

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 № НИИОКТР АААА-А17-
117041910028-4

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН

д.г.-м.н. Перепелов А.Б.

15 сентября 2020 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«ЭВОЛЮЦИЯ ЭКОСИСТЕМ ВНУТРЕННЕЙ АЗИИ В ПОЗДНЕМ КАЙНОЗОЕ
– ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СЦЕНАРИИ»

(промежуточный)

Номер проекта в ИСГЗ ФАНО № 0350-2019-0004

Приоритетное направление IX.127. Динамика и механизмы изменения ландшафтов, климата и биосферы в кайнозое. История четвертичного периода. Программа IX.127.1. Факторы, определяющие изменение среды и климата Центральной Азии в кайнозое

Руководитель проекта
доктор географ. наук.


(подпись, дата)

Безрукова Е.В.

Иркутск, 2020

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ:

Руководитель НИР, гнс, д-р географич. наук Бер 14.01.2020
подпись, дата

Исполнители:
снс, канд. биол. наук Минд 14.01.2020
подпись, дата

снс, канд. мед. наук Свет 14.01.2020
подпись, дата

снс, канд. геол.-мин. наук 14.01.2020
подпись, дата

нс, канд. геол.-мин. наук Крайнов 14.01.2020
подпись, дата

нс, канд. геол.-мин. наук Иванов 14.01.2020
подпись, дата

нс, канд. геол.-мин. наук Свет 14.01.2020
подпись, дата

мнс 14.01.2020
подпись, дата

ведущий инженер, канд. геол.-мин. наук Щетников 14.01.2020
подпись, дата

УДК 550.4:552.57/.58

Е. В. Безрукова (реферат, введение, разделы 2.1, 2.2, 2.3 заключение, компиляция отчета)

А.А. Мамонтов (раздел 5)

Е.А Мамонтова (раздел 5)

Г.В. Калмычков (раздел 4)

М.А. Крайнов (раздел 2.1, оформление отчета по ГОСТу)

Е.В. Иванов (раздел 3)

С.С. Кострова (раздел 1)

А.А. Амосова (раздел 2.2)

А.А. Щетников (раздел 2.3)

Ключевые слова: НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА, ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ОТЧЕТ

РЕФЕРАТ

Отчет 66 с., 1 кн., 23 рис., 5 табл., 58 источников, 3 прил.

ЭВОЛЮЦИЯ ЭКОСИСТЕМ ВНУТРЕННЕЙ АЗИИ В ПОЗДНЕМ КАЙНОЗОЕ – ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СЦЕНАРИЙ

Объектами исследования были донные отложения озер Республики Бурятия, субаэральные разрезы Забайкалья, современные почвы, пробы воздуха.

Цель работы – реконструкция пространственно-временной эволюции региональных изменений природной среды и ландшафтов внутриконтинентальной территории России по меридиональному и высотному профилям в контексте их глобальных вариаций, изучение механизмов и причин этих изменений.

Ключевые слова: природная среда, плейстоцен и голоцен, изотопный состав атмосферных осадков, ландшафты, климат, Восточная Сибирь, донные отложения, геохимические маркеры, биогеохимические циклы.

Проведено комплексное изучение кернов донных отложений из озер, торфов из разных районов гор Восточного Саяна методами абсолютной геохронологии, рентгенофлуоресцентного, палеомагнитного, палинологического, литологического анализов. Показана перспективность использования результатов гранулометрического состава, петрохимических характеристик, магнитных свойств донных отложений озер В.Саяна для комплексных реконструкций палеоэкологических условий седиментогенеза. Впервые для подгорно-равнинных районов В. Саяна получена детальная датированная запись изменения растительности и климата ранних этапов позднеледникового периода >15550 л.н. до 12900 л.н. Показана тесная связь этих изменений с глобальным климатом. Показана роль геохимических записей из донных отложений озера Байкал как индикаторов природной среды региона в позднем кайнозое.

Установлено, что причиной повышенных концентраций ПХБ южного Байкала является влияние ангарской промышленной зоны и, в большей степени, западный перенос вдоль южного берега Байкала через промышленные предприятия южного Байкала и особенно БЦБК. Изучен компонентный состав и изотопный состав углерода УВГ подводного нефтегазового проявления Горевой утес, где одновременно происходит разгрузка нефти и газа.

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.....	7
Основная часть.....	8
1 Исследование изотопного состава атмосферных осадков Байкальского региона (на примере г. Иркутска).....	8
2 Комплексные исследования озерных геосистем южного Предбайкалья	14
2.1 Гранулометрические и петромагнитные исследования высокогорных озёр Восточного Саяна (на примере оз. Хикушка)	14
2.2 Первая реконструкция геохимической эволюции геосистемы озера Хикушка.....	20
2.3 Результаты первого этапа тефрохронологических исследований позднеплейстоцен–голоценовых вулканических извержений в долине р. Жом-Болок (Восточный Саян).....	28
3 Микроэлементные характеристики плиоцен–плейстоценовых осадков озера Байкал по данным глубоководного бурения	40
4 Изучение компонентного состава и изотопного состава углерода метана смешанного типа и его гомологов из осадков Южной и Центральной котловин оз. Байкал	45
5 Временные изменения содержания полихлорированных бифенилов (ПХБ) и хлорорганических пестицидов (ХОП) в почвах Прибайкалья	48
Заключение.....	55
Список использованных источников.....	57
Приложение А. Список публикаций 2019 г. по теме исследований.....	63
Приложение Б. Конференции, на которых были представлены результаты исследований.....	64
Приложение В. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в соответствии с государственным заданием.....	66

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчёте о НИР используются следующие сокращения и обозначения.

- БЦБК – Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат
- БЭ – биогенные элементы
- в.д. – восточная долгота
- ВМО – Всемирная метеорологическая организация
- в т.ч. – в том числе
- г – грамм
- г. – год
- гг. – года
- ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод
- гор. – город
- ГХБ – гексахлорбензол
- ГХЦГ – гексахлорциклогексан
- ДДД – дихлордифенилдихлорэтан
- ДДТ – дихлордифенилтрихлорэтан
- ДДЭ – 1,1'-дихлор-2,2-бис(*n*-хлорфенил)этилен
- ед. – единица
- ЕОН – естественная остаточная намагниченность
- кал. – калиброванный
- км – километр
- тыс. - тысяч
- л.н. – лет назад
- м – метр
- МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии
- мг – миллиграмм
- МИС – морская изотопная стадия
- мкм – микрометр
- млн. – миллион
- мм – миллиметр
- напр. – например
- нг – нанограмм
- НИС – научно-исследовательское судно
- н.у.м. – над уровнем моря

ОДК – ориентировочно допустимые концентрации
о. – остров
об/мин – обороты в минуту
ОВ – органическое вещество
оз. – озеро
ООВ – общее органическое вещество
ООН – Организация Объединенных Наций
ППП – потери при прокаливании
ПХБ – полихлорированные бифенилы
р. – река
РЗЭ – редкоземельные элементы
РСМА – рентгеноспектральный электронно-зондовый микроанализ
РФА – рентгенофлуоресцентный метод анализа
см – сантиметр
см. – смотри
СПС – спорово-пыльцевые спектры
СОЗ – стойкий органический загрязнитель
с.ш. – северная широта
т.е. – то есть
тыс. – тысяча
ХОП – хлорорганические пестициды
ЮНЕП – Программа ООН по окружающей среде
ARM – безгистерезисная остаточная намагниченность
CIA – индекс химического изменения пород
CWI – интенсивность химического выветривания
GNIP – глобальная сеть изотопов осадков
MS – магнитная восприимчивость
NGRIP – North Greenland Ice Core Project
NOAA – Национальное управление океанических и атмосферных исследований
SNIP – Сибирская сеть изотопов осадков

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, направленные на изучение эволюции природной среды и климата, разработку палеоэкологических сценариев как основы для верификации прогнозных моделей глобальной атмосферной циркуляции, стали чрезвычайно актуальными в последние три десятилетия (напр., Рамочная конвенция ООН об изменении климата, текст 1994; Программа ООН по окружающей среде ЮНЕП и десятки других международных и отечественных программ). В этих документах признается, что изменение природной среды планеты может вызвать неблагоприятные последствия для вмещающих человека экосистем и должно стать предметом общей заботы.

Для создания надежной основы понимания сути происходящих глобальных изменений, прогнозных сценариев природной среды и климата требуются новые данные об эволюции природной среды регионов, полученные с использованием современных научных методов и подходов к изучению региональной экологии прошлого и настоящего. Для понимания тенденций в современной природной обстановке важно знать ее динамику в плейстоцене и голоцене, поскольку в это время сформировались современный рельеф, гидрографическая сеть, фауна и флора, шло формирование человеческого общества.

Целями исследований 2019 г. были: изучение изотопного состава атмосферных осадков Байкальского региона (на примере гор. Иркутска) и выявление основных источников влаги, обеспечивающих осадки в регионе; реконструкция палеогидрологических условий осадконакопления в озерных системах Тункинской рифтовой долины и Восточного Саяна; изучение геохимической эволюции водосборных бассейнов озер из этих районов; обобщение результатов первого этапа тифрохронологических исследований позднеплейстоцен-голоценовых вулканических извержений в долине р. Жом-Болок (Восточный Саян); обобщение данных по компонентному составу и изотопному составу углерода метана смешанного типа и его гомологов из осадков Южной и Центральной котловин оз. Байкал; исследование временных изменений содержания полихлорированных бифенилов и хлорорганических пестицидов в почвах Прибайкалья.

Все цели проекта выполнены полностью. Настоящий отчет является промежуточным по теме: «Эволюция экосистем Внутренней Азии в позднем кайнозое – экологический сценарий».

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Исследование изотопного состава атмосферных осадков Байкальского региона (на примере гор. Иркутска)

Атмосферные осадки являются одним из основных источников воды для наземных и водных экосистем. Детальное понимание циркуляционных процессов и механизмов, вызывающих атмосферные осадки, закономерностей их временного и пространственного распределения – необходимые составляющие для оценки и прогноза климатических изменений и водного режима на планете. В частности, вариации в изотопном составе кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD) атмосферных осадков, обусловленные изменением климатических параметров, таких как температура воздуха, влажность, количество осадков [1, 2], а также траекторией движения воздушной массы [3], обеспечивают надежную информацию об атмосферной циркуляции и изменениях климата. В последние годы анализ изотопного состава атмосферных осадков стал одним из наиболее широко применяемых методов в метеорологии, климатологии, гидрологии [2, 3] и в моделировании [4]. Кроме того, имеющиеся изотопные данные используются для расшифровки информации о климате прошлого, хранящихся в природных архивах, таких как морские и озерные отложения [5], снежники [6], ледники [7] и сталагмиты [8].

Данные, собранные за последние шесть десятилетий GNIP, организованной МАГАТЭ и ВМО, ежегодно пополняются результатами многочисленных местных исследований, с целью получения детальной картины пространственной и временной изменчивости изотопного состава осадков по всему миру. Тем не менее, изотопные данные по атмосферным осадкам России редки и часто неоднородны [9]. Метеорологические и изотопные данные с 13 станций по всей России (обобщенные в SNIP) продемонстрировали направленность переноса влаги с Атлантического океана (особенно зимой) и вклад вторичной влаги (летом) в континентальной части Евразии. В настоящее время, Байкальский регион в этой базе данных представлен неполным однолетним циклом наблюдений (январь-ноябрь) по гор. Иркутску [9].

Цель настоящей работы:

- 1) исследование изотопного состава атмосферных осадков Байкальского региона (на примере гор. Иркутска),
- 2) изучение сезонности изотопного сигнала,
- 3) выявление основных метеорологических параметров, определяющих изотопный сигнал,
- 4) исследование обратных траекторий движения воздушных масс и выявление основных источников влаги, обеспечивающих осадки в регионе.

Район исследования. Байкальский регион расположен в центре Евразийского континента, вдали от океанических влияний. Климатические условия гор. Иркутска ($52^{\circ}18'$ с.ш., $104^{\circ}17'$ в.д.; 469 м н.у.м.) типичны для всего региона и характеризуются высокой степенью континентальности со значительными сезонными колебаниями температуры воздуха от -50°C в январе до $+37^{\circ}\text{C}$ в июле и среднегодовой суммой осадков 480 мм (1881–2018 гг.). Регион расположен в зоне взаимодействия двух крупных систем атмосферной циркуляции воздуха – азиатского антициклона и северо-атлантического переноса. Осадки в течение года связаны в основном с циклонами западного/северо-западного происхождения, хотя в июле и августе, когда центр высокого давления расположен над Якутией, в регион проникают южные циклоны с территории Монголии.

Материалы и методы исследования. В общей сложности за период с июня 2011 г. по октябрь 2013 г., а также с декабря 2014 г. по апрель 2017 г. с использованием полиэтиленового контейнера и воронки в гор. Иркутске было собраны 284 пробы атмосферных осадков. В рассматриваемые периоды мониторинг осадков охватывает каждый месяц года не менее 3 раз. После отбора проб до последующего изотопного анализа все единичные образцы хранились в холодильнике в герметичных бутылках. Анализ выполнен в изотопной лаборатории Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (гор. Потсдам, Германия) на масс-спектрометре Finnigan MAT Delta-S. Погрешность определения значений δD и $\delta^{18}\text{O}$ (1σ) составила $\pm 0,8\%$ и $\pm 0,1\%$, соответственно. Результаты измерений представлены в отношении к международному стандарту VSMOW. Оценка синоптических условий в период выпадения осадков осуществлялась на основе данных метеонаблюдений NOAA. Обратные траектории движения воздушных масс, обуславливающих атмосферные осадки, рассчитывались с помощью модели HYSPLIT [10].

Результаты и обсуждение. Изотопный состав атмосферных осадков в г. Иркутске изменяется в широких пределах: от $-41,4$ до $-4,4\%$ для $\delta^{18}\text{O}$ и от $-322,4$ до $-39,6\%$ для δD . Результаты исследования отображены на диаграмме $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ (рисунок 1.1). Полученные изотопные данные демонстрируют четкие сезонные вариации. Образцы дождя ($n = 137$) характеризуются более высокими средними значениями $\delta^{18}\text{O} = -11,7\%$ и $\delta\text{D} = -92,6\%$ и низким избыточным дейтерием $d = +1,0\%$, тогда как в образцах снега ($n = 147$) средние значения $\delta^{18}\text{O}$, δD существенно ниже и составляют $-26,7\%$, $-205,3\%$ соответственно, $d = +9,0\%$. Точки, характеризующие изотопный состав дождей, расположены на диаграмме $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ правее ГЛМВ (рисунок 1.1), свидетельствуя о влиянии вторичных процессов фракционирования (например, вторичной влаги) на изотопный состав осадков. Испарение с поверхности открытых водоемов способствует уменьшению d в дождевой воде и обогащает

ее тяжелыми изотопами. Полученные результаты показывают, что дожди, получая водяной пар из вторичного источника влаги, обогащаются тяжелыми изотопами и характеризуются меньшим d , по сравнению со снегом. Образцы снега характеризуются точками, расположенными близко к ГЛМВ (рисунок 1.1), что указывает на происхождение осадков из первичного источника влаги. Снежные осадки характеризуются относительно высокими значениями d по сравнению с дождевыми из-за неравновесной конденсации во время роста снежинок. Высокие значения d связаны с интенсивным испарением с поверхности океанов в течение зимы [4].

