БВ через Иркутскую ГЭС, в общем притоке составляет 65%. Русловая часть БВ принимает на себя значительную техногенную нагрузку от промышленных предприятий различной специфики и бытовых стоков крупных городов Приангарья – Иркутска, Ангарска, Усолье-Сибирского, Свирска и Братска. Рассматриваемые нами заливы БВ подвержены воздействию лесосплавных работ Братского лесопромышленного комплекса (ЛПК).

3.2 Материалы и методы

Отбор проб воды и планктона проводился в 11 заливах и на 7 станциях русловой части БВ (рисунок 15). Пробы воды отбирались батометром OceanTest 110А с двух гори-

зонтов: поверхностного – с глубины 0,6 м и придонного – в метровом слое от дна. Отбор планктона осуществлен вертикальными и горизонтальными тралениями планктонной сетью Джели (мельничное сито 70 мкм).

Общую пробу планктона разделяли на размерные фракции через сита с различной размерностью ячеек (от 500 мкм до 70 мкм) путем последовательного промывания водой из места отбора. На наиболее крупном сите оставался зоопланктон (крупные коловратки, ветвистоусые и веслоногие ракообразные). Проба с самого мелкого сита была представлена различными группами фитопланктона (рисунок 16). В замороженном виде ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) пробы доставлялись в лабораторию, где они подвергались лиофильной сушке. Определение в воде и планктоне концентраций Al, V, Mn, Fe, Zn, Cu, Cd, Pb, As выполнено методом ICP-MS на масс-спектрометре ELEMENT-2 (Thermo Finnigan), Hg – методом ААА на ртутном анализаторе РА-915+ в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН. Для оценки бионакопления микроэлементов фито- и зоопланктоном относительно окружающей среды использовались медианные значения концентраций элементов в поверхностной и придонной воде заливов БВ. Для проведения сравнительного анализа в качестве фоновых и условно фоновых значений выбраны медианные концентрации исследуемых микроэлементов в фито- и зоопланктоне оз. Байкал [32] и русловой части БВ (фитопланктон в мкг/г сух. веса: Al (1077), V (1,9), Mn (37,6), Fe (883), Zn (21,2), Cu (5,9), Cd (0,2), Pb (8,9), As (13,7); зоопланктон в мкг/г сух. веса: Al (692), V (1,7), Mn (105), Fe (603), Zn (70,6), Cu (7,6), Cd (0,4), Pb (3,5), As (0,026)).



Заливы: БЗ-51 – Ср. Байн, БЗ-52 – Карахун, БЗ-53 – Ярма, БЗ-54 – Када, БЗ-56 – Б. Тунгуска, БЗ-57 – Озерная Баля, БЗ-58 – Травкина Баля, БЗ-59 – Шумилово, БЗ-60 – Кежма-Волоковая, БЗ-61 – Кежма-Наратайский БЗ-62 – Сухой Лог

Рисунок 15 – Карта-схема станций отбора проб воды, фито- и зоопланктона в БВ

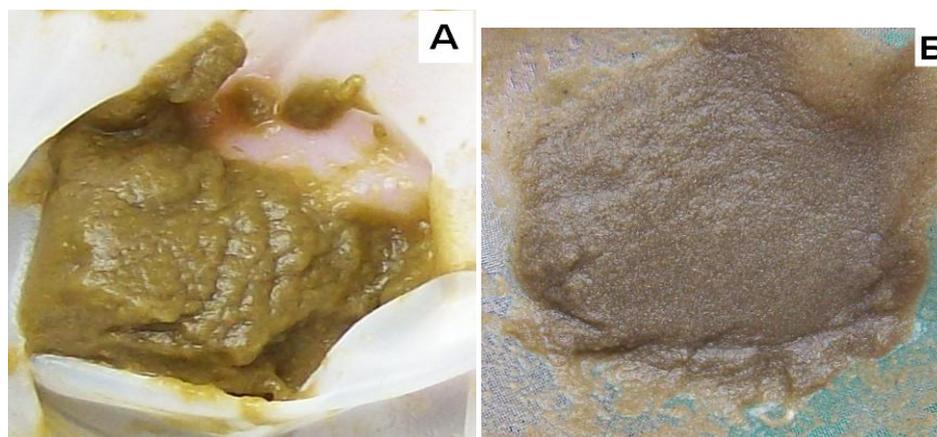


Рисунок 16 – проба фитопланктона (А), проба зоопланктона (Б)

3.3 Результаты и их обсуждение

Анализируя уровни накопления Al, V, Mn, Fe, Zn, Cu, Cd, Pb, As и Hg в планктонном сообществе, следует отметить значительную разницу в их концентрировании фито- и зоопланктоном, а также неоднородность пространственного распределения микроэлементов в планктоне заливов БВ (рисунок 17).

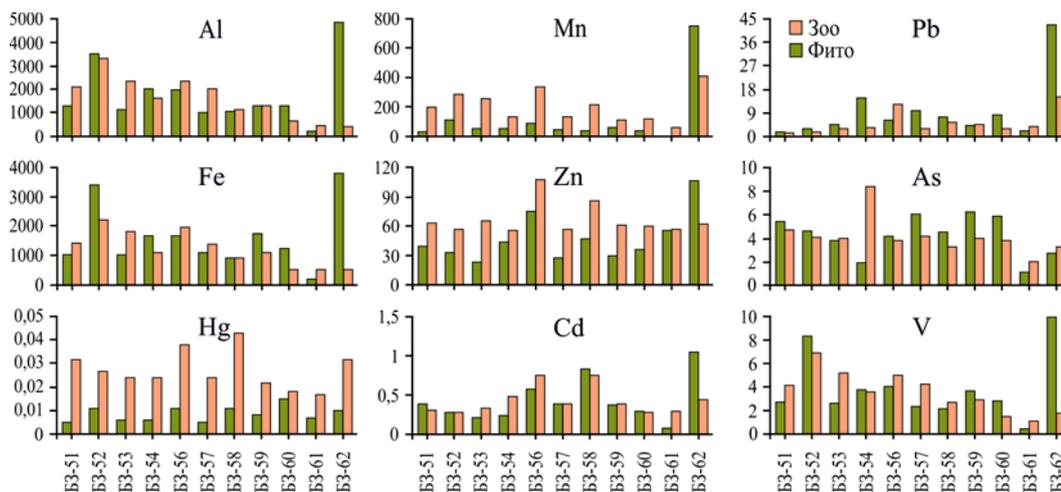


Рисунок 17 – Распределение концентрации микроэлементов (мкг/г) в фито- и зоопланктоне заливов БВ

Среди исследованных заливов резким повышением концентраций большинства микроэлементов в фитопланктоне выделяется зал. Сухой Лог (БЗ-62). Это залив в высокой степени подверженный техногенному воздействию. На побережье Сухого Лога расположена промплощадка Братского ЛПК, ТЭЦ-6 и ее шламонакопитель, в самом заливе – акватория лесного порта. Обилие источников техногенного поступления металлоидов предопределяет комплексное загрязнение водной среды этого залива.

В зал. Карахун (БЗ-52), в отличие от Сухого Лога, выявлены повышенные концентрации Al, Fe и V, как в фито-, так и в зоопланктоне. Наибольшие концентрации Zn, Hg и Cd в зоопланктоне зарегистрированы в заливах Б. Тунгуска (БЗ-56) и Травкина Баля (БЗ-58), As – в зал. Када (БЗ-54). Минимальные концентрации элементов в обеих группах планктона, за исключением Zn, наблюдаются в зал. Кежда-Наратайский (БЗ-61). Концентрации микроэлементов в планктоне остальных заливов не имеют значительных различий. Среди рассматриваемых элементов в планктоне заливов БВ наиболее стабильным по концентрациям является Cu (в фитопланктоне концентрации меди изменяются от 2,3 до 8,0 мкг/г, при среднем значении 5,5 мкг/г, в зоопланктоне – от 6,8 до 11,2 мкг/г, при среднем значении 7,9 мкг/г).

В мезотрофно-эвтрофных водных экосистемах, таких как заливы БВ, планктонные водоросли и цианобактерии, входящие в состав фитопланктона, обладают высокой численностью и, следовательно, наибольшей среди гидробионтов совокупной площадью контакта клеток с водной средой. Благодаря большому сорбционному потенциалу фитопланктон преимущественно накапливает элементы преобладающие в окружающей среде. В то время как, в гетеротрофный зоопланктон металлы и металлоиды поступают по двум путям – из воды и из объектов питания. Для определения уровня накопления элементов планктоном и возможности его использования для контроля загрязнения заливов БВ рассчитаны ВАФ, выражающие отношение концентрации химического элемента в установившемся состоянии планктона (мкг/г, сухого веса) к его содержанию в воде (мкг/мл) (Рисунок 18). ВАФ показывает, есть ли у организмов потенциал аккумулировать химические вещества из водной среды и не считается значимым, если не превышает значение 100 [33].

По результатам расчетов ВАФ все проанализированные элементы показали значительную биоаккумуляцию в пробах планктона: в фитопланктоне ВАФ изменяется от $4,9 \times 10^3$ для V до $1,5 \times 10^5$ для Fe, в зоопланктоне – от $5,4 \times 10^3$ для V до $1,5 \times 10^5$ для Al. По сравнению с беспозвоночными, планктонные водоросли более интенсивно аккумулирует Al, Fe, Pb и As. С одной стороны, это может быть связано с более высокой способностью фитопланктона сорбировать основные элементы водной среды – Al и Fe, а также относительно быстро накапливать металлы даже при низких концентрациях в воде [34]. С другой – Pb и As обладают слабой биодоступностью и мобильностью при их передаче в пищевых

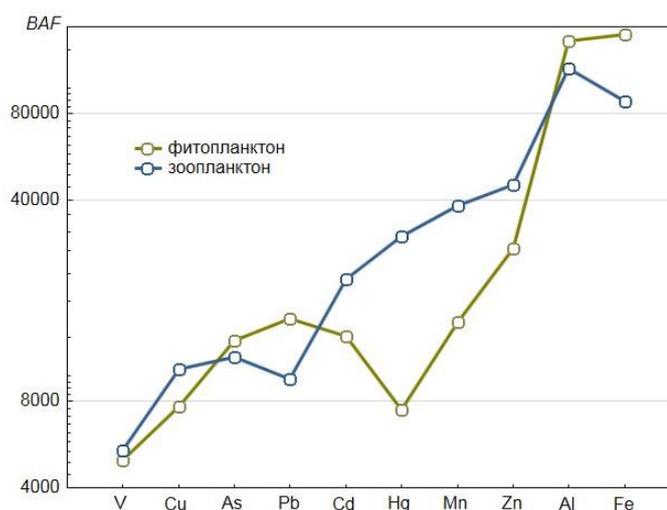


Рисунок 18 – Средние значения ВАФ микроэлементов в фито- и зоопланктоне заливов БВ

цепях гидробионтов [35], в данном случае от фитопланктона к зоопланктону. ВАФ зоопланктона по Cu, Cd, Hg, Mn, Zn были значительно выше, чем фитопланктоне, что, главным образом, связано с использованием беспозвоночными нескольких механизмов поглощения элементов, а также с их более сильными метаболическими способностями. Zn,

Cu и Mn являются эссенциальными элементами, выполняющими важные функции обмена веществ в организмах беспозвоночных. Например, у ракообразных Zn является незаменимым компонентом многих ферментов, включая карбоангидразу, а Cu – функциональной частью белков в их гемолимфе [36]. Cd и Hg – неэссенциальные высокотоксичные тяжелые металлы, имеющие наименьшие среди рассматриваемых элементов концентрации в водной среде. В то же время, они в значительной степени аккумулируются зоопланктоном, в связи с их высоким миграционным потенциалом и биодоступностью. Особенно это относится к ртути, обладающей свойством образовывать очень мобильную органическую форму – метилртуть, которая способна проникать через мембраны клеток, связываться с белками и накапливаться в организме. В проведенном исследовании, V показал самый низкий уровень ВМФ, как фито-, так и в зоопланктоне, концентрирующей этот элемент в почти одинаковых количествах (рисунок 18).

Для выявления эффективности трофической передачи микроэлементов на отрезке пищевой цепи фитопланктон – зоопланктон использован ВМФ, определяющийся как отношение концентрации определенного элемента в зоопланктоне к концентрации этого же элемента в фитопланктоне. Биомагнификация (биоусиление) происходит при $BMF > 1$, при $BMF < 1$, происходит биоразбавление концентраций элементов при трофической передаче – биодилуция. Определенные уровни ВМФ для исследуемых элементов приведены на рисунке 19.

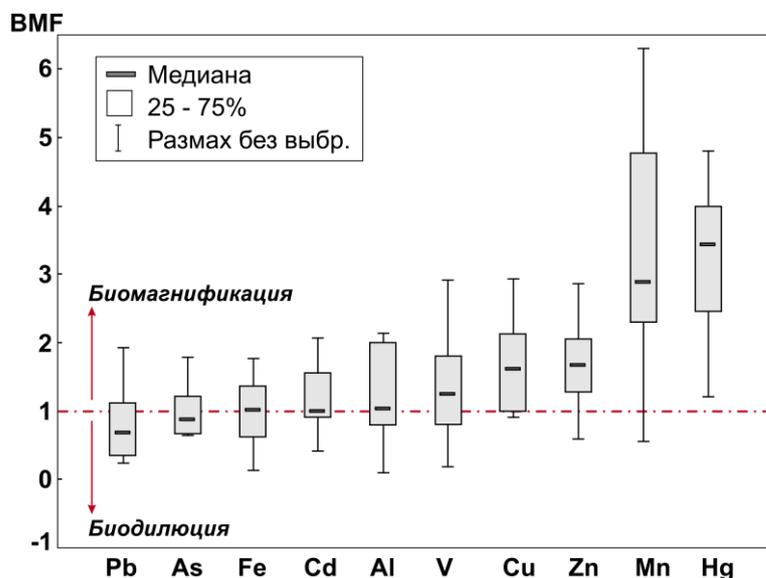
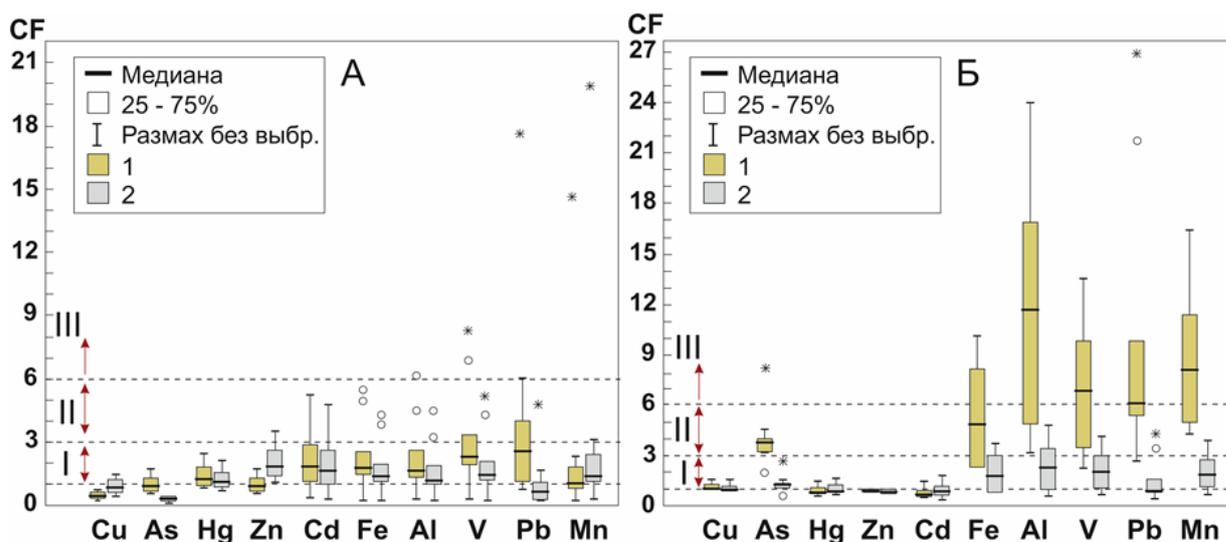


Рисунок 19 – ВМФ элементов в системе «фитопланктон – зоопланктон» заливов БВ

Медианные для всех исследованных заливов БВ уровни ВМФ элементов показывают, что на отрезке пищевой цепи фитопланктон – зоопланктон происходит биомагнификация в ряду по увеличению: $V < Cu < Zn < Mn < Hg$. Здесь следует отметить, что биомагнификация

нификация Cu, Zn, Mn и Hg была отмечена и для русловой части БВ, а также для Иркутского водохранилища [32]. Это может быть связано с геохимическими факторами, влияющими на мобильность и биодоступность форм этих элементов в смежных экосистемах. Cd, Fe и Al в планктоне большинства исследованных заливов не проявляют биомагнификацию. В то время как, As и Pb при трофической передаче подвержены процессу биодилуции. Биоразбавление этих элементов, вероятно, зависит от гомеостатической регуляцией концентрации металлов в зоопланктоне с помощью металлотионеина и металлотионеин-подобных белков, которые регулируют скорость поглощения, накопления и выведения этих элементов [37].

Эколого-геохимическая оценка состояния заливов проведена по однофакторному индексу загрязнения фито- и зоопланктона (рисунок 20). CF рассчитывался как отношение тестируемой концентрации элемента к его фоновой концентрации [38]. Категории CF: $CF < 1$ – отсутствие загрязнения, $1 \leq CF \leq 3$ – умеренное загрязнение, $3 \leq CF \leq 6$ – значительное загрязнение, $6 \geq CF$ – очень высокое загрязнение.



А – фитопланктон; Б – зоопланктон. По отношению к фоновым концентрациям элементов в планктоне оз. Байкал (1) и в планктоне русловой части БВ (2)

Рисунок 20 – CF фито- и зоопланктона в заливах БВ

Основываясь показателях CF (рисунок 20А), можно сделать заключение, что фитопланктон большинства заливов БВ по отношению к фитопланктону оз. Байкал умеренно загрязнен Hg, Cd, Fe, Al, V и Pb, а по отношению к фитопланктону русловой части БВ – Hg, Zn, Cd, Fe, Al, V и Mn. Фитопланктон не загрязнен Cu и As. Сопоставление уровня CF с распределением элементов фитопланктоне заливов (рисунок 17) указывает на очень высокое (Al, V, Pb и Mn) и значительное (Zn, Cd и Fe) загрязнение фитопланктона зал. Сухой

Лог (крайние точки и выбросы на рисунке 20А), значительное загрязнение Fe, V и Al зал. Карахун и значительное загрязнение по Pb зал. Када по отношению к фитопланктону оз. Байкал. Эти же заливы выделяются при использовании в качестве фонового объекта фитопланктона русловой части БВ: значительное по Zn, Cd, Fe, Al, V и Pb и очень высокое по Mn загрязнение фитопланктона зал. Сухой Лог, значительное загрязнение по Fe, V и Al зал. Карахун и значительное загрязнение по Pb зал. Када. CF фито- и зоопланктона существенно отличаются, как по значениям, так и по спектру элементов-загрязнителей. Зоопланктон заливов БВ не загрязнен Cu, Hg, Cd и Zn по отношению к региональному (Байкал) и внутриводоемному (БВ) фонам. CF зоопланктона большинства заливов показывает очень высокое загрязнение заливов по Al, V, Mn и Pb, значительное загрязнение по Fe и As по отношению к зоопланктону Байкала. По отношению внутриводоемному фону зоопланктон заливов умеренно загрязнен As, Al, V, Mn и Pb. Зоопланктон зал. Сухой Лог выделяется очень высоким загрязнением As и Fe, значительным загрязнением Al, V, Mn и Pb, а зал. Б. Тунгуска – Pb.

3.4 Заключение

Установлено, что фито- и зоопланктон заливов БВ в значительной степени (от $n \times 10^3$ для V до $n \times 10^5$ для Fe и Al) аккумулируют потенциально токсичные элементы из водной среды. Фитопланктон наиболее интенсивно сорбирует из воды основные и слабо мобильные элементы (Al, Fe, As и Pb), в то время как в зоопланктоне, использующем и пищевую стратегию поглощения веществ, преимущественно ассимилируются подвижные и биодоступные в водных экосистемах элементы – Cu, Cd, Hg, Mn, Zn.

Определенные уровни биомагнификации в планктоне заливов БВ позволили выявить группу элементов, усиливающих свои концентрации при трофической передаче (V, Cu, Zn, Mn и Hg), и, следовательно, представляющих потенциальную опасность для высших уровней пищевой цепи.

Биогеохимическая индикация фито- и зоопланктоном поступления металлов и мышьяка в водную среду показала, что заливы БВ, эксплуатируемые лесодобывающими организациями, имеют высокий уровень загрязнения по Al, V, Pb, Mn, Fe и As.

Применение планктона как инструмента интегральной оценки поступления потенциально опасных элементов в водные экосистемы может дать более объективную картину загрязнения по сравнению с точечным анализом воды и донных отложений. Кроме того, оценка элементов, биомагнифицированных по трофической цепи или поступающих в концентрациях, превышающих фоновый уровень, служит ориентиром для выявления воз-

можных источников загрязнения в водных экосистемах, с последующей возможностью его контроля.

4 Биогеохимические процессы транслокации мышьяка в системе «почва – растения» и его взаимодействие с биогенными макроэлементами на территории бывшего металлургического завода гор. Свирска

4.1 Введение

Среди элементов-загрязнителей мышьяк As известен как сильный экотоксикант, способный вызывать физиологические и биохимические нарушения у всех форм живых организмов. Актуальным является изучение закономерности трансформации соединений As в условиях техногенеза и особенности его поступления в растения, что может влиять и на пищевые цепи животных и человека. Изучение подвижности мышьяка 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 мышьяком. Цель исследований заключалась в изучении механизма подвижности соединений As в почвенно-растительной системе и анализ взаимодействия некоторых биофильных элементов с мышьяком в растениях при токсическом стрессе.

4.2 Объекты и методы

Объектом данного исследования являлось изучение особенности транслокации As из почв в растения на территории бывшей промышленной площадки АМЗ, выпускавшего мышьяк для оборонной промышленности до 1949 года. 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 мышьяка и его транслокацию в сопряженных с почвами растениях в 30 пробах надземных вегетативных органов и 15 пробах корней одного вида пырея *Elytrigia repens*. Пробы растений и почв анализировали РФА и атомно-адсорбционный методом. В почвах изучены формы соединений As. Статистический анализ содержаний As проведен на основе программы Statistica 10. Графики регрессионной зависимости между содержанием As в почве и растениях были построены с использованием программы Microsoft Excel 10. Для построения карты-схемы использовали программу QGIS.

4.3 Результаты исследований и их обсуждение

На исследуемой территории условно выделены три участка, отличающиеся источниками мышьякового загрязнения. Участок №1 - территория, бывших мышьяковых отвалов. На этом участке соединения мышьяка находятся в прочно связанном состоянии. Мышьяк здесь может быть связан с алюмосиликатами, находиться в виде разрушенных сульфатов, которые образуются в зоне окисления сульфидов, распространенной на этой территории. Участок № 2 – территория, где располагались строения АМЗ, на котором была проведена рекультивация с внесением чистых почв. Здесь содержания мышьяка невысокие, а его источником являлся преимущественно триоксид мышьяка As_2O_3 , который выделяли при промышленной переработке арсенопиритовой руды. Это соединение мышьяка наиболее токсично и может находиться в более подвижных ионных формах (AsO_2^- , $H_2AsO_4^-$, As^{3+}). Участок № 3 – окрестности основной зоны загрязнения, где распространены дерново – карбонатные почвы с выраженным гумусовым горизонтом, загрязненным дисперсным материалом мышьяка, привнесенным из отвала. Соединения мышьяка в этой зоне также приобретают повышенную подвижность, что объясняется увеличением дисперсности загрязненного субстрата.

Общее распределение концентраций As в надземных частях растений пырея на этих участках и его сопоставление с содержаниями в почве и корнях приведено на рисунке 1. В надземной части пырея (побегах) концентрации As значительно превышают содержания травянистых растений чистых территорий, которое составляет 0,3 мг/кг сухого вещества [39]. Максимальное накопление мышьяка характерно для растений зоны техногенных грунтов участка 1 (рисунок 21). Пониженные концентрации As в растениях установлены на участке 2. Величина концентрации As в растениях в основном зависит от его содержания в почве, это видно по статистическим параметрам, рассчитанным по медиане концентраций мышьяка в почве, корнях и надземных вегетативных органах пырея (рисунок 21).

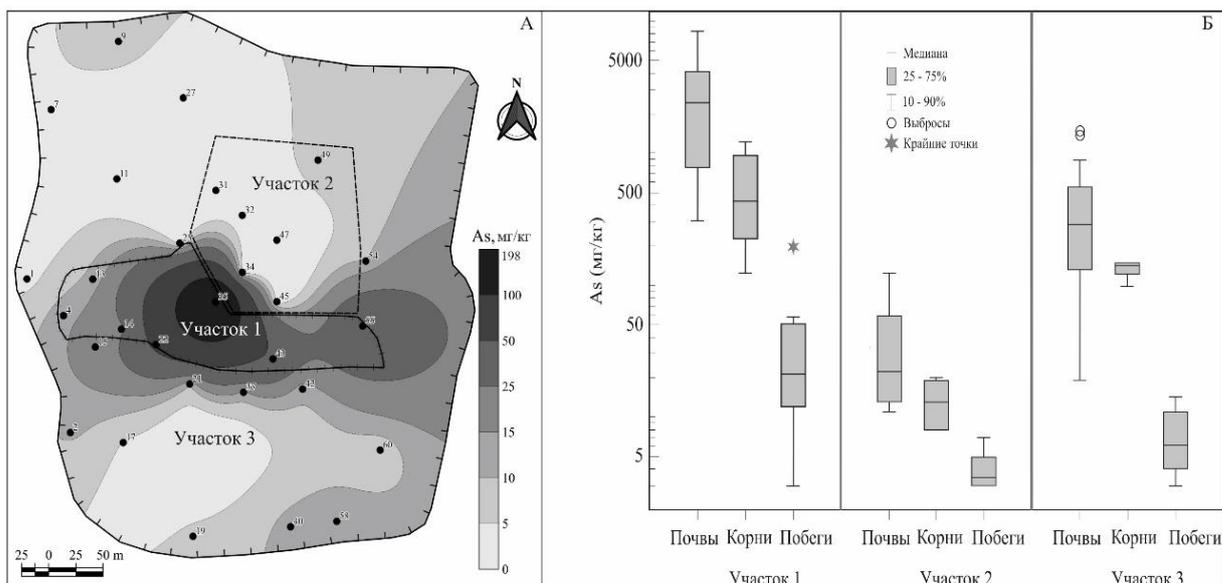


Рисунок 21 – Распределение As (мг/кг) в (побегах) надземных органах пырея *Elytrigia repens* (на сухой вес) территории бывшего АМЗ (А); статистическое сопоставление концентраций As в почве, корнях и побегах растений *Elytrigia repens* участков 1–3 (Б)

Полученные результаты указывают на то, что большую роль в транспортировке мышьяка в надземную часть растений играет корневая система, которая способна повышать растворимость и подвижность мышьяка в почве ризосферы и способствовать частичной транслокации его в побеги пырея (рисунок 22). Регрессионные тренды между параметрами, показанными на рисунке, изменяются по экспоненте с высокой достоверностью. Это указывает на то, что As с большой интенсивностью накапливается в корнях и в меньших количествах транспортируется в вегетативные части растений.