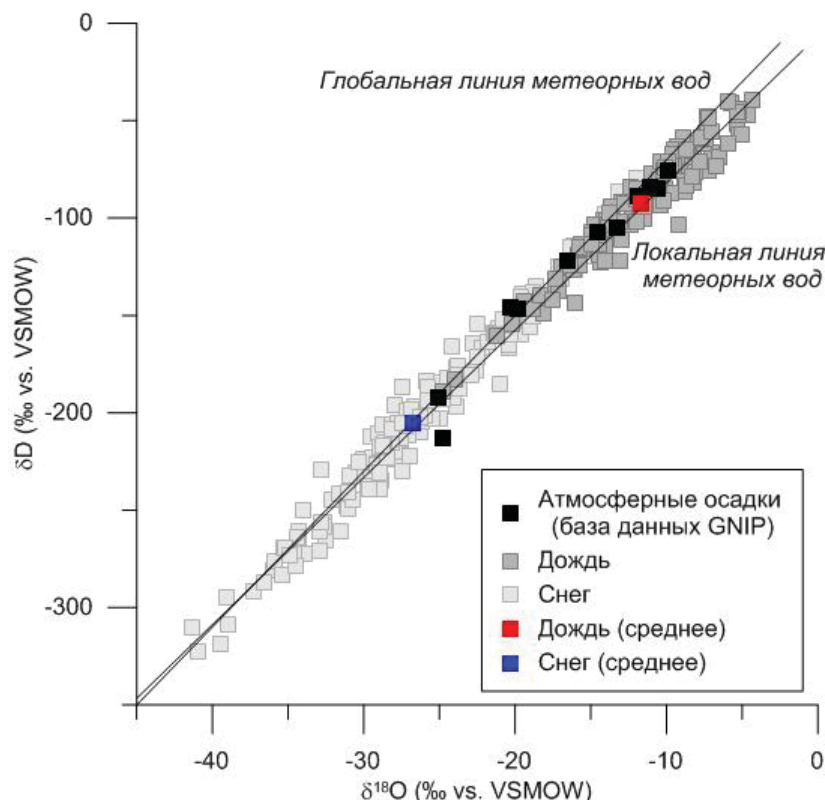


Рисунок 1.1 – Изотопный состав атмосферных осадков, выпадающих в Байкальском регионе (гор. Иркутск, 2011 – 2017 гг.)

В таблице 1.1 представлены рассчитанные средние значения средневзвешенных месячных осадков. Локальная линия метеорных вод, основанная на рассчитанных средневзвешенных месячных значениях, описывается уравнением $\delta D = 7,7 \delta^{18}O + 0,7$ ($n = 55$; $r^2 = 0,99$).

Изотопный состав атмосферных осадков определяется, в первую очередь, температурой [1, 2]. Линейная зависимость между средневзвешенными месячными значениями и среднемесячными температурами воздуха ($n = 55$) имеет следующий вид: $\delta^{18}O = 0,5 \cdot t_{\text{возд}} - 20$ ($r^2 = 0,85$) и $\delta D = 3,9 \cdot t_{\text{возд}} - 154$ ($r^2 = 0,85$). Рассчитанные коэффициенты и «свободные члены» уравнений несколько ниже, чем значения, полученные ВМО [1], отражая

Таблица 1.1 – Средние значения средневзвешенных месячных осадков

Месяц	n	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	d (‰)
Январь	5	-30,0	-232,1	+8,6
Февраль	5	-27,0	-214,8	+1,9
Март	4	-21,8	-168,6	+6,1
Апрель	4	-15,3	-113,3	+9,1
Май	3	-13,3	-104,0	+2,4
Июнь	5	-12,7	-102,7	-0,7
Июль	5	-11,0	-84,6	+2,7
Август	5	-12,1	-90,0	+6,0
Сентябрь	5	-14,9	-113,9	+5,5
Октябрь	5	-22,4	-166,9	+11,8
Ноябрь	4	-25,4	-192,6	+10,3
Декабрь	5	-28,8	-221,0	+9,1

континентальный эффект. Ранее для Иркутска Seal and Shanks [11] рассчитали $\delta^{18}\text{O}/t_{\text{возд}}$ коэффициент 0,36 ‰/°C. Полученный нами набор данных позволяет утверждать, что рассчитанный температурный коэффициент 0,50 ‰/°C является более надежным и репрезентативным, поскольку: (1) представляет собой типичный коэффициент для внутриконтинентальных станций [2] и удовлетворительно согласуется с коэффициентами для других близлежащих континентальных регионов (например, для Центральной Якутии) [12]; (2) он рассчитан на основании данных за целый год, в отличие от коэффициента 0,36 ‰/°C ($n = 14$), охватывающего только 11 месяцев; (3) температурные коэффициенты, рассчитанные для каждого отдельного года в период с 2011 г. по 2017 г., изменяются в интервале от 0,44 до 0,54 ‰/°C.

Количество атмосферных осадков (P) и относительная влажность воздуха (gH) не оказывают заметного влияния на величину изотопного сигнала осадков в гор. Иркутске, что убедительно подтверждается низкими коэффициентами корреляции (таблица 1.2).

Изменения в изотопном составе атмосферных осадков обусловлены не только локальными температурами конденсации [1], но также происхождением и траекторией поступления воздушной массы в регион [3]. Обратные 5-дневные (120 часов) траектории движения воздушных масс, обуславливающих выпадение атмосферных осадков в регионе, на каждую конкретную дату отбора образцов представлены на рисунке 1.2. Рисунок демонстрирует широкое распределение траекторий движения, охватывающих территорию от

Таблица 1.2 – Коэффициенты корреляции между изотопными ($\delta^{18}\text{O}$, δD и d) и метеорологическими ($r\text{H}$, P , $t_{\text{возд}}$) параметрами гор. Иркутска на основе средневзвешенных месячных значений

Параметр	P (мм)		rH (%)		$t_{\text{возд}}$	
	коэффициент	r^2	коэффициент	r^2	коэффициент	r^2
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	0,10	0,26	-0,27	0,16	0,50	0,85
δD (‰)	0,78	0,27	-2,07	0,15	3,91	0,85
d (‰)	-0,02	0,01	0,12	0,04	-0,13	0,08

Северного Ледовитого океана на севере/северо-западе до Северного Китая и Монголии на юге. Воздушные массы с востока поступают очень редко: всего 4 случая за период мониторинга. Подавляющее большинство воздушных масс имеет западное происхождение, что удовлетворительно соответствует общей циркуляции в Восточной Сибири и результатам региональных исследований [12-15]. Для идентификации источников атмосферной влаги все обратные траектории были объединены в четыре основных кластера (рисунок 1.2). Около 77% всех осадков, выпадающих в регионе, обусловлены воздушными массами, поступающими с запада (кластеры 1–3), включая Европу, западную часть России и северный Казахстан. 23% осадков поступают с севера Сибири (кластер 4). Среди четырех выявленных основных направлений движения атмосферной влаги, два имеют довольно длинные, а два относительно короткие траектории (рисунок 1.2). Осадки с длинными траекториями, транспортируемые с запада (кластер 1) и северо-запада (кластер 2), характеризуются очень близкими средними значениями $\delta^{18}\text{O}$ около -21‰ и δD около $-162,5\text{‰}$ (d около $+5,8\text{‰}$). Однако осадки, отнесенные к кластерам 1 и 2, имеют различные источники влаги (рисунок 1.2). Кластер 1 включает воздушные массы, которые могут происходить из Арало-Каспийского региона. Напротив, кластер 2 включает в себя многочисленные воздушные массы, образующиеся над Атлантическим океаном. Траектории воздушных масс, имеющих, скорее всего, локальный характер, значительно короче и объединены в кластеры 3 и 4 (рисунок 1.2). Атмосферные осадки из кластера 3 характеризуются самыми высокими средними значениями $\delta^{18}\text{O}$ и δD $-15,4\text{‰}$ и $-118,5\text{‰}$, соответственно, ($d = +5,1\text{‰}$) и приходят в Иркутск с запада/юго-запада. Эти, так называемые «южные» циклоны, формируются на полярном фронте южнее 50° с.ш. над Монголией, когда холодный арктический воздух встречается с теплым и влажным воздухом из субтропиков [13]. Однако субтропические воздушные массы, формирующиеся над Индийским и/или Тихим океаном, достигая центральную часть континента, значительно трансформируются и теряют влагу [14]. Кластер 4 включает поступающие с севера воздушные массы с относительно легким изотопным

составом ($\delta^{18}\text{O} = -19,5\text{‰}$; $\delta\text{D} = -152,5\text{‰}$; $d = +3,4\text{‰}$), сформировавшиеся над акваториями Карского моря и моря Лаптевых.

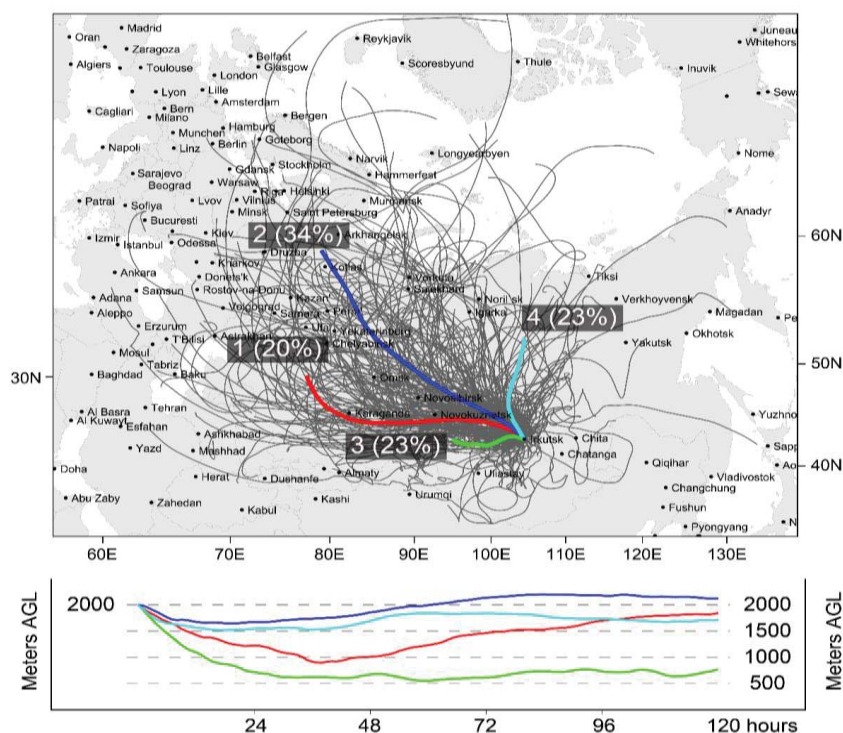


Рисунок 1.2 – Обратные траектории движения воздушных масс на изобарической поверхности 850 гПа для всех отобранных образцов атмосферных осадков ($n = 284$) за период с июня 2011 г. по апрель 2017 г. Четыре основных кластера обратных траекторий для осадков, достигающих гор. Иркутск, включая их вертикальный профиль

Выводы. 1. Выполнены исследования изотопного состава атмосферных осадков Байкальского региона, отобранных в гор. Иркутске в период с июня 2011 г. по октябрь 2013 г. и с декабря 2014 г. по апрель 2017 г.

2. Впервые на основе полученных данных выявлены четкие сезонные колебания значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD , вызванные преимущественно изменением температуры воздуха. Рассчитаны температурные коэффициенты для средневзвешенных значений изотопного состава атмосферных осадков. Определены основные траектории воздушных масс, приносящих осадки в регион в течение года.

3. Установлено, что изотопный состав атмосферных осадков в Байкальском регионе носит ярко выраженный сезонный характер и на $\sim 85\%$ определяется температурой воздуха. Температурный коэффициент для $\delta^{18}\text{O} = 0,5\text{‰}/^\circ\text{C}$; для $\delta\text{D} = 3,9\text{‰}/^\circ\text{C}$.

4. Впервые проведенный анализ траекторий и изотопных данных показал, что атмосферные осадки с самыми низкими средними значениями $\delta^{18}\text{O}$ и δD ($-34,1\text{‰}$ и $-269,1\text{‰}$; $d = +5,3\text{‰}$) поступают в Иркутск зимой с севера, с акватории Северного Ледовитого океана. Тогда как атмосферные осадки, имеющие самый тяжелый изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -6,9\text{‰}$;

$\delta D = -59,2\text{‰}$; $d = -4,1\text{‰}$), поступают летом с запада/юго-запада и имеют происхождение из вторичного источника влаги, расположенного на континенте.

2 Комплексные исследования озерных геосистем южного Предбайкалья

2.1 Гранулометрические и петромагнитные исследования высокогорных озёр Восточного Саяна (на примере оз. Хикушка)

В настоящее время имеется явно недостаточное количество адекватно датированных, высокоразрешающих, комплексных записей из Восточно-Саянской горной системы. Для частичного заполнения этого пробела мы провели исследования оз. Хикушка (рисунок 2.1.1).

Оз. Хикушка расположено на высоте 1956 м н.у.м., и является каровым проточным водоёмом, расположенным в верховьях ледниковой долины Хи-Гол, в которой происходило самое крупное по объёму изверженного материала вулканическое извержение в голоцене. Площадь водной поверхности озера составляет 0,3 км², глубина достигает 42 м. Чашу озера отделяет от пади Хи-Гол узкий ригель, к внешней стенке которого вплотную приблизился фронт лавового потока. Котловина оз. Хикушка имеет крутые, изрезанные кулуарами скалистые склоны, основания которых покрыты коллювиальными шлейфами и курумами, спускающимися в озеро. Грубообломочные породы на дне водоема быстро замещаются глинистыми отложениями. Современная растительность склонов вокруг оз. Хикушка представлена островками травянистой злаково-разнотравной тундры и пятнами кустарниковой тундры с господством березки кустарниковой и, в меньшей мере, ивы.