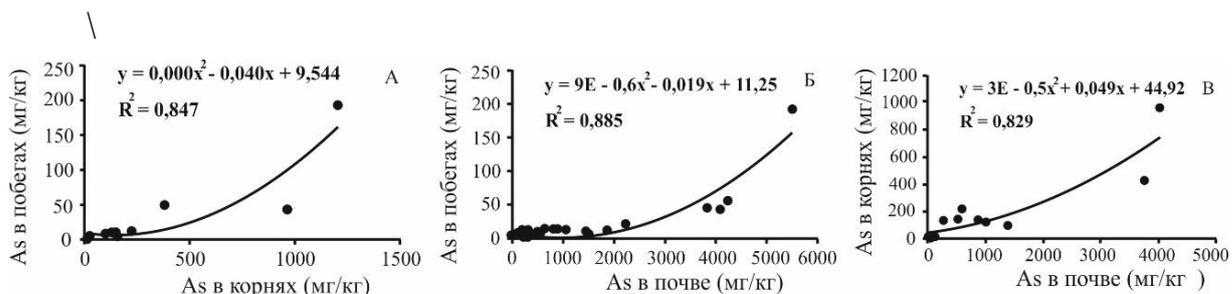


Рисунок 22 – Регрессионные зависимости концентраций As (на сухое вещество): А – в надземной вегетативной части растений от его содержания в корнях; Б – в вегетативных частях растений от его содержания в почве; С - в корнях от его содержания в почве; вероятность зависимостей при $P < 0,001$

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

Здесь интенсивность накопления мышьяка в побегах растений Кб на порядок ниже, чем на территории участка 2, где распространены наиболее подвижные ионные формы мышьяка, которые выделяли в процессе переработки и возгонки арсенопиритовых руд. На участке 2 также повышен и транслокационный индекс Кт (таблица 1). Это указывает на повышенную интенсивность поступления в растения мышьяка, находящегося в ионно-обменных и подвижных формах.

В процессе исследований изучены закономерности взаимодействия между биогенными макроэлементами и мышьяком в различных органах растений пырея при токсическом стрессе. Это направление рассмотрено на основе изучения множественной корреляции между концентрациями As и основными биогенными микроэлементами К, Р, Са, Mg, Si, S, Na, которые входят в состав структуры растительных клеток и участвуют в их метаболических процессах. Растения разных видов имеют в природе свое избирательное постоянное накопление эссенциальных элементов в различных органах. В техногенных условиях под влиянием токсического стресса происходит нарушение метаболических процессов в клетках растений, что отражается на соотношении некоторых биогенных химических элементов. Изучение межэлементного взаимодействия может представлять большой интерес для оценки состояния растений в природно-техногенных экосистемах.

Таблица 1 – Средние концентраций As мг/кг в сопряженных образцах почв и различных органах пырея *Elytrigia repens* (мг/кг на сухой вес). Коэффициенты накопления мышьяка в растениях Кб и транслокационный индекс Кт

Участки	Почва n -30	Побеги n-30	Кб побеги	Корни n-15	Кб корни	Кт
1	2961	63	0,014	589	0,21	0,1
2	41,3	3.8	0,15	13.5	0,6	0,31
3	783	10.8	0,030	132	0,24	0,08

Примечание: Кб – отношение содержания As в растениях к концентрации в сопряженной почве, Кт – отношение между содержаниями As в побегах к корням.

По результатам наших исследований As, Si, Mg, Na, Са имеют повышенные концентрации в корнях, чем в побегах, а Р и К накапливается в побегах пырея. Первая группа элементов может входить в минеральный состав клеточных стенок корней и клеточных стенок надземных органов растений, а Р и К поступают в ксилемные растворы и концентрируются, в основном, в надземной части растений, в цитоплазме и вакуоле клеток.

В побегах пырея установлены межэлементные связи между: 1 – (Si – As –Na); 2 – (Mg – Са); 3 – (Р – К). Кремний содержится во всех растениях и концентрируется в боль-

ших количествах, в основном, в клеточных стенках. Натрий является антагонистом калия и также накапливается преимущественно в клеточной стенке. В отдельных работах показано, что значительное количество As сосредоточено в клеточной стенке надземных органов растений – до 50% по сравнению с другими органеллами [40]. Клеточная стенка растений способна связывать избыточные ионы мышьяка, особенно у толерантных видов растений [41].

По-видимому, этим объясняется положительная корреляционная связь As с Si, Na и отрицательная связь As с K и P в корнях пырея, растущем на техногенных почвах. Цитоплазма внутри клетки вегетативных органов является основным местом метаболизма растений, где большую роль играют K и P. Эти элементы характеризуются значимой отрицательной корреляцией с мышьяком. Можно считать, что высокие концентрации As, присутствующие в техногенных почвах этой территории, могут влиять на метаболические реакции в клетках травянистых растений при нарушении поступления в них основных биогенных макроэлементов K и P, необходимых для их жизнедеятельности.

Полученные результаты указывают на особое межэлементное взаимодействие As и P. Отрицательная значимая корреляция этих элементов наблюдается в корнях и побегах пырея. Это может объясняться тем, что As и P обладают сходством по химической структуре и использует одну и ту же транспортную систему. Внесение фосфора в загрязненные мышьяком почвы снижает концентраций As в различных органах растений.

4.4 Заключение

По результатам исследования установлено повсеместное загрязнение мышьяком верхних горизонтов почв и наиболее распространенных на этой территории растений пырея *Elytrigia repens*. Установлено, что защиту надземной части растений от избытка мышьяка берет на себя корневая система пырея, что имеет большое значение для фитостабилизации мышьякового загрязнения и указывает на повышенную толерантность этого растения. Основной закономерностью биогеохимических изменений в растениях зоны мышьякового загрязнения является антагонизм основных эссенциальных элементов K, P к накоплению As в надземных органах пырея.

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

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

5.1 Строение и условия формирования верхнекайнозойских отложений опорного разреза Улан-Жалга (Западное Забайкалье)

5.1.1 Введение

На юге Восточной Сибири разрезы четвертичных осадочных комплексов длительного периода формирования и при этом высокого хроностратиграфического разрешения немногочисленны. Важнейшим опорным разрезом континентальных отложений этого возрастного интервала в регионе является разрез Тологой. До настоящего времени он оставался практически единственным полным разрезом квартера, для которого на основе различных методов было получено надежное обоснование возраста представленных в нем отложений. Недавно в Западном Забайкалье нами был обнаружен и описан новый разрез отложений верхнего кайнозоя, получивший название Улан-Жалга. Уже предварительные результаты его изучения [42] показали сопоставимый с Тологоем высокий потенциал данного осадочного архива для решения актуальных задач региональной стратиграфии и палеогеографического анализа и потребовали проведения на разрезе комплексных работ. Целью наших исследований стало мультидисциплинарное исследование отложений опорного разреза Улан-Жалга (Западное Забайкалье) с целью стратиграфического расчленения, геологической корреляции с другими опорными разрезами и реконструкции условий и обстановок регионального седиментогенеза в квартере.

5.1.2 Методы

Для изучения отложений разреза применен комплекс палеонтологических, палео- и петромагнитных, литолого-минералогических и литохимических методов. После зачистки обнажения по стандартной методике проводилось послойное описание разреза, фиксировались общие особенности современного седиментогенеза. Особое внимание уделялось сопряженному исследованию морфологических систем и коррелятных осадочных комплексов территории расположения разреза в рамках морфолитогенетического анализа согласно методическим рекомендациям [43]. Сборы палеонтологических коллекций проводились послойной промывкой крупных объемов отложений с использованием флотационной установки австрийского производства с диаметром ячеек сит 0,5, 1,0 и 3,0 мм. Полученный концентрат высушивался, и дальнейшие исследования ископаемых остатков проводились по стандартной методике [44]. Гранулометрические исследования выполнялись на лазерном микроанализаторе частиц Microtrac X100. Диапазон размеров измеряемых частиц составляет от 704 мкм до 0,146 мкм. Статистическая обработка результатов была

выполнена в программе GRADSTAT. Для каждого образца были определены моды распределения и рассчитаны средний размер зерна, сортировка, асимметрия и эксцентриситет.

Палеомагнитные исследования были выполнены на криогенном магнитометре 2G Enterprise 755R по методике [45]. Ориентированные образцы отобраны с шагом от 5 до 25 см (в среднем 15 см) в стандартные (7 см^3) пластиковые контейнеры и далее подвергнуты ступенчатому размагничиванию переменным магнитным полем до 70–90 мТл (13–15 шагов). Интерпретация результатов проводилась в программном комплексе Remasoft 3.0.

Петромагнитные измерения были выполнены на коэрцитивном спектрометре J-meter. Состав магнитных минералов определялся по кривым $K(T)$ на каппабридже MFK 1 (AGICO, Чехия) и на приборе ТАФ-1. Петромагнитные характеристики отложений традиционно анализировались по основным группам: 1) концентрационно-зависимые параметры: нормированная по массе магнитная восприимчивость ферромагнетиков (k_{fer}) и парамагнетиков (k_p), намагниченность насыщения ферромагнетиков (J_{fer}), остаточная намагниченность насыщения (J_{rs}); 2) гистерезисные характеристики (коэрцитивная сила B_c , остаточная коэрцитивная сила B_{cr}) и коэрцитивные (магнитная “жесткость”) параметры ($HIRM = (J_{rs} - J_r - 300)/2$, где $J_r - 300$ – намагниченность насыщения в обратном поле 300 мТл); 3) структурно-чувствительные отношения B_c/B_{cr} и J_{rs}/J_{fer} (доменное состояние магнитных зерен) и k_{fer}/J_{rs} (“эффективный” размер магнитного зерна).

Для характеристики вещественного состава отложений разреза проведены петрохимические исследования. Определение содержаний оксидов породообразующих элементов в отложениях выполнено РФА методом на спектрометре с волновой дисперсией S8 TIGER (ИЗК СО РАН). Результаты анализа содержаний оксидов пересчитаны на прокаленную бескарбонатную навеску, а затем на молярную массу для расчета основных петрохимических параметров. Определение редких и рассеянных элементов, в том числе элементов группы РЗЭ выполнено методом ICP-MS на масс-спектрометре ICP/HRMS ELEMENT 2 (ИГХ СО РАН). Для общей характеристики отложений проведен анализ распределения по разрезу основных литохимических индикаторов интенсивности процессов выветривания и почвообразования. Палеоклиматические условия седиментогенеза определялись с помощью геохимических маркеров, отражающих особенности фракционирования элементов группы РЗЭ, и геохимических показателей: кальцификации почв $(CaO + MgO)/Al_2O_3$ [46]; коэффициента окисления почвенного материала $(Fe_2O_3 + MnO)/Al_2O_3$ [47].

С целью выявления типоморфного значения ассоциаций и кристаллохимических характеристик карбонатных минералов и решения на этой основе задач, связанных с ре-

конструкциями климатических событий четвертичного периода в регионе, использовались методы рентгеновской дифрактометрии, ИК-спектроскопии. Рентгеновские исследования были выполнены на дифрактометре ARL X'TRA (излучение $\text{CuK}\alpha$). Для фазового анализа образцы были отсканированы в интервале от 2° до 65° (2Θ) с шагом $0,05^\circ$, время сканирования в точке 3 с. Дифференциальная диагностика карбонатных минералов выполнена методом математического моделирования XRD-профилей высокого разрешения.

В минералогическом анализе были задействованы гранулометрические фракции 2,0–1,0, 1,0–0,5, 0,5–0,25, 0,25–0,1, 0,1–0,05 мм. В ходе анализа минералы разделяли в бромформе с удельным весом $2,9 \text{ г/см}^3$ на легкую и тяжелую фракции (подфракции), а затем просматривали в препаратах под микроскопом. При этом использовались иммерсионные жидкости с показателями преломления 1,63 (тяжелая фракция), 1,54 и 1,53 (легкая фракция). В легкой и тяжелой фракциях каждой пробы определялось 500 минеральных зерен.

5.1.3 Результаты и их обсуждение

В результате проведенных работ была составлена детальная характеристика геоморфологической позиции разреза Улан-Жалга, выполнено его детальное стратиграфическое расчленение (рисунок 23), палеонтологическим и палеомагнитным методами обоснован возраст всех составных подразделений, проведена детальная геологическая корреляция с другими опорными разрезами региона.

Комплексная интерпретация данных по разрезу Улан-Жалга позволила установить, что слагающие его образования формировались на протяжении раннего, среднего и позднего плейстоцена. Выделенные в разрезе 35 слоев объединяются по фаунистическим комплексам и литолого-фациальным особенностям в 5 пачек, которые, в свою очередь, могут быть объединены в две толщи: нижнюю (слои 1–27, пачки 1–3), сложенную преимущественно алевритовыми лессово-почвенными образованиями с отдельными линзами грубо-

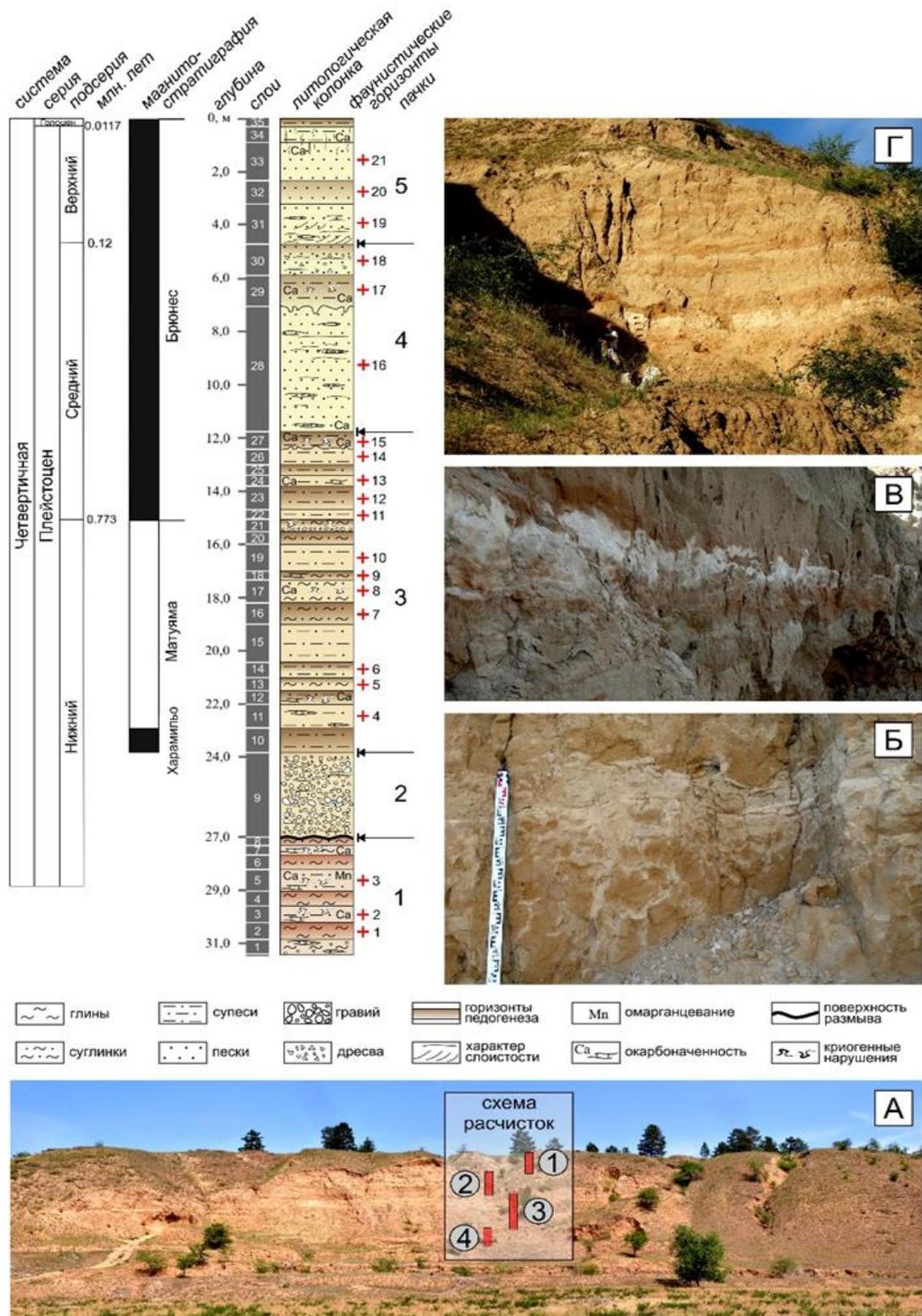


Рисунок 23 – Литолого-стратиграфическое строение разреза Улан-Жалга (слева); его общий вид с юга (А); вид толщи 3 средней части разреза (Г), сложенной лессовидными супесями и суглинками и погребенными почвенными горизонтами; характер криогенных нарушений слоя 29 (Б), верхний плейстоцен, и слоя 17 (В), нижний плейстоцен. Фото авторов.

зернистых делювиально-пролювиальных осадков, и верхнюю (слои 28–35, пачки 4–5), выполненную опесчаненными золовыми отложениями с горизонтами слабо выраженного педогенеза, но с глубокой и повсеместной делювиальной проработкой. На глубине 15 м в

разрезе фиксируется граница хронов Матуяма и Брюнес (0,773 млн лет), а на глубине 23 м – верхняя граница субхрона Харамильо (0,990 млн лет). При этом граница Матуяма/Брюнес совпадает с границей фаунистических комплексов нижнего и среднего плейстоцена.

Формирование отложений разреза отвечает двум этапам осадконакопления, граница между которыми проходит между пачками 3 и 4 на глубине 11,8 м, что отвечает хроностратиграфическому уровню МИС 16, и четко фиксируется петромагнитными, гранулометрическими и геохимическими данными. Изменение петромагнитных и гранулометрических параметров по разрезу имеет климатическую природу и отражает изменения окружающей среды. Наиболее высокой степенью теплообеспеченности характеризовалось время формирования пачки 1. Преобладающие значения $F < 1$ в отложениях всей нижней толщи разреза (за исключением грубообломочной пролювиальной пачки 2) указывают на слабую интенсивность ветровой деятельности, при этом поступление материала осуществлялось в виде воздушных аэрозолей, в основном из дальних источников. В это время широкое развитие получили педогенные процессы (в пачке 1 выделяется 16 горизонтов ископаемых почв). Верхняя толща разреза формировалась в более холодных и сухих условиях с повышенной динамикой эоловых процессов. Погребенные почвы верхней части разреза менее развиты и сильно нарушены криогенезом. Здесь важно отметить, что циклы почвообразования, соответствующие климатическим оптимумам и фиксируемые во всех хроностратиграфических горизонтах разреза, на всем протяжении истории формирования осадочного архива сменялись похолоданиями, о чем свидетельствуют следы криогенных процессов, отмеченные в слоях 3, 5, 7, 12, 17, 21, 27 и 29.

С данными выводами полностью согласуются XRD и ИК-спектроскопии отложений разреза. Для корректной идентификации и определения количественных соотношений карбонатов применялся метод моделирования их XRD-профилей функцией Пирсона VII. Установлено, что в строении разреза участвуют две различающиеся по минералогическим характеристикам мощные толщи субаэральные отложений, соответствующие двум крупным этапам осадконакопления.

Нижняя толща образовалась в условиях умеренной ветровой деятельности и сравнительно высокой влагообеспеченности, о чем свидетельствуют широкое развитие почвенных горизонтов и присутствие низко-Mg-карбонатов. Верхняя толща, сформировавшаяся в более холодных и сухих условиях с повышенной динамикой эоловых процессов, характеризуется наличием кальцита, высоко-Mg кальцита и Са-избыточного доломита. В результате выявления типоморфного значения ассоциаций и кристаллохимических характеристик карбонатных минералов впервые для четвертичных субаэральные отложений

показано, что вариации в составе и структуре аутигенных карбонатных минералов могут служить индикатором климатических изменений.

5.1.4 Заключение

Таким образом, разрез Улан-Жалга содержит отложения всех основных стратиграфических подразделений плейстоцена, характеризуется разнообразием литолого-фациального строения и палеонтологической многослойностью. Уникальная последовательность из 21 фаунистического горизонта и 18 погребенных почв, хорошая степень корреляции палеомагнитной записи с палеонтологическими данными делают природный архив Улан-Жалга ценным объектом для палеогеографического и биостратиграфического анализа, а комплекс полученных результатов позволяет его отнести к числу ключевых опорных разрезов верхнего кайнозоя юга Восточной Сибири. По полноте и детальности климатостратиграфической записи Улан-Жалга превосходит важнейший опорный разрез континентального квартера Байкальского региона Тологой, с которым он четко и надежно коррелируется.

5.2 Первые результаты изучения донных отложений пролива Малое Море и залива Култук (оз. Байкал)

5.2.1 Введение

Для поиска новых высокоразрешающих архивов природной среды региона была опробована верхняя толща донных отложений оз. Байкал. При выборе новых объектов мы ориентировались на уже имеющиеся картографические материалы и опубликованные результаты предыдущих исследований.

5.2.2 Материалы и методы

Весной 2023 г. было отобрано несколько коротких кернов из донных отложений оз. Байкал: в проливе Малое Море и его заливах, а также в заливе Култук. Три керна были вскрыты в лабораторных условиях Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. Для отложений этих кернов была измерена магнитная восприимчивость капшметром ПИВМ («Геодевайс», Россия). Основой выбора точки бурения в заливе Култук стала батиметрическая информация с топокарты [48]. Потому предполагалось провести отбор на расстоянии 1 километра от берега, где заканчивается крутой подводный склон и начинается более пологий участок, аккумулирующий осадочный материал вне подводных продолжений конусов выноса. Согласно карте, глубина в точке отбора была бы в диапазоне 50–100 м. В действительности, глубина превысила 200 м. 70-метровая глубина была нами об-

наружена в 450 м от берега. В этой точке и был взят керн. В проливе Малое Море было отобрано несколько кернов, из которых позднее вскрыты два: из самого пролива и из залива Хагдан-Далай.

5.2.3 Результаты

Результаты измерения магнитной восприимчивости отложений из керна из зал. Култук показаны на рисунке 24. Высокие значения магнитной восприимчивости свидетельствуют о преобладании повышенного поступления в залив во время аккумуляции вскрытой толщи терригенных отложений. С учётом значительного уклона дна в месте отбора (1:17) пригодность данного разреза для палеогеографических реконструкций невысока. Для выбора точки бурения в этом районе необходимо проведение детальной батиметрической съёмки усилиями нашего коллектива.

Результаты измерения магнитной восприимчивости отложений в кернах из пролива Малое Море и зал. Хагдан-Далай показаны на рисунке 25. В отложениях из керна в проливе Малое Море фиксируются три пика магнитной восприимчивости. Возможно, что они соответствуют интервалам максимальной гидродинамической активности р. Сарма, когда ее воды, насыщенные терригенным материалом, могли достигать точки отбора керна. Напротив, в зал. Хагдан-Далай величина магнитной восприимчивости очень низкая. В отдельных интервалах отложений в керне она имеет отрицательные значения, свидетельствуя о спокойной гидродинамической обстановке в точке отбора (низком привносе терригенного материала), а во время формирования слоя на глубине 30–70 см от поверхности керна о практически полном отсутствии поступления минерального материала с побережья оз. Байкал.