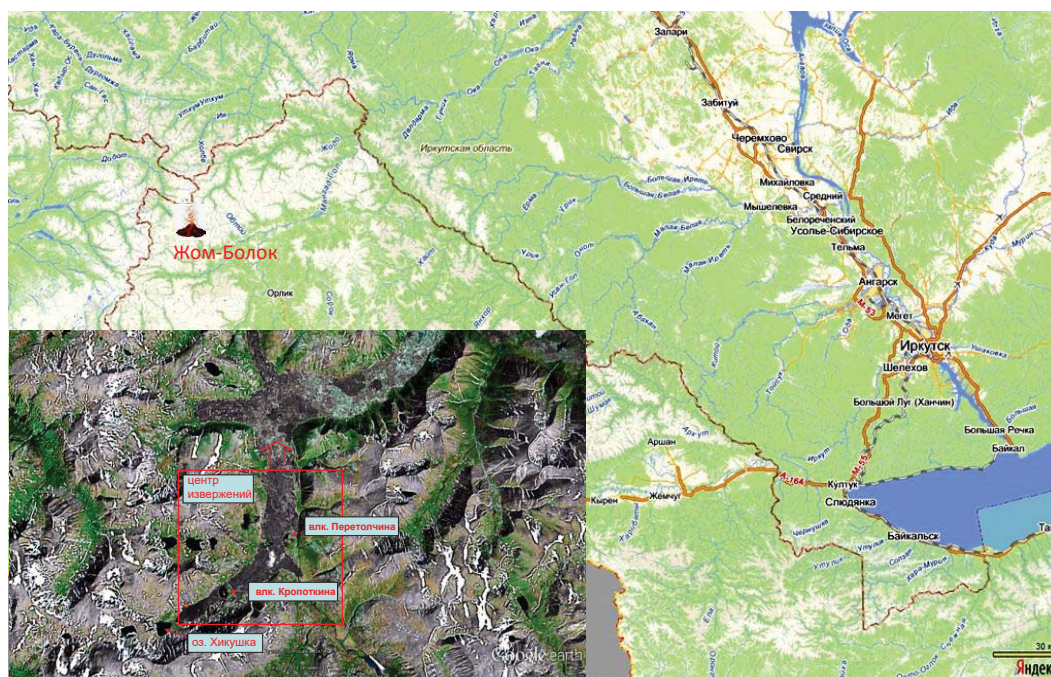


Рис. 2.1.1 – Местоположение оз. Хикушка в пределах Жомболокского вулканического района

Целью настоящей работы было выяснение отклика петромагнитных и гранулометрических записей из донных отложений высокогорных озёр на глобальные и локальные изменения природной среды.

Батиметрическая съёмка для оз. Хикушка трехмерным 6-лучевым эхолотом Humminbird Matrix 748x3D показала, что максимальная глубина озера составляет 43 м. Однако крутые склоны озера с западной стороны, приближённой к точке с максимальной глубиной, делали её непригодной для отбора керна. Потому отбор осуществлялся с глубины 30 м на выполаживающемся участке дна.

Ориентированные образцы для петромагнитных исследований в каждом из кернов отбирались с шагом 3 см. Измерения остаточной намагниченности осуществлялось на спинмагнитометре JR-6 (Agico, Чехия). Размагничивание образцов осуществлялось в катушке переменного магнитного поля, помещённой в магнитный вакуум. Намагничивание образцов для измерения ARM производилось в той же катушке, расположенной в естественном магнитном поле Земли. Магнитная восприимчивость измерялась на капнометре KLY-2.

В керне отбирались навески массой ~0,5 г сухого вещества с шагом 5 см. Таким образом, из керна оз. Хикушка было отобрано 29 образцов. ООВ выжигалось раствором 10% пероксида водорода (H_2O_2) в пробирках, помещённых в шейкер [16–18]. После этого пробирки помещались в центрифугу 3000 об/мин на 15 минут, пероксид водорода удалялся, вместо него доливалась дистиллированная вода, и процесс повторялся. Затем образцы высушивали при температуре 105 °С. Таким образом, было рассчитано содержание ОВ в каждом образце без учета древесных остатков и створок диатомовых, которые не растворяются в H_2O_2 .

Результаты показали, что в литологическом разрезе донных отложений оз. Хикушка представлены две основные единицы: биогенные илы с содержанием диатомовых и ледниковые глины (рисунок 2.1.2).

Верхняя часть разреза (0–50 см) представлена водонасыщенными биогенно-терригенными илами коричневого цвета. В интервале глубин 50–81 см цвет осадка приобретает зеленоватый оттенок, осадок становится еще влажнее. Нижняя часть разреза (81–124 см) представлена глинистым алевролитом светло-оливкового цвета.

Изучение физических свойств осадка показало, что влажность верхней части осадочного разреза (0–84 см) изменяется в узком диапазоне 50–65%. Ниже и до основания разреза наблюдается нисходящий тренд, на глубинах свыше 120 см значения влажности становятся менее 40%.

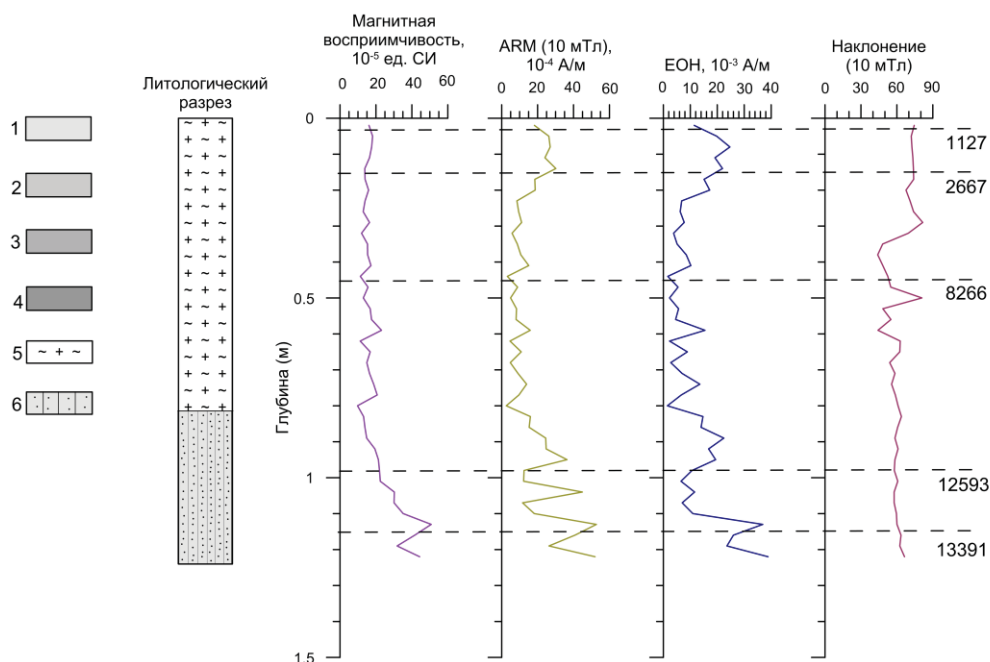
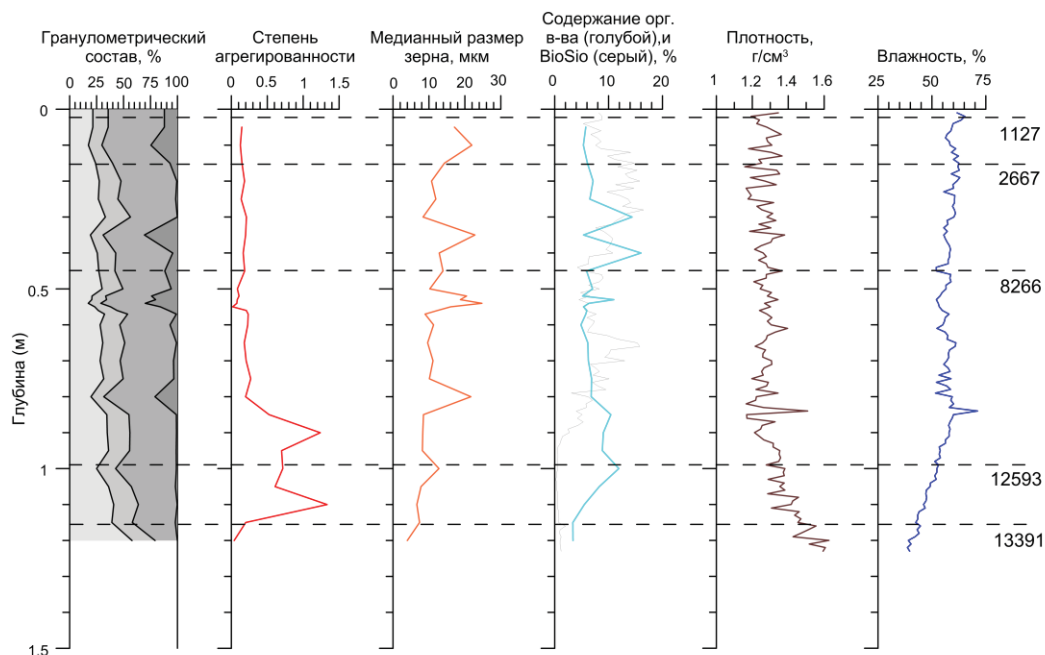


Рисунок 2.1.2 – Литологический разрез и распределение физических, петромагнитных и гранулометрических параметров донных отложений оз. Хикушка. Пунктирными линиями показаны калиброванные значения возраста. 1–4 – гранулометрические фракции: 1. Мелкая пелитовая (<5 мкм). 2. Крупная пелитовая (5–10 мкм). 3. Мелкоалевритовая (10–50 мкм). 4. Крупноалевритовая с мелкозернистым песком (>50 мкм). 5. Биогенный ил с диатомовыми. 6. Алевритистая глина

Плотность сухого вещества в интервале 0–90 см колеблется от 1,15 до 1,4 г/см³, ниже по разрезу ее значения снижаются, и в основании керна плотность возрастает до 1,6 г/см³. Начало однозначно выраженных трендов влажности и плотности соответствует литологической границе в осадочном разрезе. Содержание органического вещества в осадках

оз. Хикушка незначительно и меняется от 5 до 15%, снижаясь до 3% в основании разреза. Результаты гранулометрического анализа показали, что медианный размер зёрен меняется по разрезу от 8 до 25 мкм, снижаясь до 4 мкм в основании керна. Степень агрегированности материала невысока в верхних 80 см осадка ($\sim 0,1-0,3$), затем на интервале 85–110 см резко возрастает до значений 0,5–1,3. В нижних 10 см разреза она вновь снижается до величины $\sim 0,1$.

Резкий рост величины агрегированности глубже 80 см соответствует литологической границе. Из графика гранулометрического состава фракций видно, что частицы крупноалевритовой размерности (>50 мкм) присутствуют в верхних 80 см осадка (5–30%) и отсутствуют ниже по разрезу. Содержание мелкопелитовой фракции (<5 мкм) изменяется от 15 до 30%, возрастая в нижних 10 см керна до 40–60% за счёт снижения процентного содержания мелкоалевритовой фракции (10–50 мкм) с 45–50% до 20–40%. Доля фракции крупнопелитовой размерности (5–10 мкм) изменяется в разрезе от 10 до 20%.

Магнитная восприимчивость в верхних 81 см керна колеблется в диапазоне $10-20 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Ниже наблюдается устойчивый восходящий тренд, значения к вырастают до $40-50 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Значения ARM в интервале 0–20 см изменяются от 20 до $30 \cdot 10^{-4}$ А/м; на интервале 20–80 см – от 3 до $15 \cdot 10^{-4}$ А/м; с глубины 81 см – повышаются до $50 \cdot 10^{-4}$ А/м. Восходящий тренд вышеприведённых петромагнитных характеристик на интервале 81–124 см может быть соотнесён с литологической границей между биогенными илами и алевритистой глиной. Сложнее объяснить повышенные значения ARM в верхних 20 см. Они свидетельствуют о более мелком размере магнитных зёрен, нежели в интервале 20–81 см, но в целом, согласно гранулометрическим данным размерность зёрен в верхнем интервале даже несколько крупнее, чем ниже по разрезу.

Модуль ЕОН по разрезу меняется синхронно с ARM, отражая, соответственно изменения свойств осадка, а не глобальные колебания магнитного поля Земли. При этом минимальные значения модуля в интервале 20–81 см падают до $2 \cdot 10^{-3}$ А/м, максимально повышаясь до $40 \cdot 10^{-3}$ А/м в основании разреза.

В целом, осадочный разрез оз. Хикушка по сумме изученных параметров можно разделить на две части: верхнюю и нижнюю, граница между которыми проходит на глубине 81 см. Согласно возрастной модели, возраст этой границы составляет 11223 ± 742 лет, т.е. она соответствует началу голоцена.

Несколько проблематичными остаются два вопроса. Первый – это повышенные значения ARM в верхних 20 см разреза, которые обуславливают и повышенные значения ЕОН. Повышение ARM могут характеризовать поступление в осадки мелких магнитных зёрен из-за усиления склоновой эрозии. При этом величины MS остаются низкими, что

может быть связано с незавершенным процессом растворения магнитных зерен. Верхняя граница растворения зерен магнетита в озерных осадках редко превышает 20 см, поэтому выше нее большинство мелких магнитных зерен сохраняется [19].

Вторым вопросом является резкое снижение степени агрегированности в нижних 10 сантиметрах разреза. Согласно гранулометрическому анализу, в этом интервале наблюдается максимальное содержание пелитовых фракций, что должно увеличивать величину агрегированности. Однако для нижних 10 см характерны относительно высокие значения ОВ, в среднем 4%, тогда как среднее значение для всего разреза составляет 7.27%. При этом, известно, что ОВ разного состава может существенно влиять на физико-химические и механические свойства осадка. Обладая высокой гидрофильностью, сильной сжимаемостью и низкой водопроницаемостью, ОВ влияют на пластичность, консистенцию и агрегированность осадков [20]. Возможно, что низкая степень агрегированности в нижней части разреза оз. Хикушка также может быть обусловлена составом ОВ. В настоящее время у нас нет данных о составе ОВ, что затрудняет понимание причин низкой агрегированности отложений при высоком обилии частиц пелитовой фракции.

Результаты комплексного изучения донных отложений озера позволяют реконструировать несколько этапов изменения природной среды его бассейна за последние 14630 лет. Отложения оз. Хикушка в целом мелкозернистые. Доминирование по разрезу глинистой и иловой фракций индицирует общую слабую гидродинамику на протяжении всего процесса седиментации.

В интервал времени ~ 14630–12800 л.н. формировался нижний слой ледниковых глин в интервале 123–102 см со средней скоростью 20 см/тыс.лет. Преобладание мелких фракций в осадке показывает общую слабую гидродинамику процесса осаждения и низкую энергию водного потока в точке бурения, возможно из-за длительного ледового покрова на поверхности озера. Высокие значения плотности, ARM и MS свидетельствуют о преобладании терригенного вещества с обилием тонких магнитных минералов. Небольшое повышение ООВ и очень низкое содержание $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ предполагают аллохтонный источник ООВ.

Позднее, ~12800–11900 л.н. формировался верхний, более темный слой глин в интервале 102–89 см с пониженной средней скоростью 12 см/тыс. лет. Снизившееся содержание пелитовой фракции, MS, ARM может индицировать усиление гидродинамических условий в точке бурения [21, 22].

В интервал времени ~11900-8300 л.н. сформировался нижний слой глин и верхний – биогенных илов. Возросшие значения $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ означают повышение продуктивности озерной экосистемы. Снижение содержания мелкой фракции осадка и повышение

крупноалевритовой с мелкозернистым песком может соответствовать более высокой энергии транспортировки отложений в озеро. Отдельные пики крупной фракции ~11200 и 9000 л.н. (рисунок 2.1.2) могут быть сигналом повышенной увлажненности, эрозии склонов, энергии водного потока, несшего крупные магнитные частицы к точке бурения.

Важно отметить, что граница между двумя основными литологическими единицами в керне проходит на глубине 81 см, соответствуя 11230 л.н. (рисунок 2.1.2), почти на 500 лет запаздывая по отношению к нижней границе голоцена [23]. Граница в 11230 л.н. в отложениях оз. Хикушка видна в изменении значений MS, ARM, ЕОН, степени агрегированности, влажности, плотности осадка, т.е., литологически обусловленных параметров. При этом, биологические записи ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$, ООВ) не показали значимых вариаций на границе смены режимов осадконакопления, демонстрируя асинхронный ответ наземных и аквальных систем на воздействие внешних факторов.

Для более позднего этапа развития природной среды в котловине оз. Хикушка, 8300–5000 кал. л.н., характерно новое повышение продуктивности озерной системы, что отражено в возрастании $\text{SiO}_{2\text{bio}}$.

В гранулометрическом составе донных отложений оз. Хикушка отмечено небольшое снижение глинистой фракции, возможно, означая снижение уровня воды в озере. Пик крупной фракции с песком ~6500 л.н. (рисунок 2.1.2) мог сформироваться во время кратковременного события активной эрозии склонов.

Позднее, в последние ~5000 лет, продолжающееся постепенное повышение значений медианного размера зерен и снижение мелкопелитовой фракции может индцировать усиление склоновой эрозии в бассейне оз. Хикушка, повышенные гидродинамические условия и продолжающееся снижение уровня озера.

Повышение ARM, особенно позднее 3500 л.н. (выше 20 см в керне), может характеризовать поступление в осадки мелких магнитных зерен из-за усиления склоновой эрозии. При этом величины MS остаются низкими, что может быть связано с незавершенным процессом растворения магнитных зерен. [19].

Выводы. Впервые проведено бурение и последующее комплексное исследование донных отложений озер Восточно-Саянской горной провинции на юге Восточной Сибири.

В результате этих исследований получены первые записи физических, петромагнитных, гранулометрических свойств отложений озера Хикушка, продуктивности озерной системы.

Полученные записи стали основой первых реконструкций гидродинамического режима озера Хикушка и его бассейна при переходе от последнего ледникового периода к голоцену

и в самом голоцене, что позволило выявить реакцию озерных геосистем юга Восточно-Саянской горной провинции на изменения природной среды в это время.

Установлено, что геосистема оз. Хикушка после таяния локального ледника развивалась постепенно, следуя общему региональному/глобальному тренду эволюции природной среды.

2.2 Первая реконструкция геохимической эволюции геосистемы озера Хикушка

Рентгенофлуоресцентный метод анализа в последние десятилетия получил распространение при определении элементного состава озерных и морских отложений, информация о котором позволяет исследовать изменения природной среды и климата прошлого. Ненарушенные озерные отложения являются природными архивами и используются для реконструкции природных условий за длительное время. Детальные высокоразрешающие региональные записи природной среды и климата прошлого являются частью данных, на которых основываются модели будущего глобального изменения климата. Интерес представляют вариации содержаний основных породообразующих элементов в отложениях, для определения которых используются методы атомной эмиссии с индуктивно-связанной плазмой, атомной абсорбции, классический химический силикатный анализ и некоторые другие. Метод РФА обладает очевидным преимуществом в производительности по сравнению с упомянутыми методами. Для рентгенофлуоресцентного определения основных породообразующих элементов обычно используются сравнительно большие навески пробы 500 мг и более. Последнее обстоятельство затрудняет применение метода при исследованиях кернов озерных и торфяных отложений. Уменьшение величины шага опробования керна позволяет повысить временное разрешение климатических записей до нескольких десятилетий. Поэтому представляется актуальным разработка методик рентгенофлуоресцентного определения петрогенных элементов из навесок менее 500 мг.

Величины потерь при прокаливании, отражающие относительное содержание в образцах отложений в основном таких компонентов как H_2O , CO_2 , S, галогенов и органических соединений, определяли гравиметрическим методом.

Определение элементного состава образцов кернов озерных отложений методом РФА проводили с использованием оборудования Центров коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН и "Геодинамика и геохронология" ИЗК СО РАН. Измерения выполнены на волноводисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker AXS, Германия).

Возрастная модель для отложений озера построена с использованием пяти AMS¹⁴C датировок (таблица 2.2.1) методом интерполяции средних значений возраста между

датированными горизонтами. Далее в тексте используются только калиброванные значения возраста.

Таблица 2.2.1 – Результаты радиоуглеродного датирования ($AMS^{14}C$) донных отложений оз. Хикушка

Озеро	Глубина в керне, см	^{14}C возраст, лет назад, лаб. индекс	Калиброванные значения возраста, лет назад
Хикушка	2	1200±30 Poz-106376	1127±48
Хикушка	15	2555±30 Poz-106377	2667±81
Хикушка	44	7440±40 Poz-106388	8266±49
Хикушка	98	10610±50 Poz-106552	12593±61
Хикушка	114	11560±60 Poz-106553	13391±60

Результаты изучения отложений оз. Хикушка. Изменение элементного состава и значений индекса химического изменения пород (CIA) в отложениях озера показаны на рисунке 2.2.1.

Ряд исследований показал, что такие элементы, как Ca, Mg, K, Na могут рассматриваться более растворимыми и подвижными, производными от химического выветривания и обильных осадков, в то время, как Al и Si считаются более нерастворимыми и устойчивыми [24, 25].

Поэтому мы нормировали элементы к Al, который является наиболее нерастворимым (как в кислородных, так и в бескислородных условиях) и распространенным элементом [26] для оценки относительного химического растворения, гидролиза и миграции относительно Al. Мы используем отношение $(Ca+Mg+K+Na)/Al$ для отражения интенсивности химического выветривания в водосборном бассейне. Более высокие значения CWI указывают на относительное преобладание растворимых и попадание подвижных элементов в озеро в результате более активного химического выветривания и наоборот. Результаты приведены на рисунке 2.2.2.

Для понимания возможных причин геохимической эволюции бассейна оз. Хикушка мы сравнили некоторые, наиболее показательные геохимические записи из донных отложений озера с ключевыми записями изменения природной среды северного полушария (рисунок 2.2.3.). Изменения геохимических показателей из отложений озера позволили выделить пять этапов в истории его бассейна. Более того, нормирование может также исправить проблему

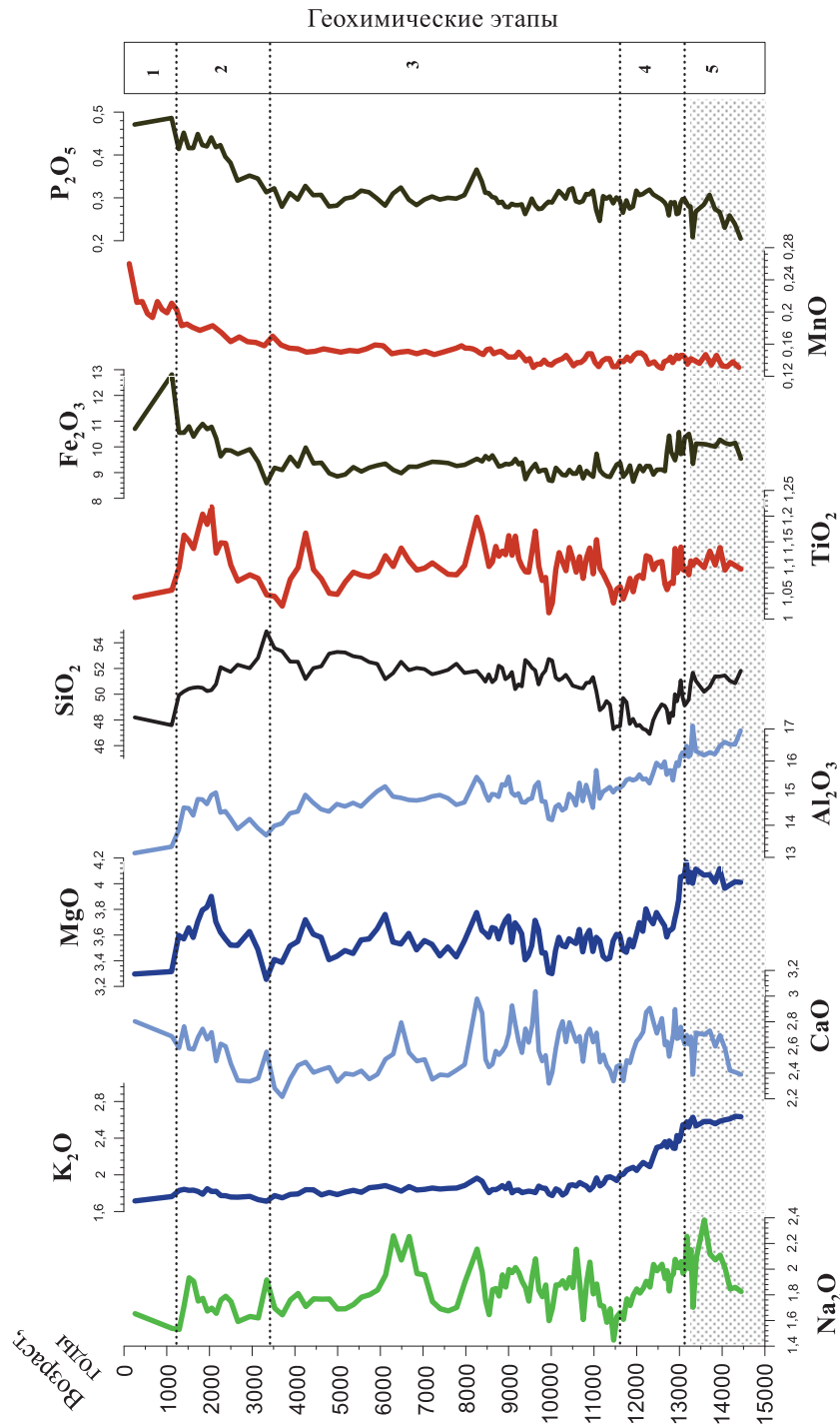


Рисунок 2.2.1 – Распределение содержаний основных породообразующих элементов и вариации CIA в разрезе донных отложений оз. Хикушка по результатам РФА

эффекта переменного разбавления в элементных записях из-за поступления общего органического углерода.

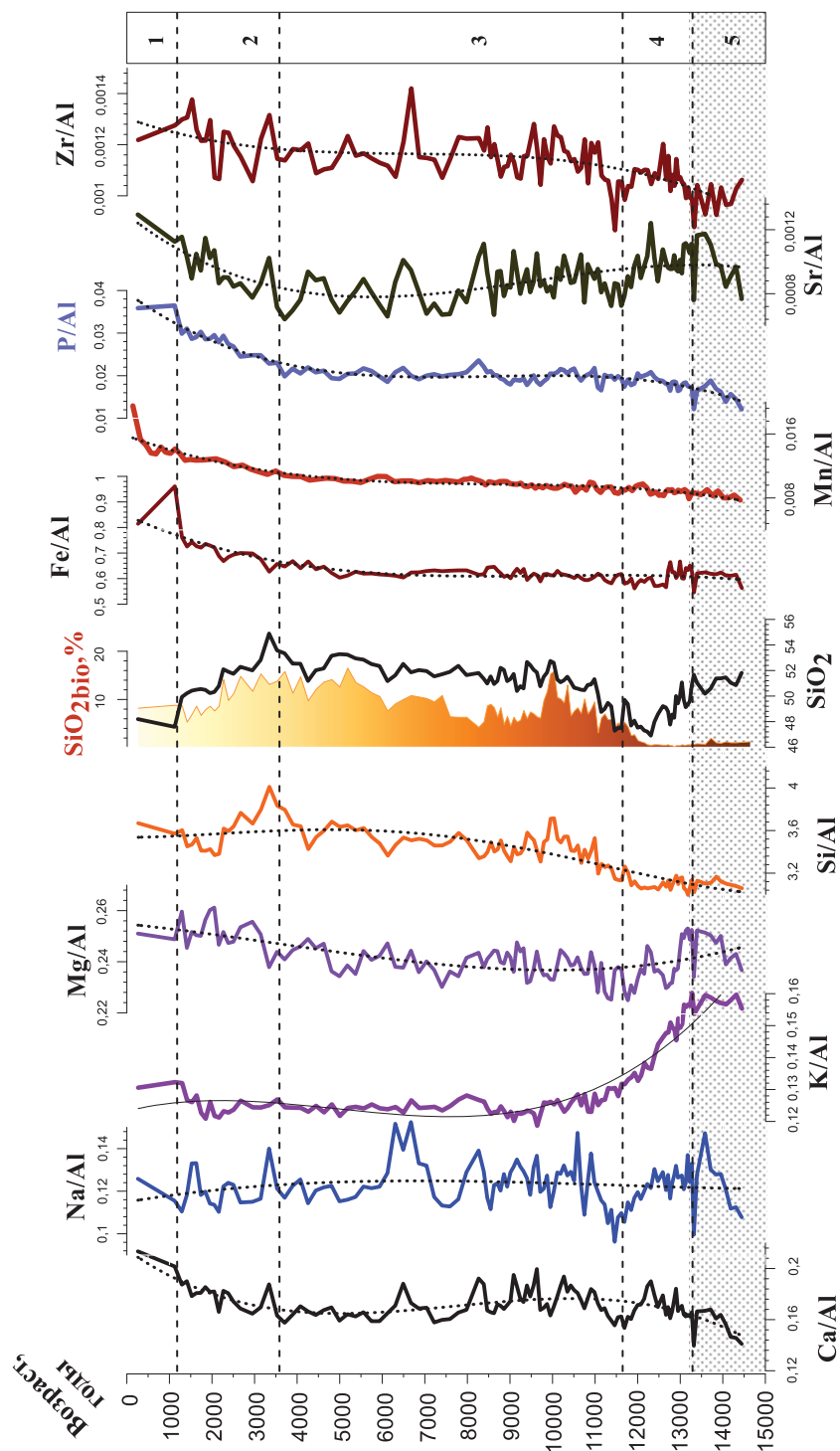


Рисунок 2.2.2 – Обобщающий график изменчивости отношений элементов в разрезе донных отложений оз. Хикушка

Результаты показали, что ранее ~13200 л.н. (этап 5) содержания K_2O , Na_2O , MgO , Al_2O_3 максимальны для всего разреза. Повышенные значения присущи для SiO_2 и Fe_2O_3 . Для элементных соотношений (рисунок 2.2.2) характерны повышенные значения K/Al , Mg/Al , Na/Al . Значения Ca/Al , Sr/Al , CWI резко повышаются в этой зоне. Значения CIW снижаются в зоне 5, а значения Ca/Ti , Ti модуля, наоборот, повышаются (рисунок 2.2.3).