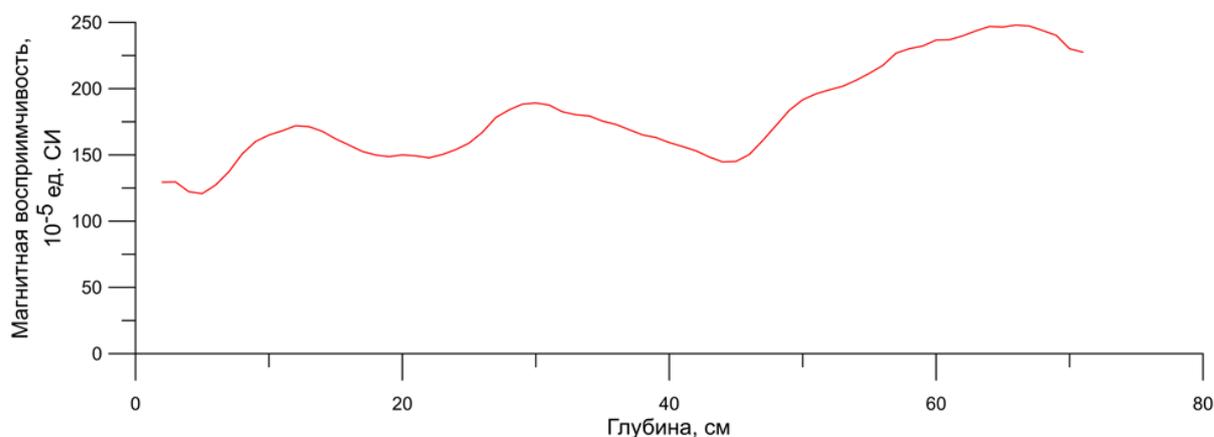


Рисунок 24 – Магнитная восприимчивость керна из зал. Култук

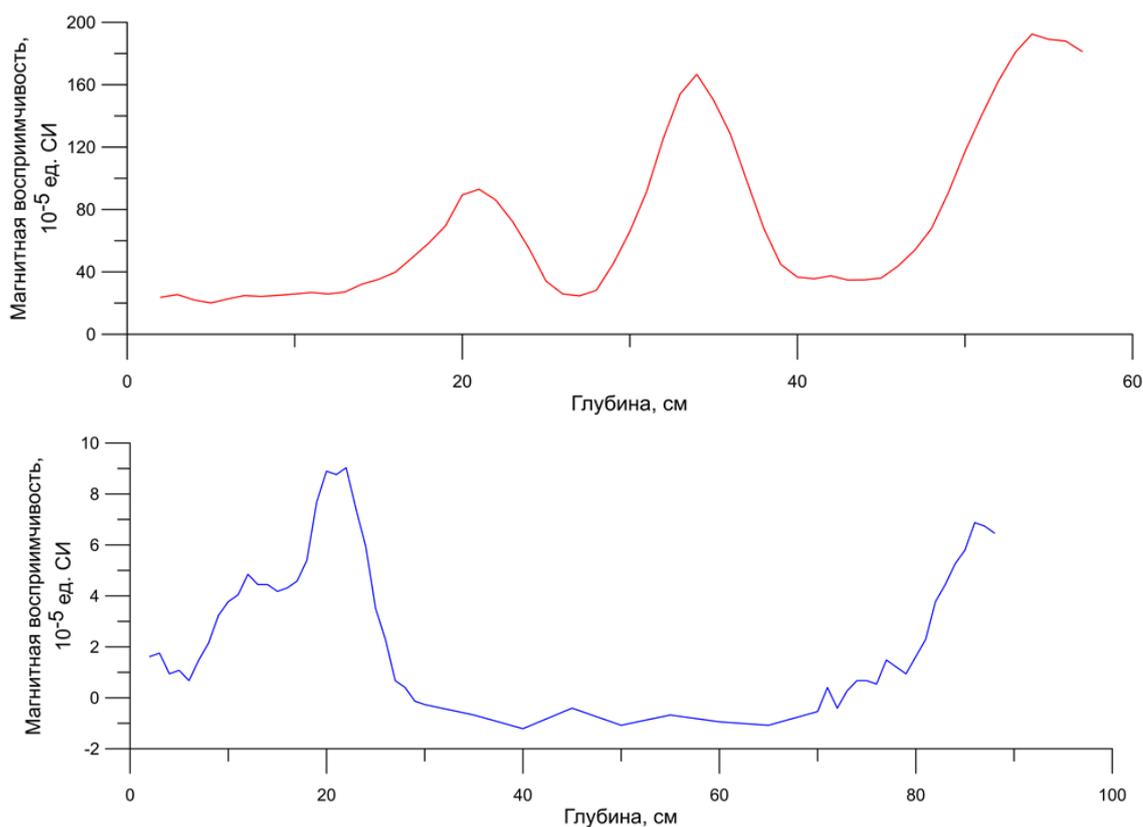


Рисунок 25 – Магнитная восприимчивость кернов из пролива Малое Море (красный цвет) и зал. Хагдан-Далай (синий цвет)

5.2.4 Заключение

Таким образом, изменение величин магнитной восприимчивости в донных отложениях опробованных заливов и пролива оз. Байкал будут очень полезны для извлечения сигналов изменчивости климата, связанных с потоком терригенного материала эолового и/или речного происхождения в ответ на силу местного ветра или на вариации суммы атмосферных осадков. Атмосферные осадки наряду с изменениями в растительном и почвенном покрове в значительной степени контролируют эрозионные и осадочные процессы в системе водосборный бассейн – побережье озера – донные отложения. Поскольку изменения в поверхностном стоке, растительном покрове и почвенно-педогенных процессах тесно связаны с изменением региональной атмосферной циркуляции под воздействием ее глобальных вариаций, то магнитная восприимчивость донных отложений оз. Байкал может стать еще одним ценным источником информации для изучения палеоклимата на юге Восточной Сибири.

5.3 Эволюция ландшафтов и климата в горах Восточных Саян в позднеледниковое время и в голоцене

5.3.1 Введение

Горные озера и их водосборные бассейны наиболее чувствительны к глобальным климатическим изменениям [49]. Однако наши знания о ландшафтах и климате горных регионов юга Восточной Сибири после последнего оледенения все еще очень скудны. Между тем, в Восточном Саяне расположено множество озер различного происхождения, в донных отложениях которых хранятся длительные, высокоразрешающие записи природной среды в позднеледниковье-голоцене [50]. Поэтому целью нашего исследования была реконструкция природной среды бассейна оз. Каскадное за последние 13200 лет на основе РФА анализа его донных отложений для лучшего понимания причин региональных изменений природной среды, а также реакции ландшафтов на длительные изменения глобального климата.

5.3.2 Общая характеристика района исследования

Ледниковое оз. Каскадное расположено на Окинском плато в ВС, на высоте 2080 м над уровнем моря. Его максимальная глубина 7 м, площадь поверхности 2,5 км² (рисунок 26). Озеро питается за счет атмосферных осадков и разгрузки подземных вод. Климат континентальный. Среднегодовая температура -4°C , средняя температура января -24°C , июля $+11^{\circ}\text{C}$, за год выпадает около 400 мм осадков. Преобладает западный перенос воздушных масс. Для водосбора озера характерен прерывистый растительный покров, в котором преобладают участки травянистых и кустарниковых тундр, встречаются островки лиственницы, ивы и пихты. Последняя – стелющейся формы.

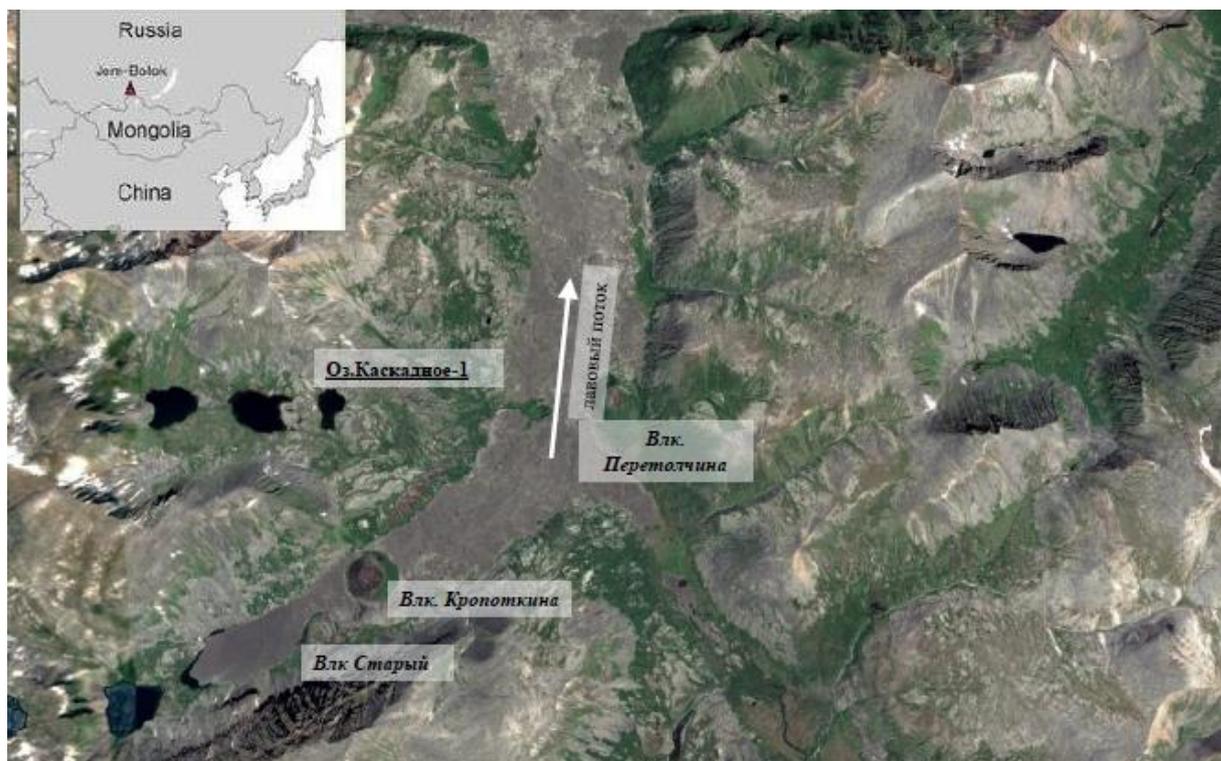


Рисунок 26 – Карта, основанная на данных Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) V.4.1, показывающая положение района исследований на юге Байкальского региона (врезка вверху слева), а также положение оз. Каскадное-1 в цепочке из трех озер.

5.3.3 Материалы и методы

Разрез озерных отложений был вскрыт полностью с захватом подстилающих ледниковых отложений. Длина керна составила 150 см. В литологии отложений выделяются два основных слоя: нижний (144–150 см) из серой плотной алевролитистой глины, верхний (0–144 см) – биогенно-терригенные илы с диатомовыми водорослями [51]. Возрастная модель керна базируется на семи УМС радиоуглеродных датах, полученных в гор. Познань (Польша). Модель построена в программе Oxcal 4.2 с калибровочной кривой INTCAL 13 [52].

Пробы для определения основных и микроэлементов (Sr, Zr) отбирались из каждого сантиметра керна согласно методике [53]. Спектры РФА измеряли с помощью спектрометра РФА с дисперсией по длине волны S4 Pioneer (Bruker AXS, Карлсруэ, Германия). Калибровочные кривые строились с использованием аттестованных эталонных материалов осадочных пород.

5.3.4 Результаты и их обсуждение

Ряд исследований показали, что нормализация на Al может решить проблему переменного разбавления в записях элементов из-за поступления общего органического углерода. Поэтому мы нормализовали элементы по Al, который является наиболее нераство-

римым (как в кислородных, так и в бескислородных условиях) и распространенным элементом земного происхождения [54]. На рисунке 27 видно, что все основные элементы в записи оз. Каскадное-1, за исключением Р и микроэлементов, имеют максимумы ок. 13200–12800 л.н. в слое серой ледниковой глины. Около 12800–12000 л.н. (биогенно-терригенный ил) значения Na, K, Ca, Mg, Al, Si, Ti, Mn, Sr и Zr снижаются. Между 12000 и 7500 л.н. содержание всех основных элементов остается близким к постоянным, а концентрации Na, Mg, Al и Si незначительно повышаются. Позднее 7500 кал. л.н. содержания всех элементов возрастают, тогда как значение Ca/Al, Mg/Al имеет тенденцию к постепенному снижению. Значение Р достигает максимума в верхних двух сантиметрах.

Следуя имеющимся результатам исследований [55] мы также рассматриваем донные отложения ледникового оз. Каскадное-1 как осадочный архив, сформированный отложениями, поступающими со склонов его котловины и бассейна. Дело в том, что континентальный климат Восточной Сибири не способствует значительному химическому выветриванию даже в теплые периоды. Это приводит к тому, что элементный состав отложений, в первую очередь, зависит от физического выветривания, в ходе которого элементы поступали в ледниковые озера преимущественно в виде обломочного материала [56]. Это особенно касается отложений озер, расположенных вблизи ледников [56]. На геохимический состав осадков в первую очередь влияют эрозионные и биотические процессы на водоразделе, а также размер частиц осадков и лишь незначительно - химическое преобразование осадков в пресной холодной воде озера [57]. Эти процессы отражают изменения палеоэкологической среды и реагируют на эти изменения. Между тем, вариации Fe/Mn в отложениях могут быть использованы как индикаторы прошлых окислительно-восстановительных условий в самих отложениях.

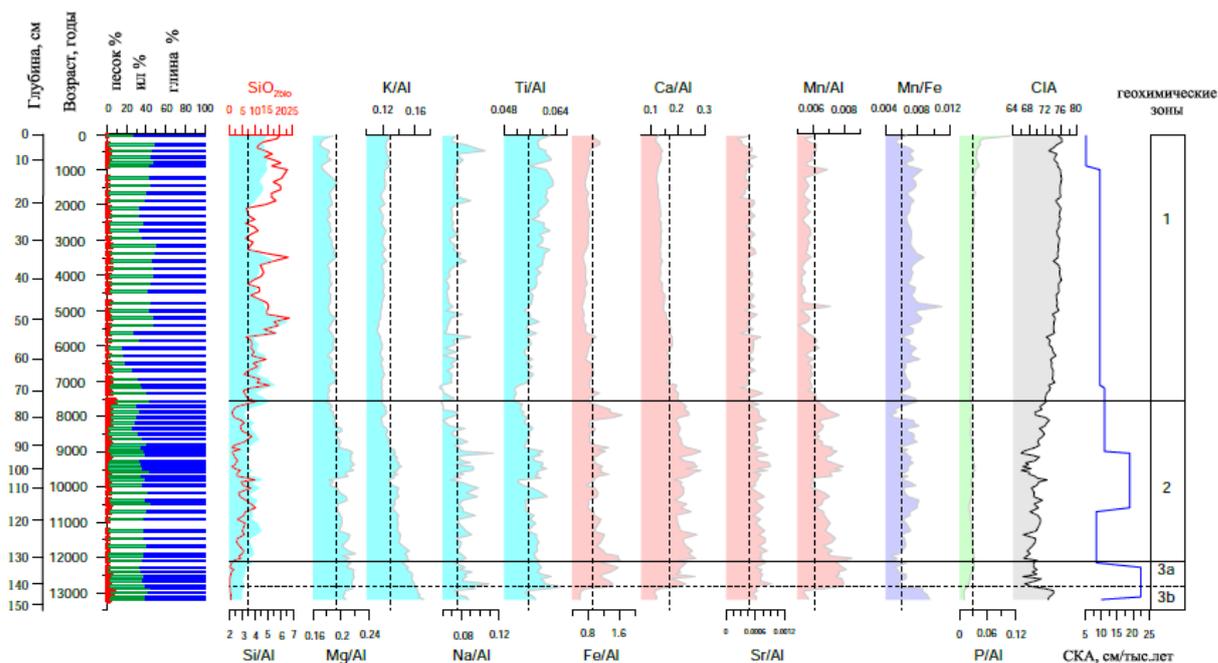


Рисунок 27 – Изменение отдельных литологических и геохимических параметров донных отложениях оз. Каскадное-1; вертикальные пунктирные линии обозначают средние значения отношений; СКА - средние скорости аккумуляции отложений, рассчитанные между соседними датами и выражены в см в 1000 лет; локальные геохимические зоны 1–3 выделены в модуле CONISS программы TILIA

В случае озера Каскадное-1, которое представляет собой полузакрытый бассейн, питающийся за счет осадков и грунтовых вод, отложения из различных источников на водоразделе как результат выветривания поступают непосредственно в озеро. Измеренные и рассчитанные основные оксиды были использованы для расчета индекса CIA, отражающего интенсивность силикатного выветривания. Анализ связи CIA с индикаторами, характеризующими размер зерен (Al/Si), позволяет определить пригодность индикатора CIA в качестве индикатора интенсивности выветривания и климатических изменений в озерных отложениях [58]. Более высокие значения Ti/Al могут отражать перенос в озеро терригенного материала за счет стока воды в озеро и служить индикатором увеличения количества осадков [59]. Однако это соотношение может также указывать и на эоловый принос [60], а также на изменения размера зерен [61]. Соотношения Mg/Al и K/Al используются для отражения изменений поступления в озеро материала с речным (потоки талых вод) переносом [61]. Приведенные выше сведениями о палеоэкологическом значении геохимических индексы и соотношения элементов из отложений оз. Каскадное-1 мы использовали для реконструкции природной среды в бассейне озера.