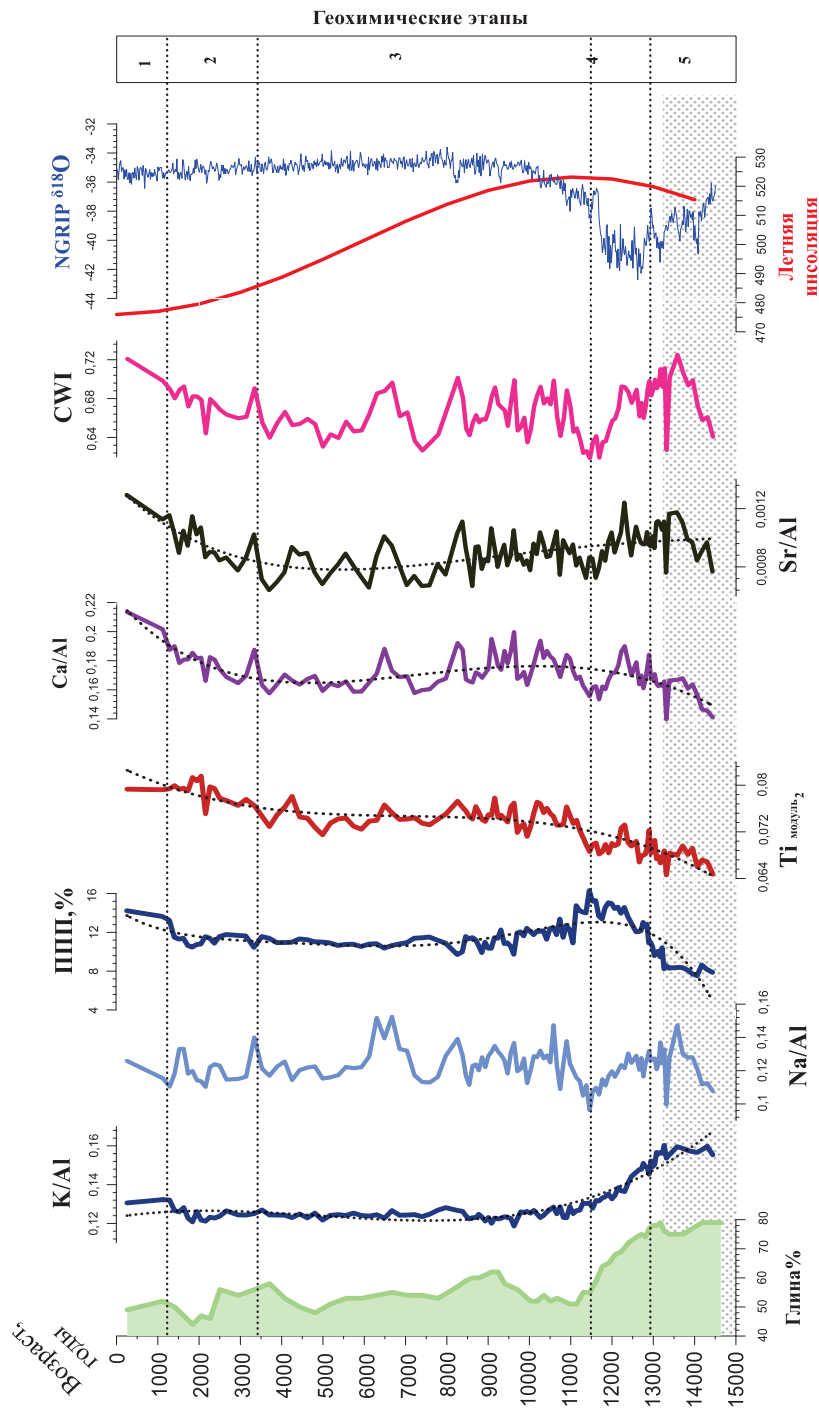


Рисунок 2.2.3 – Сравнение избранных геохимических записей в разрезе донных отложений оз. Хикушка с изменением $\delta^{18}\text{O}$ из кернов Гренландского ледника как показателем температуры воздуха северного полушария [27] и поступлением летней инсоляции на широты юга Сибири за соответствующий временной интервал [28]

Zr и Ti не участвуют в биотических процессах и входят в состав, главным образом, устойчивых к выветриванию силикатных минералов, таких как циркон и рутил. Изменения в содержании этих элементов должны быть результатом временной изменчивости в притоке силикатных минералов в озерную котловину. Поступление же силикатов может быть

обусловлено избирательными процессами транспортировки-осаждения, влияющими на размерность и свойства осажженных минералов, или может быть обусловлено также меняющимся балансом между источником минералов в озерном бассейне. Цирконом обычно обогащены средне- и крупнозернистые илы, а титан входит в мелкую фракцию [29]. Поведение кривой содержания глинистой фракции в отложениях оз. Хикушка соответствует поведению шкалы значений Zr-Ti, в целом хорошо подтверждая смену литологического и гранулометрического строения отложений.

Ca и Sr в озерных отложениях соотносятся с силикатным и карбонатным выветриванием в их бассейнах, поступлением органического материала и автохтонным выпадением CaCO₃. Нормирование к Al убрало эффект влияния поступления силикатных минералов в озеро. В нашем случае кривые Ca/Al и Sr/Al показывают сходное поведение (коэффициент корреляции $r^2=0,96$) и следуют изменениям содержания глинистой фракции. Поэтому, вероятно, их содержание контролируется, главным образом, изменениями размерностей минеральных фракций в отложениях. Отсутствие значимой корреляции между SiO_{2bio} и Si/Al в интервале 14600-13000 л.н. может свидетельствовать о решающем вкладе минерального сноса в поступление кремния в отложения озера.

CWI индекс в этап 5 возрастает параллельно повышению поступления летнего тепла, что предполагает усиление интенсивности химического выветривания в бассейне оз. Хикушка в ответ на потепление климата (рисунок 2.2.3.). Высокий коэффициент корреляции между Sr/Al и CWI ($r^2=0.99$) поддерживает вывод об усилении интенсивности химического выветривания к 13300 л.н., поскольку Sr является мобильным элементом и, соответственно, проще удаляется из материнской породы водосбора в процессе выветривания [30].

Поскольку время формирования отложений этапа 5 соответствует кратковременному глобальному потеплению (рисунок 2.3.3., NGRIP $\delta^{18}O$), то улучшение климата этого интервала в бассейне оз. Хикушка следует рассматривать как ответ локальной озерной геосистемы на быстрые изменения климата Атлантики в позднеледниковое время.

В отложениях, сформированных в этап 4 (ок. 13200-11500 л.н.), снизилось содержание Na, K, Mg (рисунок 2.2.1). Соответственно, понизились значения отношений этих элементов к Al и значения CWI индекса. Количество Ca повысились, также отмечено небольшое увеличение содержания Mn, Fe и их соотношений с Al (рисунок 2.2.2). Снижение значений CWI означает затухание интенсивности химического выветривания и смену климатических условий на более холодные и/или менее влажные. Снижению содержания в осадках оз. Хикушка в это время тонкой глинистой фракции соответствуют пониженные значения Zr/Ti индекса. Это подтверждено и прямыми гранулометрическими измерениями (рисунок 2.1.2). Возможно, что локальный ледник в это время почти полностью растаял или отступил от оз.

Хикуша на столь большое расстояние, что его воды перестали быть главным источником поступления силикатных минералов (сильное снижение K_2O и K/Al). Повышенные значения Mn и Fe и их отношений к Al могут индцировать изменение условий редокс-условий в озере. Тот факт, что шкала Mn/Al изменяется параллельно шкале Fe/Al , может свидетельствовать о преимущественно аэробных процессах [31] в период аккумуляции отложений этапа 4. Соотношения Ca/Al и Sr/Al и на этом этапе осадконакопления имеют аналогичное поведение, предполагая зависимость их поведения от размерности минерального зерна. Размерность же зерна на протяжении 4 этапа постепенно увеличивается, означая усиление гидродинамики воды в точке бурения из-за снижения глубины в этом месте (снижение уровня озера), из-за усиления эолового привноса или активизации склоновых процессов, обеспечивающих повышенное поступление кластического материала при обильном стоке дождевых и/или талых вод.

В рассматриваемом случае, на протяжении 4-го этапа, скорее всего, взаимодействовали все перечисленные факторы осадкообразования. Согласно климатостратиграфической шкале северного полушария (NGRIP $\delta^{18}O$, рисунок 2.2.3) этап 4 (~13200–11500 л.н.) соответствует завершению короткого интерстадиального потепления ~13000 л.н. и началу довольно продолжительного, длительностью чуть более в 1000 лет, периода возврата к более холодным условиям стадиала (NGRIP $\delta^{18}O$, рисунок 2.2.3). Возможно, это похолодание привело в бассейне оз. Хикушка к усилению эоловой деятельности летом, повышенному выпадению зимних осадков и активному таянию снега весной-начале лета. Причем, талая вода поставляла в озеро с водосбора довольно много органического вещества в форме почвенной суспензии, растительных остатков, что и привело к повышению общего органического вещества в это время (рисунок 2.2.3).

В третий этап геохимической эволюции геосистемы оз. Хикушка (~11500–3500 л.н.) решающее значение в накопление Si могли вносить диатомовые водоросли. С началом этого этапа в осадках озера началось накопление SiO_{2bio} , и створки диатомовых стали составлять 12-23% от общего состава вещества при просмотре смер-слайдов. Озеро стало относительно высокопродуктивной системой. Самые низкие за все время аккумуляции отложений в озере значения K/Al индцируют почти полное прекращение речного стока в озеро, поставлявшего кластический материал. Об этом характерно постоянное снижение содержаний K , Mg , Al и изменчивое поведение Na , Ca , Ti (рисунок 2.2.1). Значения CWI ~11500–3500 л.н. остаются в целом высокими, означая активные процессы выветривания в котловине озера, однако их снижение ~8000–7000 л.н. и ~6000–4000 л.н. предполагает наличие коротковременных периодов снижения интенсивности химического выветривания из-за похолодания и/или аридизации климата.

Геохимическая эволюция бассейна и котловины оз. Хикушка ~11500–3500 л.н. согласуются с преобладающей региональной картиной раннего – среднего голоцена, свидетельствуя о повышенном уровне атмосферных осадков и летних температур в раннем голоцене и понижении атмосферных осадков – во второй половине раннего-начале позднего голоцена [32].

Повышение значений CWI в этап 2, ~3500–1200 л.н. (рисунок 2.2.3) стало результатом постепенного повышения общей увлажненности и /или потепления в районе исследования. Такие изменения климата могли привести к более активному поступлению в воды озера карбонатов, в том числе, относительно высоко мобильного Sr. Высокие содержания биогенного кремния предполагают развитие высокопродуктивной озерной системы, в воды которой поступал достаточный объем питательных веществ для развития диатомовой флоры. Однако постепенное и значительное снижение значений SiO_{2bio} свидетельствует о сильном снижении продуктивности озерной системы от 3500 к 1200 л.н. Возможно, что снижение продуктивности могло стать следствием более обильного, чем ранее, поступления в озеро минерального вещества, разбавлявшего концентрации SiO_{2bio} . Последнее предположение может быть поддержано реконструированным повышенным притоком в озеро относительно легко растворимых и мобильных элементов (Sr, Ca, Mg) наряду с наименее мобильным Ti. Снижение в это же время глинистой фракции и повышение мелкоалевритовой и, особенно, крупноалевритовой фракций с мелкозернистым песком (рисунок 2.1.2) также указывает на усиление склоновой эрозии в бассейне оз. Хикушка, повышенную гидродинамику водной толщи озера. Эти явления связаны с повышенным уровнем зимних осадков, таяние которых в теплый сезон обуславливало активную склоновую эрозию и снос вещества в озеро.

Повышенное содержание P и Ti/Al модуля в отложениях этапа 2 (рисунок 2.2.2) могло быть следствием эолового переноса с атмосферной пылью в теплые сезоны. Такие явления часты для котловин высокогорных озер с тонким почвенным слоем с низким содержанием в них питательных веществ [33].

Повышение значений почти всех элементных отношений в двух верхних образцах керна оз. Хикушка следует интерпретировать с осторожностью из-за неопределенности возрастной модели для этапа 1 и недостаточного количества образцов. Следует лишь отметить, что геохимические индексы и элементные отношения предполагают небольшое усиление интенсивности химического выветривания, затухание эоловой активности, снижение гидродинамики водного режима озера с повышенным накоплением тонкой глинистой фракции.

В заключение следует сказать, что проведенные исследования показывают высокий потенциал геохимических записей как показателей эволюции природной среды озер

Окинское плато в позднеледниковое время и в голоцене. Индекс интенсивности химического выветривания отражает чередование этапов разной увлажненности и теплообеспечения в котловинах и бассейнах озер. В целом, видна связь этих изменений с известными климатическими событиями в северном полушарии. Однако из-за ограниченности доступных климатических записей из Окинское плато в этом исследовании нам пока трудно надежно объяснить механизм геохимической эволюции оз. Хикушка. Для более полного понимания причин и механизма вариаций геохимических показателей в горных озерах Восточного Саяна нужны детальные и хорошо датированные записи климата позднеледниковья – голоцена из других озер этого региона.

2.3 Результаты тифрохронологических исследований позднеледниковья – голоценовых вулканических извержений в долине р. Жом-Болок (Восточный Саян)

Вулканические извержения оказывают значительное влияние на функционирование региональных и глобальных климатических систем и ландшафтов. Крупнейшие извержения обуславливали общее снижение температуры воздуха на Земле вследствие изменения оптических свойств атмосферы. Похолодания и процессы окисления почв из-за выпадения поствулканических кислотных дождей приводили к кризисным состояниям и трансформации субаэральные и субаквальные экосистем. Исследования вулканической активности в голоцене обретают особую важность с точки зрения расцвета в этот период человеческого социума. Совершенствование научных знаний о реакции и восстановлении ландшафтов в зонах вулканического влияния позволяет глубже понять значение вулканизма в развитии региональных и глобальной климатических систем, среды обитания человека в целом.

Жом-Болокское вулканическое поле расположено в одном из главных орографических узлов горной системы Восточного Саяна с альпинотипными чертами рельефа (абсолютные высоты более 3000 м) и современным оледенением. Днище троговой долины р. Жом-Болок (рисунок 2.3.1) и ее притока р. Хи-Гол на всем их 70-километровом протяжении занято мощными (до 200 м) потоками трахибазальтовых лав гавайитового типа, а вулканические шлаковые конусы в самых верховьях долины фиксируют эпицентр излияний. История изучения этого крупнейшего проявления голоценовых вулканических извержений в Центральной Азии насчитывает уже более полутора веков. К настоящему времени получены подробные сведения о строении, составе, источниках и механизме долинных излияний лавовых потоков. При этом до сих пор так и не удалось надежно реконструировать их хронологическую последовательность. Известно лишь, что вулканические события были многофазными, начались на рубеже плейстоцена и голоцена, и продолжались до последнего тысячелетия.



Рисунок 2.3.1 – Схема расположения Жом-Болокского вулканического района с использованием космического снимка Landsat и цифровой модели рельефа SRTM. Стрелки – направление движения лавовых потоков. Прямоугольник на врезке – район исследования

Решение проблемы датирования молодых вулканических комплексов Жом-Болока возможно на основе изучения природных архивов, хранящих непрерывную историю извержений. Лучшим образом для этого подходят осадочные летописи озерных водоемов и торфяников.

Вблизи главного центра вулканических извержений Жом-Болока расположено множество разнообразных по условиям формирования и функционирования озерных морфолитосистем, в т.ч. оз. Каскадное-1 (рисунок 2.3.2), которое нами и было выбрано в качестве объекта тефрохронологических исследований. Озеро Каскадное-1 расположено в

днище каровой долины на абсолютной высоте 2080 м. Его глубина достигает 7 м, а площадь составляет 0,07 км². Водоем имеет гляциальное происхождение. Возник он в ходе таяния и отступления ледников в данном районе одним из первых. Последнее важное обстоятельство обеспечило возможность регистрации в осадках оз. Каскадное-1 сигналов местной вулканической деятельности с самых ранних ее этапов.

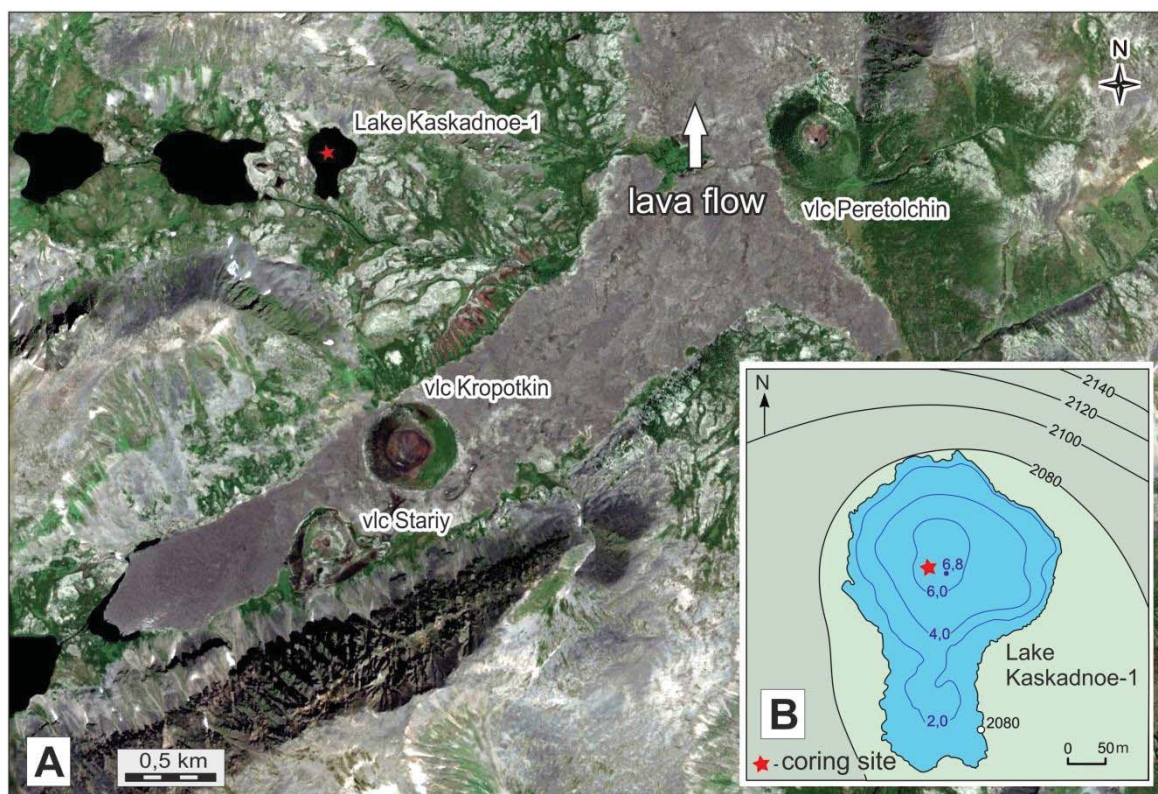


Рисунок 2.3.2 – Главный центр долинных излияний лавовых потоков Жом-Болок – верховья пади Хи-Гол (А), с использованием космического снимка Landsat, и батиметрическая схема котловины оз. Каскадное-1 (Б)

Геоморфологические свидетельства значительных колебаний уровня воды в озере отсутствуют, питание осуществляется за счет внутригрунтового стока. С юга и востока озеро окружают пирокластические конусы вулканов Перетолчина, Кропоткина и Старого (рисунок 2.3.2).

В геологической структуре ближайшего окружения водоема кайнозойские породы представлены позднечетвертичными отложениями ледников и селей, а также покровных чехлом образований склонового ряда. Молодые вулканические породы на территории водосборного бассейна озера отсутствуют, получая распространение ниже по долине, где они представлены лавами гавайитовых оливинов и базанитов, для эксплозивных образований характерно стекловидное строение с участием вкрапленников оливинов и пироксена в темноцветном базальтовом стекле.

Водоем не только не имеет непосредственного контакта с продуктами Жом-Болокских извержений, они отсутствуют в водосборном бассейне озера в целом, что исключает возможность поступления продуктов извержений в его донные отложения вследствие размыва вулканитов.

Таким образом, морфолитосистема оз. Каскадное-1 соответствует всем необходимым условиям для решения поставленных задач проведения тефрохронологических исследований.

Перед бурением нами было проведено детальное исследование рельефа дна водоема с использованием трехмерного 6-лучевого эхолота Humminbird Matrix 748x3D и составлена его батиметрическая схема. Точка бурения была выбрана в профундальной зоне котловины на глубине озера 6,5 м. Отбор донных отложений проводился гравитационным керноотборным устройством ударно-канатного типа UWITEC (Австрия) с диаметром лайнера 63 мм. Разрез озерных отложений был вскрыт полностью. Длина полученного керна составила 150 см.

В ИГХ СО РАН были исследованы физические (плотность, влажность, магнитная восприимчивость) и литологические свойства озерных осадков, установлено содержание биогенного кремнезема. Радиоуглеродное датирование выполнено в Познаньском университете (Польша). На основе стандартных методик тефростратиграфических исследований субаквальных отложений был исследован каждый сантиметр керна. На анализы отбирали 0,2 грамма сублимированного осадка. Подсчет частиц вулканического стекла проводили на поляризационном микроскопе на площади 2 см², при этом учитывались обломки размером от 10 до 100 мкм.

Исследование силикатных минералов вулканических стекол с целью изучения их состава проведено методом РСМА в ЦКП ИГХ СО РАН на микроанализаторе Superprobe JXA-8200. В режиме растрового электронного микроскопа во вторичных и в обратно рассеянных электронах изучены поверхность, размеры зерен, формы выделяемых фаз и фазовое распределение материала по матрице образцов.

Изучение литологического состава отложений озера позволило выделить две основные литологические единицы. Верхняя часть отложений в интервале 0–144 см представлена осадками постгляциального озера – биогенно-терригенным илом темно-оливкового цвета с присутствием створок диатомовых водорослей. Консистенция осадка творожистая, текстура неяснослоистая с едва различимой слоистостью, связанной преимущественно с изменением относительного обогащения осадка органическим веществом. Диатомовые водоросли представлены незначительным количеством как центрических, так и пеннатных форм. По направлению от кровли к основанию интервала наблюдается значительное снижение

концентрации створок диатомовых. Нижняя часть керна (на глубине 144–150 см) представлена плотной алевроитистой глиной светло-серого цвета. Это отложения прогляциального (приледникового) водоема.

Распределение значений абсолютного возраста по глубине керна (таблица 2.3.1, рисунок 2.3.3) демонстрирует отсутствие инверсий и почти линейный тренд возрастания возраста с глубиной в керне. Литология керна и возрастная модель предполагают непрерывную аккумуляцию отложений за последние 14290 лет и отсутствие явлений криотурбации донных отложений, возникающих при полном промерзании водоема.

Таблица 2.3.1 – Результаты УМС 14С датирования отложений оз. Каскадное-1

№ образца	Глубина отбора (см)	Средняя глубина отбора (см)	14С возраст (лет назад)	Калиброванный возраст (кал. лет назад)
Cascad_1	11-12	11,5	2070±30	2040±45
Cascad_2	67-68	67,5	7060±50	7890±50
Cascad_3	91-92	91,5	8960±50	10060±98
Cascad_4	113-114	113,5	9820±60	11250±68
Cascad_5	128-129	128,5	11160±60	13000±78
Cascad_6	142-143	142,5	11820±70	13660±74
Cascad_7	149-150	149,5	12310±70	14290±162

За реперное событие было принято извержение, произошедшее 6280 л.н., с которым соотносится формирование крупнейшего в долине р. Жом-Болок лавово-подпрудного озера Хара-Нур. В отношении этого вулканического события необходимо отметить два важных обстоятельства. Во-первых, оно было достоверно установлено мультидисциплинарными исследованиями отложений озера Хара-Нур и надежно датировано. Во-вторых, по масштабам проявления и значению в преобразовании местных ландшафтов его отнюдь нельзя назвать рядовым событием, хотя оно было далеко и не крупнейшим. Объем продуктов извержения был таков, что лавовый поток не только спустился вниз по долине р. Жом-Болок на более чем 20 км, но еще и на 5 км продвинулся вверх по троговой долине одного из ее боковых притоков, нарастив базальтовую дамбу и обусловив формирование современного облика лавово-подпрудного оз. Хара-Нур. В это время в осадки оз. Каскадное-1 поступает значительное количество пирокластического материала. Пик его содержания в изученных образцах был принят в качестве минимального порогового сигнала, фиксирующего вулканическое извержение в долине р. Жом-Болок. Безусловно, некоторый объем тефры должен был поступать в озеро в течение некоторого времени после пеплопадов за счет площадного смыва в водосборном бассейне, приводя к общему «загрязнению» озерных

отложений вулканическим материалом. На выделение событий это обстоятельство не влияет, однако при хронометрических реконструкциях отдельных извержений может иметь негативное следствие, обеспечивая, по всей видимости, некоторое приращение продолжительности «вулканического» сигнала в осадочной летописи озера. При этом, однако, известно, что микрочастицы вулканического стекла характеризуются слабой химической и физической устойчивостью к выветриванию и быстро разрушаются при ремобилизации в экзогенном литодинамическом потоке. Поэтому содержания частиц микротефры, не достигающие значений, зафиксированных при извержениях, которые привели к формированию оз. Хара-Нур, были отнесены к фоновым и исключены из статистического анализа.