Согласно возрастной модели, ок. 13200 и 12800 л.н. в озере формировался слой алевролитистой глины. Мы предполагаем, что более высокое содержание песка и более высокие значения Mg/Al, K/Al и Si/Al характеризуют приток в озеро мелкозернистого мате-

риала (ледниковой муки), образовавшегося в результате ледниковой эрозии. Подобные изменения «подвижного» состояния ледника наблюдались и в других горных районах Восточной Сибири [56]. Большое количество взвешенных минеральных частиц угнетало развитие кремнепанцирных организмов (диатомовых водорослей), что отразилось в очень низких значениях биогенного кремнезема. Средняя скорость седиментации в это время была высокой (рисунок 27), что согласуется и с максимальным притоком минерального вещества в озеро.

Позднее, 12800–12000 л.н., началось накопление биогенно-терригенных илов. Геохимические индексы свидетельствуют об ослаблении притока терригенного вещества с талой ледниковой водой. В это время ледник, вероятно, уже отступил от котловины озера. С другой стороны, увеличение содержания «терригенных» элементов (Si/Al, Mg/Al, Fe/Al, Ti/Al и Na/Al) и снижение значений CIA могут свидетельствовать об более интенсивном поступлении мелкодисперсного терригенного вещества в озеро возможно, в состоянии «ледниковой муки». Мы также предполагаем, что тенденция повышения значений Ca/Al может быть следствием поступления пелитоморфного карбоната ледниковой муки из моренных отложений водосбора озера. Повышенные значения Ti/Al могут указывать как на повышенную влажность почвы в бассейне озера, так и на усиление эолового переноса. Однако пыльцевые индексы (рисунок 28) указывают на мощный снежный покров и обильное увлажнение почвы, что обеспечило благоприятную среду для ели *Picea*, лиственницы *Larix* и, главное, пихты *Abies* ок. 12000 л.н. Высокая влажность почвы подтверждает вывод о том, что титан поступал в составе обломочной фракции преимущественно со склонов бассейна, а не с эоловым переносом. Пониженные значения Mn/Fe указывают на восстановительную среду. Поскольку интервал 12800–12000 л.н. соответствует первой половине похолодания раннего дриаса, который нашел четкое выражение в записях глобального климата (рисунок 28), восстановительная обстановка в оз. Каскадное-1, вероятно, могла быть связана с более длительным периодом ледового покрова.

В интервале времени 12000–7500 л.н. происходило снижение поступления минерального вещества с речным переносом в озеро (Ti/Al, K/Al, Mg/Al, Fe/Al) наряду со слабым химическим выветриванием (CIA, рисунок 28). Повышение значений Mn/Fe позволя-

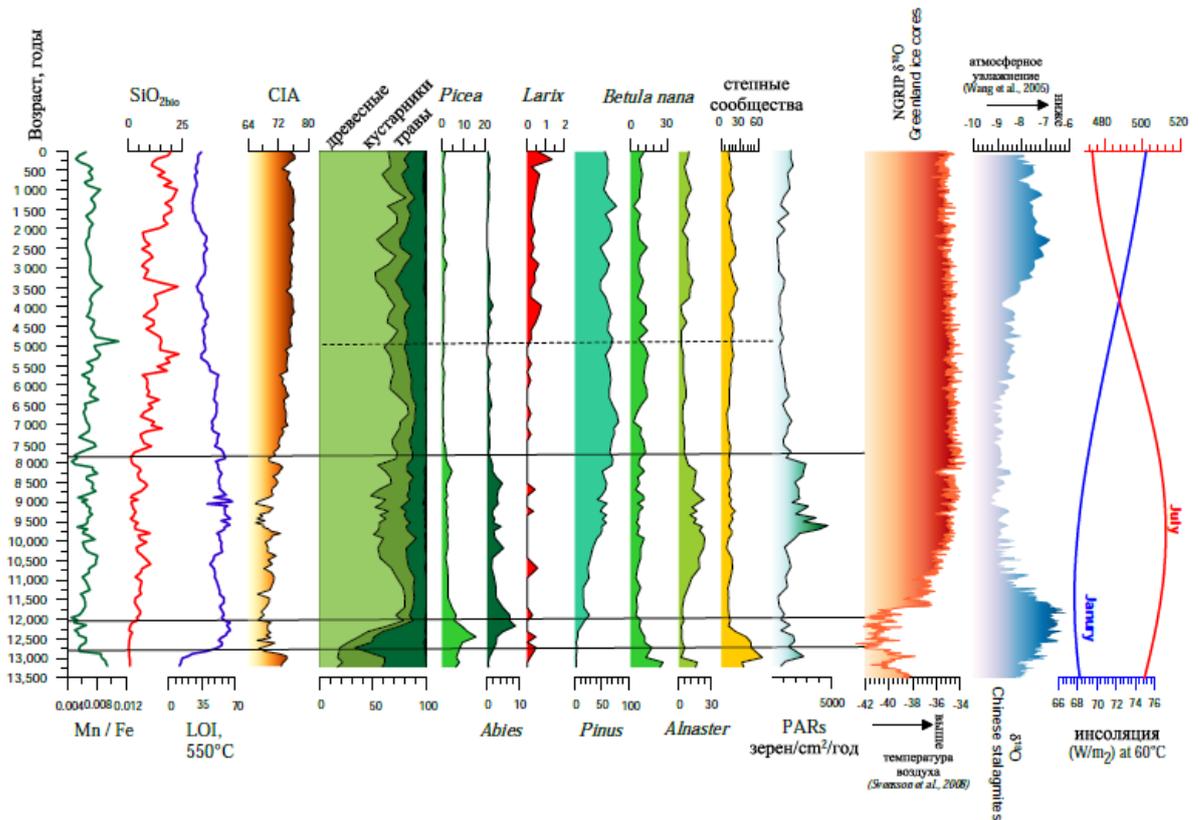


Рисунок 28 - Сравнение палеоэкологических индикаторов из отложений оз. Каскадное-1 и записей $\delta^{18}\text{O}$ из Гренландии, как индикатора температуры воздуха северного полушария (СП) [62], и из китайских сталагмитов [63], как индикатора тихоокеанского влагосодержащего муссона интенсивность и инсоляция северного июня на 55° с.ш. [64], построенные в соответствующих временных масштабах; PARs – скорости аккумуляции пыли; черными горизонтальными линиями очерчены выделенные локальные геохимические зоны, показанные на рисунке 27; самая верхняя пунктирная горизонтальная линия подчеркивает появление лиственных в районе бассейна оз. Каскадное в связи с изменениями климата в позднем голоцене

ет предположить, что усиленное перемешивание водной толщи, вероятно, произошло из-за более длительного периода открытой воды в более теплом, чем раньше, климате. Незначительные изменения в соотношениях Ca/Al и Sr/Al отражают продолжающееся поступление мелких пелитоморфных карбонатов в результате эрозии моренных отложений. Авторы полагают, что этому процессу способствовали не только талая вода ледников и снежников, но и большее количество осадков, о чем свидетельствуют пылевые индексы (рисунок 28). Они указывают на мягкие зимы, прохладное лето, высокую влажность почвы, мощный снежный покров и отсутствие позднеосенних/летних заморозков [65]. Густой растительный покров (самый высокий PAR), вероятно, препятствовал притоку терригенного материала в озеро и способствовал поступлению питательных веществ, что приводило к увеличению продуктивности озерной системы (более высокое содержание $\text{SiO}_{2\text{bio}}$).

Повышение значений Ti/Al и K/Al за последние 7500 лет свидетельствует об увеличении поступления терригенных веществ в озеро. Повышение Mn/Fe и Ti/Al предполагает более интенсивное перемешивание водной толщи из-за увеличения ветровой активности и/или сокращения периодов ледового покрова. Пыльцевые индексы указывают на то, что вблизи бассейна озера Каскадное-1 существовала скудная древесная растительность (лиственница) (рисунок 28), что позволяет предположить похолодание и снижение общего увлажнения, что согласуется с общим похолоданием климата в Алтае-Саянском регионе в это время из-за снижения летней инсоляции и глобальной температуры (рисунок 28), ослабления азиатского муссона, а также агградации многолетней мерзлоты [66].

5.3.5 Заключение

Первые записи неорганической геохимии из отложений оз. Каскадное-1 свидетельствуют об изменении элементного состава за последние 13 200 лет. В целом, с учетом пыльцевой записи, содержания биогенного кремнезема, литологии озерных отложений, геохимические индексы показывает, что отложения оз. Каскадное-1 накапливались в результате сочетания флювиогляциальных, склоновых процессов, особенности протекания которых контролировались изменением регионального климата в позднеледниковье-голоцене.

6 Определение элементных характеристик донных осадков озера Хубсугул (Монголия) для реконструкции условий формирования осадочного выполнения озерной впадины на протяжении последнего миллиона лет

6.1 Введение

Озеро Хубсугул, самое большое и глубокое озеро Монголии, находится на территории водосборного бассейна озера Байкал, располагаясь на высоте 1645 м над уровнем моря. В настоящее время оз. Хубсугул через р. Селенгу связано с оз. Байкал. По своим размерам озеро является вторым по величине водным бассейном Байкальской рифтовой системы с максимальной глубиной 262 м. Находясь в семиаридном климате Центральной Азии, озеро является прекрасным объектом для аккумуляции осадочных архивов, необходимых для реконструкции условия увлажнения в этом обширном регионе. За время формирования осадочного наполнения котловины оз. Хубсугул в глубоководных условиях межледниковых периодов в ней накапливались преимущественно тонкие гемипелагические осадки, а в ледниковые периоды при сильном обмелении озера – преимущественно карбонатные отложения [67]. В период с 2003 по 2010 в осадках озера была пробурена се-

рия глубоководных скважин. Самый протяженный разрез (81 метр) был получен в точке с глубиной воды в 240 метров.

6.2 Материалы и методы

Поскольку донные отложения оз. Хубсугул, сформировавшиеся в ледниковые периоды, обогащены карбонатами вплоть до появления в некоторых интервалах карбонатных корок [68, 69], то такие образования можно рассматривать в качестве индикаторов мелководных фаций. Одним из важнейших методов получения записей неорганической геохимии для реконструкции природной среды прошлого является исследование элементного состава осадков оз. Хубсугул.

Макро- и микроэлементный состав донных отложений озера Хубсугул определялся в 100 пробах из отложений скважины 2004 года бурения (HDP-04). Пробы отбирались по всей длине керна (81 м) из тех интервалов отложений в керне, которые были представлены алевритистой глиной (матрикс осадка). Степень обогащения карбонатами определялась по структурно – текстурным особенностям, цветовой гамме и реакции на добавление соляной кислоты HCl (10%). Методом РФА и РФА-СИ с использованием оборудования ЦКП ИГХ СО РАН (Иркутск) и ЦКП ИГМ СО РАН (Новосибирск) в пробах определены основные породообразующие и микроэлементы: SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, S, Sr, Zr, Zn, Ag, Cu, Su, Mo, Pb, B, Ge Sr, Co, Ni, Se, V, Ba, Cr, Ga, Be, La, Ce, Nd, Yb, Y и др.

Анализ основных компонентов (PCA) проводился по 14 переменным (13 основных и микроэлементов, и LOI) с использованием программного обеспечения Excel Statistica для того, чтобы сгруппировать компоненты в соответствии с процессами осаждения, которые оказывают на них наибольшее влияние.