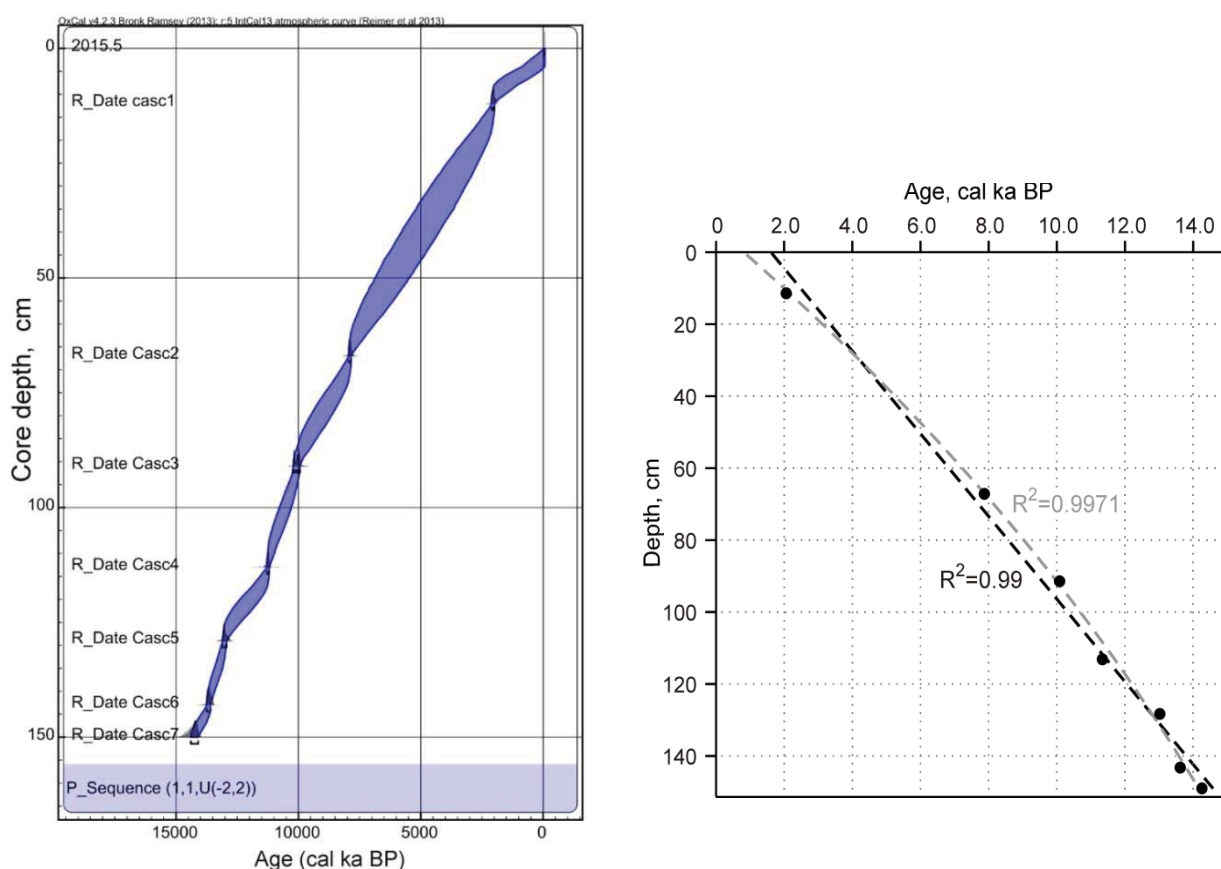


Рисунок 2.3.3 – Возрастная модель донных отложений оз. Каскадное-1; калибровка дат выполнялась с использованием программы Oxcal

В исследованных образцах из тейфросодержащих горизонтов микрочастицы вулканического материала присутствуют как в форме чистого стекла без включений, так и в форме стекла с включениями тонкозернистых минералов двух типов: 1 – ксеноморфного стекла с пылеватыми включениями тонкозернистых минералов, 2 – стекловидной массы со

слабо проявленной раскристаллизацией, включающей микрочерна кварца, плагиоклаза, оливина, пироксена и пылеватые включения рудного материала. Результаты микронзондового анализа (рисунок 2.3.4) показали, что зерна кристаллических минералов представлены оливином и пироксеном коричневого и зеленоватого цветов соответственно, а также бесцветными зернами плагиоклаза и кварца.

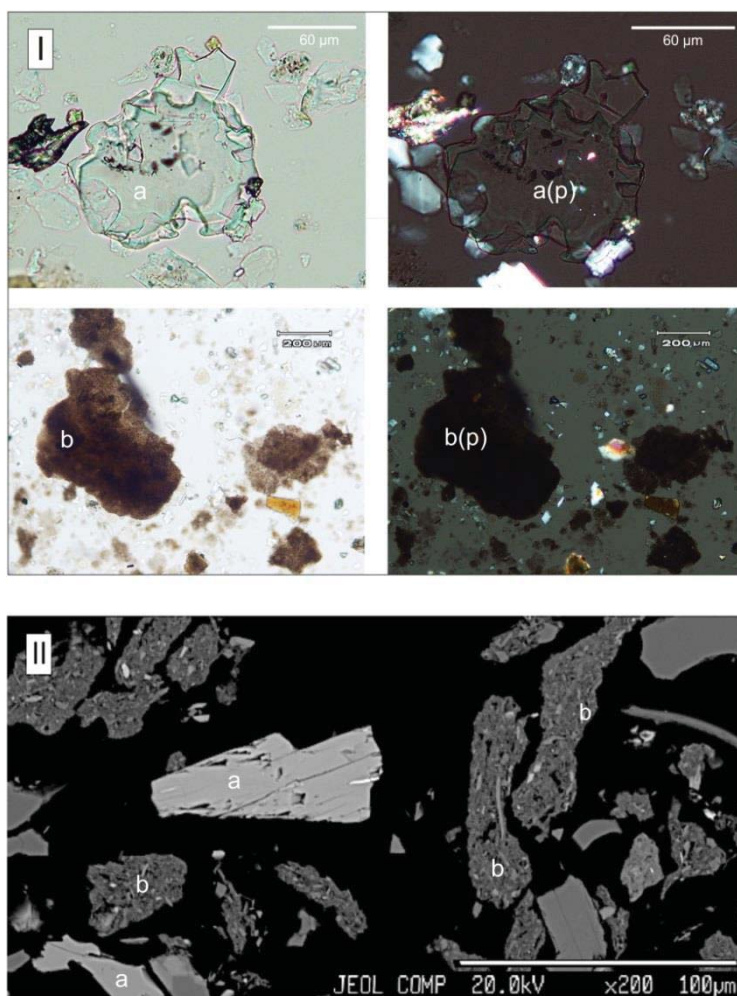


Рисунок 2.3.4 – Микрочастицы гомогенного вулканического стекла (a) и агрегированного стекла с микролитами кристаллов (b) из отложений оз. Каскадное-1 в проходящем свете (I) и в режиме обратно рассеянных электронов (COMPO), полученных на микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (II)

Данный анализ также позволил установить, что основу всех анализируемых зерен формирует силикатная составляющая с содержанием основных и примесных компонентов, присутствующих в различном процентном соотношении. Во всех зернах по матрице исследуемых образцов наблюдаются серые, темно-серые, светло-серые, светлые и яркие фазы ограненной, полуограненной, правильной и неправильной формы в виде частиц или

крупных обломков. Размер фаз по образцам изменяется от 10 до 200 мкм и более. Минеральная составляющая этих фаз представлена кварцем, амфиболами, пироксенами, шпатами, плагиоклазами. Яркие частицы выражены минералами с большим содержанием оксидов кальция и титана, в некоторых из них определены большие содержания оксида железа (таблица 2.3.2).

Таблица 2.3.2 – Содержание петрогенных окислов в вулканических комплексах Жом-Болока и микротефре донных отложений оз. Каскадное-1 по данным РСМА

Петрогенные окислы	Среднее значение по вулканическому полю, мас.%, по [Ярмолюк и др, 2003]	Среднее значение по вулканическому полю, мас.%, по [Иванов и др., 2011]	Микротефра донных отложений оз. Каскадное-1, среднее значение, мас.%
SiO ₂	48,5	48,5	48.2
TiO ₂	2,3	2,3	0.8
Al ₂ O ₃	15,1	14,7	7.1
Fe ₂ O ₃ общ.	11,6	10,6	16.1
MnO	0,1	0,14	0.3
MgO	8	8,5	12.4
CaO	8,1	8,2	11.6
Na ₂ O	4,3	4	0.9
K ₂ O	1,8	1,9	0.4
P ₂ O ₅	0,5	0,55	0.0
Всего	100,2	100,1	96.1

Обращает на себя внимание низкое содержание щелочей (Na₂O, K₂O) в микрочастицах вулканического стекла, установленное методом РСМА в сравнение с базальтами лавовых потоков, которые были исследованы ранее методом силикатного анализа. Возможной причиной этого может быть применение различных методов.

Самая высокая концентрация частиц микротефры содержится в слое алевритистых глин, сформированных 14300-13770 л.н. (рисунки 2.3.5 и 2.3.6), высокие содержания микротефры характерны и для нижних слоев биогенно-терригенных илов (13770-13300 л.н.). Очевидно, что в интервале времени 14300-13300 л.н. происходили наиболее масштабные вулканические события, когда извержения практически не прерывались, а эксплозивная деятельность характеризовалась максимальной формой развития. В начале этого интервала, продолжительностью в 600 лет, аккумуляция глинистых отложений происходила со скоростью 1 см/тыс. лет, с низкой концентрации SiO₂. Содержание биогенного SiO₂ в озерных осадках свидетельствуют о образовании органического вещества в озере. Магнитная восприимчивость отражает концентрацию магнитных минералов в осадке, её вариации обычно связаны с изменением объёма поставляемого в озеро терригенного вещества. Осадки, формирующиеся на недавно освободившихся от глетчера приледниковых

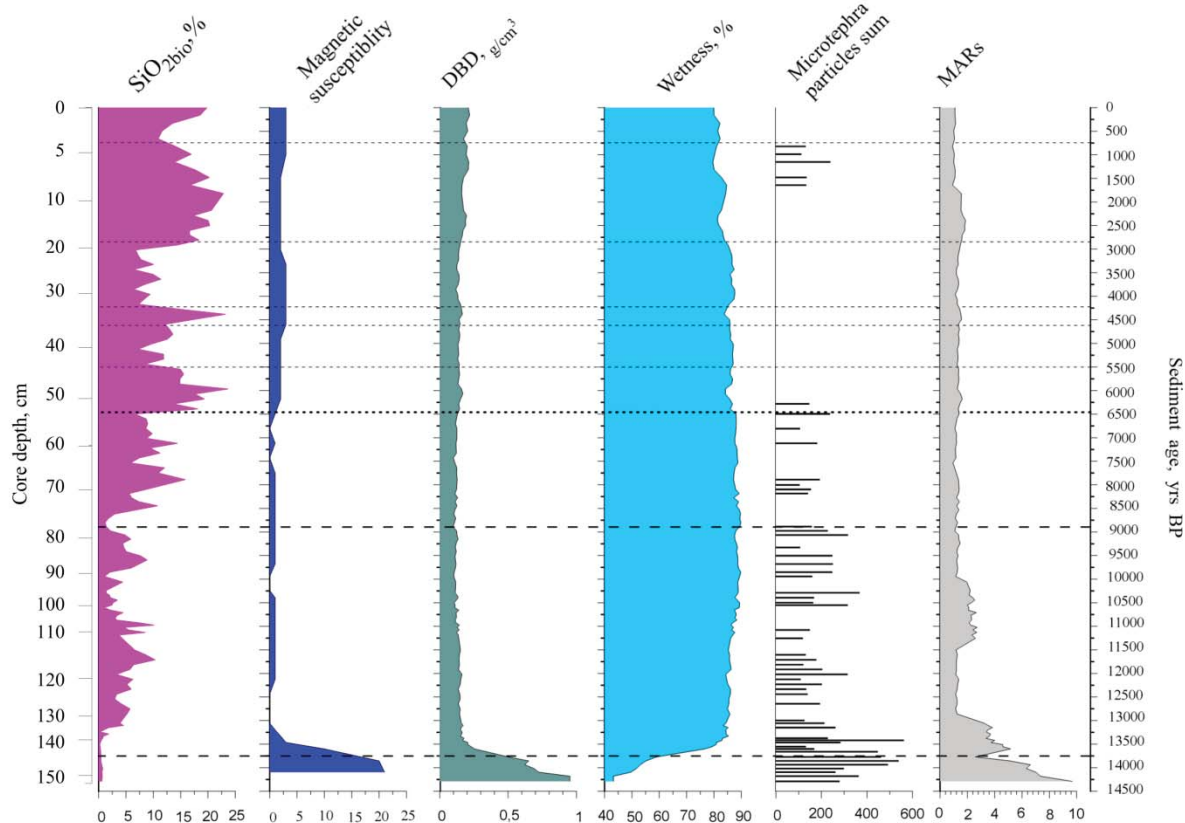


Рисунок 2.3.5 – Основные свойства отложений оз. Каскадное-1: содержание биогенного кремнезема, магнитная восприимчивость, плотность, влажность, содержание частиц микротефры и график средней скорости осадконакопления

территориях без растительности или с редким растительным покровом, должны характеризоваться наиболее высокими показателями магнитной восприимчивости (MS). Следовательно, MS осадка может использоваться еще и как индикатор активности ледника. Однако повышенная MS осадка не всегда свидетельствует о значительной экзарационной деятельности ледника, она может быть связана с коллювиальными процессами в водосборе. Для алевристических глин нижней части разреза отложений Каскадного озера наблюдается обратная зависимость между $\text{SiO}_{2\text{био}}$ и MS осадка, что, вероятно, можно отнести к функционированию приледникового озера в условиях низкой биопродуктивности водной толщи.

Согласно возрастной модели глины в оз. Каскадное-1 начали формироваться в результате таяния ледника, обусловленного, очевидно, глобальным потеплением около 14500 л.н. в Беллинг/Аллереде. Возможно, что таяние ледников в Жом-Болокском районе в это время могло вызвать изостатические движения, которые и привели к всплеску региональной вулканической активности. Полученные нами результаты не противоречат этой гипотезе, но уточняют возраст начала изостатических движений, которые могли

привести к всплеску региональной вулканической активности. Возрастная модель предполагает, что эта разгрузка произошла не в раннем голоцене, а в позднеледниковом периоде, не позднее 14300 л.н.