6.3 Результаты и их обсуждение

Поскольку концентрация биогенного кремнезема (SiO_{2bio}) в отложениях ледниковых периодов незначительна (не превышает 2%), особенно в этапы, относимые к накоплению ледниково-озерных глин, можно с уверенностью считать, что полученные наборы геохимических элементов отражают преимущественно терригенного осадконакопления. На рисунке 29 представлен результат анализа главных компонент петрогенных оксидов и некоторых микроэлементов из интервалов керна, отложения которых характеризуются повышенным содержанием карбонатов.

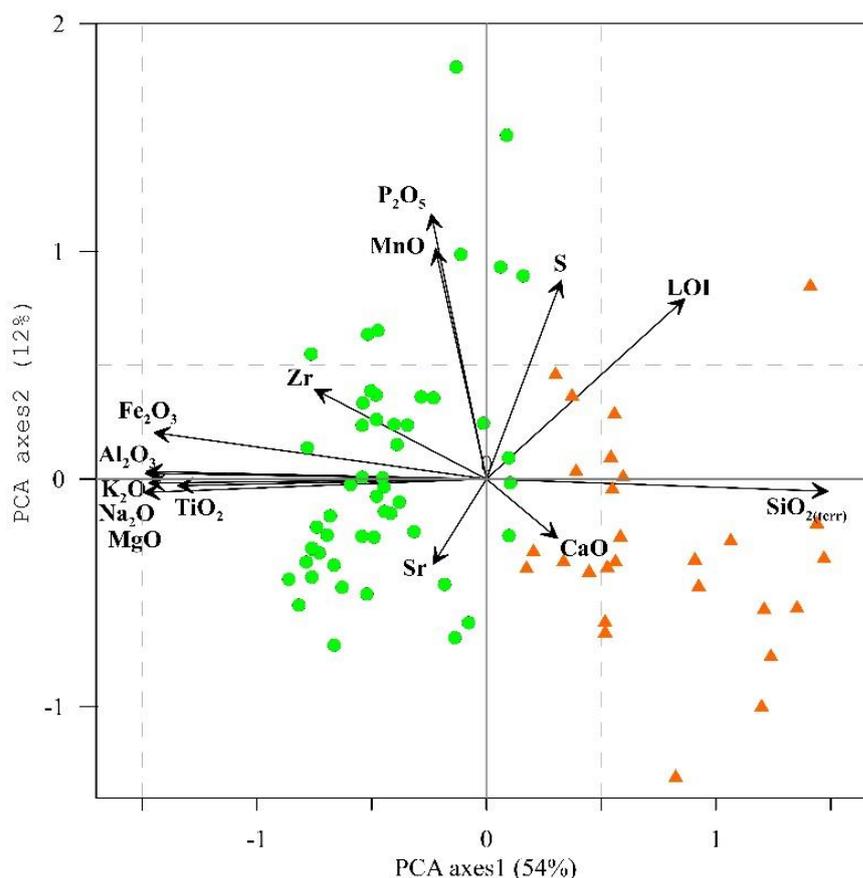


Рисунок 29 – результаты PCA анализа петрогенных элементов и некоторых микроэлементов из отложений скважины HDP-04 в этапы преимущественно карбонатного осадконакопления

PCA-анализ показал, что оси 1 и 2 объясняют 54 и 12% изменчивости элементного состава, соответственно (рисунок 29). Так, для оси PCA-1 характерна отрицательная корреляция между Fe, Al, K, Ti, Na и Mg, с одной стороны, и SiO₂, с другой. Ось PCA-2 образована P, Mn и S и LOI. Для Ca и Sr, не имеющих существенные нагрузки ни по одной из осей, также характерна отрицательная корреляция. Fe, Al, K, Ti, Na и Mg, вносящие решающий вклад в оценку PCA-1, выносятся из породообразующих минералов. Коренные породы бассейна оз. Хубсугул состоит из вулканических, метаморфических и осадочных пород или отложений [70]. То есть, основным источником шести основных элементов являются обломочные материалы, поступившие из водосборного бассейна в результате процессов эрозии и выветривания [71].

Сильная отрицательная корреляция этих шести основных элементов по оси PCA-1 с SiO₂ предполагает, скорее биогенную, чем терригенную природу кремния в отложениях. Почему в преимущественно карбонатных слоях отложений обнаружена такая анти-связь, мы пока не можем объяснить, и это будем предметом дальнейших исследований.

Незначительная нагрузка на ось PCA-2 (которая объясняет лишь 12% особенностей процессов аккумуляции отложений) биогенных элементов (P, Mn, S) и LOI как показателя общего органического вещества показывает их общий источник – скорее всего, слабый

приток с водосборного бассейна озера. Незначимые нагрузки Ca и Sr по обеим осям с их негативной взаимной корреляцией может означать или биохимические процессы (например, фотосинтез водорослей, если SiO_2 сформирован биогенным Si) или гидрологические изменения (напр., испарение, поверхностный сток).

6.4 Заключение

В целом, на данном этапе исследований, полученный набор геохимических элементов и их возможная связь с господствующими процессами осадкообразования соответствуют неблагоприятным природным условиям времени существования озерной системы, скорее всего, ледниковым. Это подтверждается и результатами предыдущих многочисленных исследований донных отложений оз. Хубсугул методами неорганической геохимии. Дальнейшие исследования позволят более детально оценить вклад различных источников поступления материала, оценить тектонический аспект формирования осадочного выполнения озерной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатами реализации плана научно-исследовательских работ 2023 года являются следующие:

– изучены особенности распределения ПХБ и ХОП в растительных сообществах наземных экосистем в антропогенно-измененном районе Прибайкалья на примере лесных сообществ в рекреационной зоне г. Иркутска;

– показано, что хвойные деревья обладают фильтрующей способностью СОЗ в течение года в сравнении с травянистой растительностью и лиственными деревьями;

– установлена зависимость величины коэффициентов накопления растения-почва и растение-воздух от вида и структурной части растения, а также от химической структуры СОЗ;

– показано, что устойчивые концентрации урана в воде оз. Байкал и его стока – р. Ангары поддерживаются как поступлением урана с глубинной водой во время частых активизаций блоков литосферы, так и дополнительным выщелачиванием из урансодержащих пород и рудопроявлений в береговой зоне и в бассейне оз. Байкал и выявлены различия значений концентраций между подземными водами вокруг оз. Байкал и водой устьев его притоков;

– установлено, что фито- и зоопланктон заливов Братского водохранилища в значительной степени аккумулируют потенциально токсичные элементы из водной среды. Фитопланктон наиболее интенсивно сорбирует из воды основные и слабо мобильные элементы (Al, Fe, As и Pb), в то время как в зоопланктоне, использующем и пищевую стратегию поглощения веществ, преимущественно ассимилируются подвижные и биодоступные в водных экосистемах элементы – Cu, Cd, Hg, Mn, Zn;

– рекомендовано применение планктона как инструмента интегральной оценки поступления потенциально опасных элементов в водные экосистемы для получения более объективной картины загрязнения по сравнению с точечным анализом воды и донных отложений;

– установлено наличие непрерывной стратиграфической последовательности отложений всех подразделений плейстоцена в разрезе Улан-Жалга, что дает основание отнесения его к числу ключевых опорных разрезов верхнего кайнозоя юга Восточной Сибири;

– показано, что записи неорганической геохимии из отложений оз. Каскадное-1 свидетельствуют о начале озерного седиментогенеза в нем ок. 13200 л.н.;

– ведущими процессами формирования отложений в озере на протяжении всего позднеледниковья-голоцена были флювиогляциальные и ряд склономоделирующих процессов;

– в свою очередь, особенности развития склоновых процессов, почв и растительности контролировались изменениями в региональном климате под воздействием сдвигов в глобальной климатической системе.

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

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях. Текст и приложения (с изменениями 2019 г.). Стокгольм.– 2001.– 53 с.– <http://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> (дата обращения 2022-09-12)
- 2 Wania F., Mackay D. Tracking the distribution of persistent organic pollutants // *Environmental Science and Technology*.– 1996.– Vol. 30.– P. 390A–396A
- 3 McLachlan M.S., Horstmann M. Forests as filters of airborne organic pollutants: a model // *Environmental Science and Technology*. – 1998. – Vol. 32. – P. 413–420
- 4 Battisti S., Boselli C., Ubaldi A., Isabelli C.R., Mauti T., Marta U.D., Scaramozzino P. Measurements of β and α hexachlorocyclohexane in *Juglans regia* and *Prunus spinosa* trees in a contaminated area, central Italy // *Environmental Science and Pollution Research*.– 2017.– Vol. 24.– P. 20876–20882
- 5 Бухарина И.Л., Двоглазова А.А. Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях. – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет».– 2010.– 184 с.
- 6 Mamontova E.A., Mamontov A.A. Air monitoring of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in Eastern Siberia: levels, temporal trends, and risk assessment // *Atmosphere*.– 2022.– Vol. 13(12). – 1971
- 7 Пространственно-временная изменчивость экосистем и климата Восточной Сибири в позднем плейстоцене-голоцене: отчет о НИР (промежуточный): 60 с.; рук. Безрукова Е.В.
- 8 Мамонтова Е.А., Тарасова Е.Н., Мамонтов А.А. Содержание стойких органических загрязнителей в почве, снеговой воде и растительности в Южном Прибайкалье // *Метеорология и гидрология*. – 2019. – № 2. – С. 86-98
- 9 Мельников Н.Н. Пестициды. Химия, технология и применение. М.: Химия, 1987. – 712 с.
- 10 Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Эколого-геохимическая оценка «отпечатков» стойких хлорорганических пестицидов в системе почва – поверхностная вода // *Агрохимия*. – 2008. – № 1. – С. 52–56.
- 11 Hülster A., Müller, J. F., Marschner H. Soil-plant transfer of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans to vegetables of the cucumber family (*Cucurbitaceae*) // *Environmental Science and Technology*.– 1994.– 28.– P. 1110-1115

- 12 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 // Геология и геофизика.– 2021.– Т. 62.– № 2.– С. 293–311
- 13 Макрыгина В.А., Суворова Л.Ф., Зарубина О.В., Брянский Н.В. Геохимия щелочных сиенитов Будунского массива и особенности их петрогенезиса (о. Ольхон) // Доклады РАН, 2016.– Т.469 (3).– С.336–343
- 14 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
- 15 Гребенщикова В.И., Носков Д.А., Герасимов Н.С. Геохимия и условия формирования Ангаро-Витимского гранитоидного батолита, Прибайкалье // Вестник ИрГТУ.– 2009.– № 3.– С. 24–30
- 16 Шимараев М.Н., Троицкая Е.С., Блинов В.В., Иванов В.Г., Гнатовский Р.Ю. Об апвеллингах в озере Байкал // Доклады РАН.– 2012.– Т. 442.– № 5.– С. 696–700
- 17 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
- 18 Диденков Ю.Н., Проскуракова З.В., Хаустов В.В., Мартынова М.А. Рифтогенное единство ультрапресных вод и углеводородов Байкальского региона // Сборник материалов четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». Улан-Удэ: Бурятский научный центр Сибири СО РАН.– 2020.– С. 327-330
- 19 Troitskaya E., Budnev N.; and Shimaraev M. Changes in the Heat Content of Water Column in the Slope Area of the Southern Basin of Lake Baikal in the 21st Century // Water.– 2022.– V.14.– N. 348
- 20 Блинов В.В., Гранин Н.Г., Мизандронцев И.Б., Гнатовский Р.Ю., Жданов А.А. Сезонные изменения вертикальной структуры водной толщи пелагиали Южного Байкала // Водные ресурсы.– 2017.– Том 44.– Выпуск № 3.– С. 285–295
- 21 Grebenschikova V.I., Kuzmin M.I., Suslova M.Yu. Long-term cyclicality of trace element in the Baikal aquatic ecosystem (Russia) // Environmental Monitoring and Assessment.– 2021.– V.193.– Article 260
- 22 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

- 23 ГН 2.1.5.2280-07 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 11 с.
- 24 Рихванов Л.П., Страховенко В.Д., Смирнов С.З., Литасов Ю.Д., Кулинич Е.А. Уникальный минерал надгруппы пирохлора из Прибайкалья (дополнение его первого описания, сделанного В.И. Вернадским) // Записки Российского минералогического общества.– 2018.– Т. 147.– № 6.– С. 75–89.
- 25 Alexeeva L.P., Alexeev S.V., Sholokhov P.A., Kononov A.M. Monitoring of Groundwater Quality in Listvyanka Settlement (Southwest Coast of Lake Baikal) // Geodynamics & Tectonophysics.– 2023.– № 14.– Т. 2.– Article 0697
- 26 Рампилов М.О., Рипп Г.С. Редкометалльная минерализация альбитовых гранитов Западного Забайкалья. // Литосфера.– 2019.– Т. 19.– №4.– С. 598–614
- 27 Склярова О.А. Распределение микроэлементов в водной толще среднего Байкала // География и природные ресурсы.– 2011.– № 1.– С. 53–59
- 28 Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И. Циклически-волновой характер распределения химических элементов в воде истока р. Ангары (сток Байкала) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.– 2022.– Т. 505.– № 2.– С. 199–206
- 29 Батурин Г.Н. Распределение элементов в железомарганцевых конкрециях морей и озер // Литология и полезные ископаемые.– 2019.– № 5.– С. 404-417
- 30 Rasskazov S.V., Pyasova A.M., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P. Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation // Geodynamics & Tectonophysics.– 2020.– V.11.– N. 3.– P. 632–650
- 31 Varol M. Environmental, ecological and health risks of trace metals in sediments of a large reservoir on the Euphrates River (Turkey) // Environmental Research.– 2020. – Vol. 187: 109664
- 32 Пастухов М.В., Полетаева В.И. Биогеохимическая индикация фито- и зоопланктоном загрязнения водоемов БПТ. В кн. Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории / отв. ред. И.В. Бычков, Д.П. Гладкочуб, Г.М. Ружников. – Новосибирск: СО РАН, 2022. – С. 156-164
- 33 USEPA, 1991. Technical Support Document For Water Quality-based Toxics Control (EPA/505/2-90-001). – Washington, DC.– 1991.

- 34 Mazej Z., Al Sayegh-Petkovsek S., Pokorny B. Heavy metal concentrations in food chain of Lake Velenjsko jezero, Slovenia: an artificial lake from mining // Archives of Environmental Contamination and Toxicology.– 2010.– Vol. 58.– P. 998-1007
- 35 Ciesielski T.M., Pastukhov M.V., Leeves S.A., Farkas J., Lierhagen S., Poletaeva V.I., Jenssen B.M. Differential bioaccumulation of potentially toxic elements in benthic and pelagic food chains in Lake Baikal // Environmental Science and Pollution Research.– 2016.– V. 23.– I. 15.– 15593-15604
- 36 Monferrán M.V., Garnero P., De Los Angeles Bistoni M., Anbar A.A., Gordon G.W. Wunderlin, D.A. From water to edible fish. Transfer of metals and metalloids in the San Roque Reservoir (Córdoba, Argentina) // Ecological Indicators.– 2016.– Vol. 63.– P. 48–60
- 37 Nfon E., Cousins I.T., Järvinen O., Mukherjee A.B., Verta M., Broman D. Trophodynamics of mercury and other trace elements in a pelagic food chain from the Baltic Sea // The Science of The Total Environment.– 2009.– Vol. 407.– P. 6267–6274
- 38 Håkanson L. Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control – A Sedimentological Approach // Water Research.– 1980.– Vol. 14.– I. 8.– P. 975–1001
- 39 Kabata-Pendias A. 2011. Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edn. CRC Press, Taylor and Francis Group, New York
- 40 Farooq M A, Gill R A, Ali B, Wang J, Islam F, Ali S, Zhou W. 2016. Subcellular distribution, modulation of antioxidant and stress-related genes response to arsenic in Brassica napus L // Ecotoxicology.– 2016.– vol. 25(2).– P. 350–366
- 41 Yan X L, Lin L Y, Liao X Y, Zhang W B. Arsenic accumulation and resistance mechanism in Panax notoginseng, a traditional rare medicinal herb // Chemosphere.– 2012.– 87.– P. 31–36
- 42 Ербаева М.А., Щетников А.А., Казанский А.Ю., Матасова Г.Г., Хензыхенова Ф.И., Филинов И.А., Намзалова О.Д.-Ц., Нечаев И.О. Новый опорный разрез плейстоцена Улан-Жалга в Западном Забайкалье // Доклады РАН.– 2019.– Т. 488.– № 3.– С. 48–52
- 43 Симонов Ю.Г. Региональный геоморфологический анализ. М.: Изд-во МГУ, 1972.– 251 с.
- 44 Агаджанян А.К. Комплексные биостратиграфические исследования новейших отложений. Учебно-методическое пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2008.– 61 с.
- 45 Таухе L. Essentials of Paleomagnetism. Berkeley: University of California Press, 2010. 512 p.

- 46 Retallack G.J. *Soils of the Past: An Introduction to Paleopedology*. 2nd Ed. Oxford: Blackwell, 2001.– 600 p.
- 47 Калинин П.И., Алексеев А.О., Савко А.Д. Лёссы, палеопочвы и палеогеография квартера юго-востока Русской равнины. Воронеж: ВГУ, 2009.– 139 с.
- 48 Лист М-48-004 / сост. и подгот. к печати Генштабом СССР под рук-ом пол-ка Е.С. Бурмистрова.– 1 : 100 000, 1 км в 1 см ; пр-ция равноугольная поперечная цилиндрическая Гаусса–Крюгера. – 1976.
- 49 Catalan J., Bartons M., Camarero L., Grimalt J.O. Mountain waters as witnesses of global pollution, in: Pechan P., de Vries G.E. (Eds.), *Living with Water: Targeting Quality in a Dynamic World*. Springer, New York, 2013.– P. 31–67.
- 50 Shchetnikov A., Bezrukova E.V. Lakes of the Jom-Bolok Volcanoes Valley in the East Sayan Mts., Baikal region: Morphogenesis and potential for regional paleoenvironmental studies // *Journal of Geographical Sciences*.– 2019.– V. 29.– № 11.– P. 1823–1840
- 51 Bezrukova E.V., Shchetnikov A.A., Kulagina N.V., Amosova A.A. Lateglacial and Holocene vegetation and environmental change in the Jom-Bolok volcanic region, East Sayan Mountains, South Siberia, Russia // *Boreas*.– 2021.– 50 (4).– P. 935-947
- 52 Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haflidason H., Hajdas I., Hatte C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott J.R., Southon E.A., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht, J. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP // *Radiocarbon*.– 2013.– 55.– P. 1869–1887
- 53 Amosova A.A., Chubarov V.M., Pashkova G.V., Finkelshtein A.L., Bezrukova E.V. Wavelength dispersive X-ray fluorescence determination of major oxides in bottom and peat sediments for paleoclimatic studies // *Applied Radiation and Isotopes*.– 2019.– 144.– P.118–123
- 54 Zhong W., Pen Z., Xue J., Ouyang J., Tang X., Cao J. Geochemistry of sediments from Barkol Lake in the westerly influenced northeast Xinjiang: Implications for catchment weathering intensity during the Holocene // *Journal of Asian Earth Sciences*.– 2012.– 50.– P. 7–13
- 55 Zhang C., Zhang W., Feng Z., Mischke S., Gao X., Gao D., Sun F. Holocene hydrological and climatic change on the northern Mongolian Plateau based on multi-proxy records from Lake Gun Nuur // *Palaeogeography Palaeoclimatology*.– 2012.– 325.– P. 75–86

- 56 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.– 524.– P. 4–12
- 57 Sabatier P., Moernaut J., Bertrand S., Van Daele M., Kremer K., Chaumillon E., Arnaud F. A Review of Event Deposits in Lake Sediments // *Quaternary*.– 2022.– 5.– 34
- 58 Yusupova A.R., Nourgalieva N.G. Geochemical basis of climate change indication in the Holocene sediments of Lake Bannoe (Southern Urals, Russia). *Uchenye Zap. Kazan. Universiteta. Seriya Estestv. Nauk.*– 2021.– 163.– P. 514–526
- 59 Alongi D.M. Macro- and Micronutrient Cycling and Crucial Linkages to Geochemical Processes in Mangrove Ecosystems // *Journal of Marine Science and Engineering*.– 2021.– 9.– 456
- 60 Martinez-Ruiz F., Kastner M., Gallego-Torres D., Rodrigo-Gamiz M., Nieto-Moreno V., Ortega-Huertas M. Paleoclimate and paleoceanography over the past 20,000 yr in the Mediterranean Sea Basins as indicated by sediment elemental proxies // *Quaternary Science Reviews*.– 2015.– 107.– P. 25–46
- 61 Takeuchi N., Fujita K., Aizen V.B., Narama C., Yokoyama Y., Okamoto S., Naoki K., Kubota J. The disappearance of glaciers in the Tien Shan Mountains in Central Asia at the end of Pleistocene // *Quaternary Science Reviews*.– 2014.– 103.– P. 26–33
- 62 Svensson A., Andersen K.K., Bigler M., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Davies S.M., Johnsen S.J., Muscheler R., Parrenin F., Rasmussen S.O., Røsthlisberger R., Seierstad I., Steffensen J.P., Vinther B.M. A 60000 year Greenland stratigraphic ice core chronology // *Climate of the Past*.– 2008.– Vol. 4.– P. 47–57.
- 63 Wang Y., Cheng H., Edwards R.L., He Y., Kong X., An Z., Wu J., Kelly M.J., Dykoski C.A., Li X. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate // *Science*.– 2005.– 308.– P. 854–857
- 64 Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // *Astronomy and Astrophysics*.– 2004.– 428.– P. 261–285
- 65 Bezrukova E.V., Shchetnikov A.A., Kulagina N.V., Amosova A.A. Lateglacial and Holocene vegetation and environmental change in the Jom-Bolok volcanic region, East Sayan Mountains, South Siberia, Russia // *Boreas*.–2021.– 50 (4).– P. 935–947
- 66 Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Yagunov M.N. Decline of Dark Coniferous Stands in Baikal Region // *Contemporary Problems of Ecology*.– 2016.– 9.– P. 617–625

- 67 Prokopenko A.A., Kuzmin M.I., Williams D.F., Gelety V.F., Kalmychkov G.V., Gvozdkov A.N., Solotchin P.A. Basinwide sedimentation changes and deglacial lake-level rise in the Hovsgol basin, NW Mongolia // *Quaternary International*.– 2005.– 136.– P. 59–69
- 68 Коллектив участников проекта „Хубсугул-бурение“. Строение донных осадков озера Хубсугул: его связь с геологическими и климатическими факторами // *Геология и геофизика*.– 2007.– Т. 48 – №. 11.– С. 1117-1143
- 69 Members H.D.P. Sedimentary record from Lake Hovsgol, NW Mongolia: Results from the HDP-04 and HDP-06 drill cores // *Quaternary International*.– 2009.– Т. 205.– №. 1–2. – С. 21-37
- 70 Tomurtogoo O., Byamba J., Badarch G., Minjin Ch., Orolmaa D., Khosbayar P., Chuluun D. (eds) Geologic map of Mongolia: mineral resources authority of Mongolia, geological survey and Mongolian Academy of Sciences, Institute of Geology and Mineral Resources, 14 sheets, scale 1:1,000,000, 1998.
- 71 Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Stolpovskaya VN., Karabanov E.B., Prokopenko A.A., Tkachenko L.L. Mineralogical and crystallochemical indicators of environmental and climatic changes in Pleistocene–Holocene sediments of Lake Khubsugul (Mongolia) // *Doklady Earth Science*.– 2003.– 391A.– P. 866–870

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций 2023 г. по теме исследований

Статьи

- 1 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
- 2 Chuparina E.V., Poletaeva V.I., Pastukhov M.V. Metals Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn and Pb in Aquatic Plants of Man-made Water Reservoir, Eastern Siberia, Russia: Tracking of Environment Pollution // Pollution.– 2023.– 9(1).– P. 23-38. DOI: 10.22059/POLL.2022.339248.1374
- 3 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. 417: 02013 (2023) (21.08.2023) DOI: 10.1051/e3sconf/202341702013
- 4 Sait S.T.L., Rinø S.F., Gonzalez S.V., Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Farkas J., Jensen B.M., Ciesielski T.M., Asimakopoulou A.G. Occurrence and tissue distribution of 33 legacy and novel per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in Baikal seals (*Phoca sibirica*) // Science of the Total Environment.– 2023.– 889: 164096. (01.09.2023) DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164096
- 5 White D., Parfitt S.A., Shchetnikov A.A., Tesakov A.S., Preece R.C. A Holocene floodplain sequence from the Kirenga Valley, Lake Baikal region (Siberia), and its significance for molluscan and mammalian biogeography // Quaternary International.– 2023.– 646.– P. 51-67 (10.02.2023) DOI: 10.1016/j.quaint.2022.09.005
- 6 Zhang D., Blyakharchuk T.A., Bezrukova E.V., Huang X., An C., Su C., Li Y. Holocene rates of vegetation composition change differ between high and middle-to-low elevations in the Central Arid Zone of Asia // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.– 2022.– 618: 111526. (15.05.2023) DOI: 10.1016/j.palaeo.2023.111526
- 7 Герман А.В., Мамонтов А.А., Мамонтова Е.А. Полихлорированные бифенилы в леще abramis brama Волжского плеса Рыбинского водохранилища: зависимость от возраста рыб и оценка риска для здоровья человека // Биология внутренних вод.– 2023.– 3.- P. 405-406. DOI: 10.31857/S0320965223030099
- 8 Гребенщикова В.И., академик РАН Кузьмин М.И., Демьянович В.М. Уран в воде Байкальской экосистемы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.– 2023.– 512(2).– P. 332-340. (01.10.2023) DOI: 10.31857/S2686739723601114

- 9 Usoltseva M., Titova L., Hassan A., Reshetova S., Rodionova E., Maslennikova M., Chuvashova I., Rasskazov S. Diversity, stratigraphy and ecology of diatoms and plant pollen in the Miocene-Pliocene sediments of the Vitim Plateau (Baikal region, Russia) // Acta Biologica Sibirica.– 2023.– 9.– P. 643–682. DOI: 10.5281/zenodo.8373408
- 10 Щетников А.А., Казанский А.Ю., Ербаева М.А., Матасова Г.Г., Иванова В.В., Филинов И.А., Хензыхенова Ф.И., Намзалова О.Д.Ц., Нечаев И.О. Строение и условия формирования верхнекайнозойских отложений опорного разреза Улан-Жалга, Западное Забайкалье // Стратиграфия. Геологическая корреляция.– 2023.– 31(6).– P. 113-139. DOI: 10.31857/S0869592X2306011X