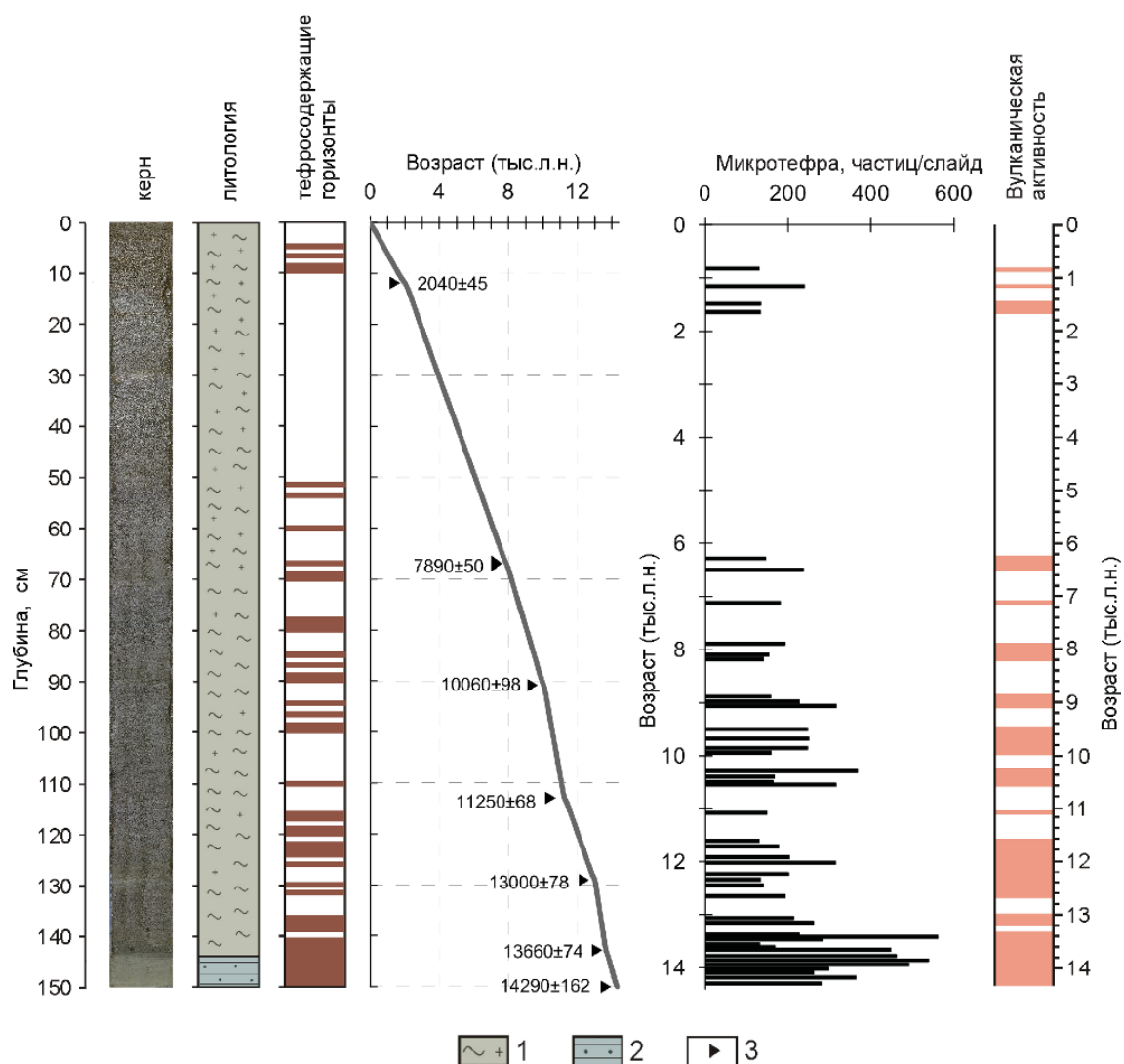


Рисунок 2.3.6 – Тефростратиграфия отложений оз. Каскадное-1 и хронология вулканической активности в долине р.Жом-Болок. 1 – биогенно-терригенный ил, 2 - алевритовая светлосерая глина, 3 – точки отбора проб на ^{14}C датирование

С 13300 л.н. происходит ослабление интенсивности эксплозивной деятельности, что фиксируется поступлением меньшего количества микрочастиц тефры в озерные отложения. Однако извержения все еще продолжают с небольшими перерывами до 6280 л.н. В целом, с 14300 до 6280 л.н. выделяется 10 групп пиков обогащения микротефрой осадков озера Каскадное-1. Детальная возрастная модель позволила рассчитать средний интервал между извержениями в это время – его длительность составляла 500–600 лет.

В донных отложениях оз. Каскадное, накопившихся между 6280 и 1600 л.н., обнаружены лишь редкие микрочастицы тефры, что, видимо, следует связывать с периодом

относительного затишья в вулканической деятельности Жом-Болокского района. Новые пики обогащения микротефрой фиксируются в верхней части вскрытого разреза донных осадках оз. Каскадное свидетельствуя о возобновлении извержений в позднем голоцене. Максимальных значений они достигают в осадках, формировавшихся 1150 л.н. Последние вулканические события, согласно полученным данным, происходят около 800 л.н. С этого времени, по всей видимости, наступает современный этап покоя в вулканической деятельности в долине р. Жом-Болок.

Сопоставление времени извержений, вариаций значений плотности и влажности донных отложений оз. Каскадное- 1 между 14300 и 6280 л.н. показало, что сколько-нибудь ясно выраженной зависимости изменения физических свойств осадка от происходивших в Жом-Болокском районе извержений не отмечено. Значения MS позднее 6500 л.н. повышались одновременно с возрастанием плотности осадка, но это происходило на протяжении длительного периода относительного покоя в региональной вулканической деятельности.

Изменения концентрации $\text{SiO}_{2\text{био}}$ в отложениях озера показывает, что процесс прямого образования органического вещества в озере вряд ли был связан с вулканической активностью. Скорее, в позднеледниковье и раннем голоцене, 14300-9700 л.н. низкие концентрации $\text{SiO}_{2\text{био}}$ зависели от ландшафтно-климатических условий в водосборе озера и поступления большого количества минерального вещества в озеро с ледниковыми водами. Возможно, что серия извержений около 9000 л.н. могла стать косвенной причиной снижения биопродуктивности озерной системы. При этом значительное падение биопродуктивности озерных вод 4200-3000 л.н. соответствует времени практического отсутствия извержений и, скорее могло быть обусловлено изменением природной среды региона с наступлением похолодания, ассоциируемого с неогляциальным периодом.

Последний зафиксированный в записи из отложений оз. Каскадное всплеск вулканической активности около 1600–800 л.н., возможно стал причиной кратковременного снижения биопродуктивности озерной системы. С другой стороны, время проявления минимума $\text{SiO}_{2\text{био}}$ около 700 л.н. могло быть вызвано общим похолоданием и повышением влажности в бассейне озера в Малый ледниковый период. Такое предположение поддерживается и несколько повывисшемся в это время сносом терригенного материала в озеро, что нашло выражение в повышении значений MS. При этом реконструированные скорости массовой аккумуляции отложений не изменялись.

Литологическое строение вскрытой толщи донных отложений оз. Каскадное и их надежная возрастная модель позволяют утверждать, что, по крайней мере, уже в позднеледниковый период, начиная с 14300 л.н., верховья долины р. Жом-Болок на высоте

2080 м н.у.м. были свободны от ледников, и здесь происходило формирование гляциальных озер. Это не противоречит предыдущим исследованиям характера и возраста сартанской стадии (МИС 2) позднеплейстоценового оледенения в Жом-Болокском районе. Согласно этим исследованиям, в этой части Восточного Саяна в сартанское время ледники имели широкое распространение, однако их объем был таков, что гляциальные процессы реализовывались преимущественно в пределах горных долин и каров. Средневзвешенный экспонированный возраст ледниковых отложений этого времени в долинах Окинского плоскогорья составляет 16440 ± 380 л.н. и 22800 ± 560 л.н.

В результате исследований с использованием архивов донных отложений озер была впервые установлена хронология вулканической активности в долине р. Жом-Болок (рисунок 2.3.6). Извержения начались как минимум 14300 л.н. в финальную стадию дегляциации и продолжались с небольшими перерывами до 6280 л.н. В этот этап фиксируется 15 групп пиков обогащения микротефрой осадков озера Каскадное-1. Впервые показано, что средний интервал между извержениями в это время составлял около 400 лет. Важным фактом является установление короткого временного периода от 14300 до 13400 л.н., когда, вероятно, происходили наиболее масштабные вулканические события, и извержения практически не прерывались, а эксплозивная деятельность характеризовалась максимальной формой развития. Между 6280 и 2000 л.н. в вулканической активности района наступает период относительного покоя. Позднее извержения возобновляются, достигая пиковых значений 1150 л.н. и завершаясь примерно 800 л.н.

Литологическое строение вскрытой толщи донных отложений оз. Каскадное и их надежная возрастная модель позволяют утверждать, что, по крайней мере, уже в позднеледниковый период, начиная с 14300 л.н., верховья долины р. Жом-Болок на высоте 2080 м над у.м. были свободны от ледников, и здесь происходило формирование гляциальных озер.

Таким образом, нами получена первая, наиболее полная на сегодняшний день запись вулканической активности в долине р. Жом-Болок. Эта запись является самой длительной из известных к настоящему времени надежно датированных последовательностей голоценовых извержений в северной Азии и объединяет результаты изучения микрочастиц тефры, физических и химических свойств донных отложений и их ^{14}C датирование. Разработанная шкала может рассматриваться в качестве основы для межрегиональных корреляций вулканических событий и их сравнения с известными палеоклиматическими записями для понимания возможного влияния вулканической деятельности на изменения региональной и глобальной климатической системы. Полученная тефрохронологическая запись хорошо согласуется с вулканическими событиями в долине р. Жом-Болок, установленными ранее

различными методами и исследователями. Таким образом, можно говорить о том, что вулканическая активность в долине р. Жом-Болок проявилась в виде двух крупных фаз. Извержения начались около 14300 л.н. и продолжались с небольшими перерывами до 6280 л.н. Последняя фаза извержений началась несколько позднее 2000 кал. л.н. и, вероятно, не завершилась.

Результаты исследований показали, что донные отложения оз. Каскадное-1 обладают еще и высоким потенциалом как непрерывный палеоклиматический архив с высоким временным разрешением. Его отложения могут быть использованы для получения новых записей палеоклимата из этого практически не изученного региона, что может расширить наши знания за пределы инструментального периода и очень важно для улучшения нашего понимания вариаций климата гор Южной Сибири в прошлом, на протяжении не только голоцена, но и части позднеледникового периода.

3 Микроэлементные характеристики плиоцен – плейстоценовых осадков озера Байкал по данным глубоководного бурения.

Необайкальская стадия развития отличается ростом интенсивности горообразования и переходом от красноцветной формации к аккумуляции современного осадочного чехла – преимущественно ледниковых отложений [34]. Смена источников сноса минерального и органического вещества в озеро Байкал является не только индикатором климатических изменений, но и тектонических движений в горном обрамлении озерной системы.

При оценке динамики поступления обломочного материала и разграничения источников сноса терригенного вещества в озеро Байкал с высоким разрешением были определены содержания микроэлементов в донных отложениях озера вблизи геохронологической границы, соответствующей переходу от плиоценовой эпохи к плейстоценовой. Эта граница имеет возраст около 2,588 млн. л.н. Для этого времени характерно изменение условий седиментации, поскольку около 2,588 млн. л.н. произошла смена состояния климатической системы планеты от преимущественно теплого (межледникового) к преимущественно холодному (ледниковому) состоянию. Кроме этого, вблизи границы плиоцена–плейстоцена проявились процессы тектогенеза, свидетельствующие о дооформлении ближайшего горного окружения водоема.

Отрицательная корреляция содержаний Be, Ga, Pb, Sn, Ti, Cr, Zn и $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ в донных отложениях озера Байкал (рисунок 3.1), свидетельствует об разбавления концентраций микроэлементов автохтонной биогенной компонентой. Выделяемые в Байкальской осадочной летописи потепления и похолодания соответствуют морским изотопным стадиям,

при смене магнитных эпох Матуяма–Гаусс (2,59 млн. лет) климатические стадии обозначаются литерой G вплоть до 3 млн. лет (стадия G22) [35].

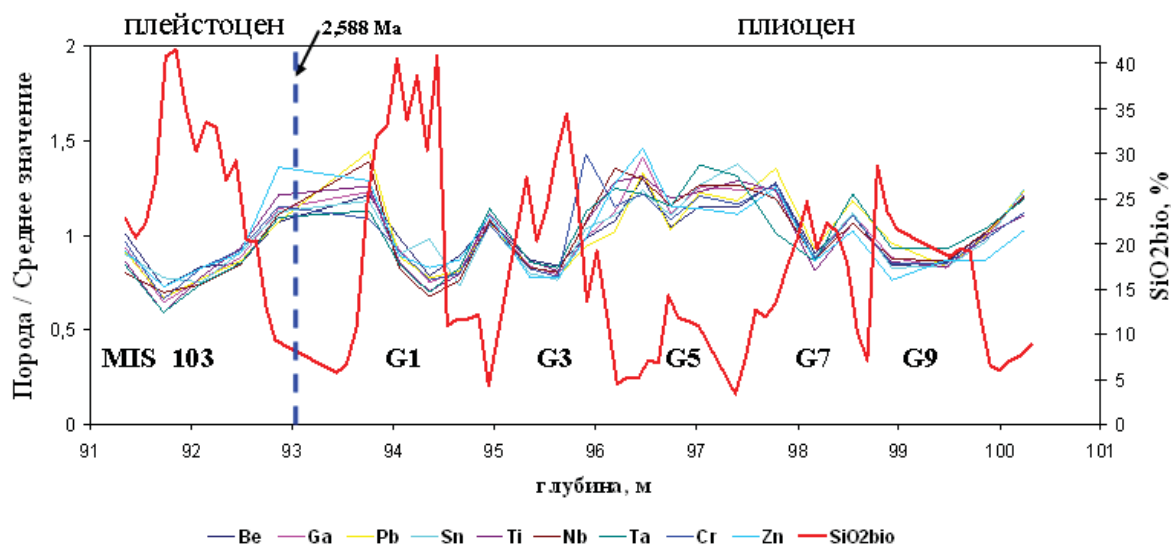


Рисунок 3.1 – Переход плиоцен– плейстоцен, группировка трендов ряда микроэлементов с учетом корреляции модели по биогенному кремнезему ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$) и морских изотопных стадий MIS [36, 37] (стадии, соответствующие потеплениям пронумерованы)

Соизмеримая тенденция выявляется по всей группе редкоземельных элементов (рисунок 3.2). Таким образом, обнаруживается возможность определения элементных характеристик автохтонной компоненты, выявления терригенного сигнала, фиксирующего динамику разрушения комплексов обрамления водоема.

При нормировании плиоцен–плейстоценовых осадков на кларки верхней континентальной коры [38], (рисунок 3.3) выявляется отличие отложений плиоцена, обедненных биогенным кремнеземом $\text{SiO}_{2\text{bio}}$, от отложений плейстоцена, обогащенных $\text{SiO}_{2\text{bio}}$. Плиоценовые разности осадков выявляют расхождение по группе редкоземельных элементов и свидетельствует о поступлении латеритных кор выветривания, обогащенных РЗЭ по отношению к плейстоценовым разностям, состоящим из продуктов преимущественно физической эрозии. При общем тренде к похолоданию от позднего плиоцена к плейстоцену и активных тектонических движениях вызревание коры выветривания в значительной мере сократилось. Таким образом, можно подтвердить выводы, полученные при определении изотопных характеристик стронция [39]. Так, изотопный состав Sr древнее 2,5 млн. лет близок к таковому в корях выветривания и полностью согласуется с утверждением о более агрессивной обстановке выветривания плиоцена по отношению к плейстоценовым разностям. В то же самое время изменение величин $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в осадках плейстоцена

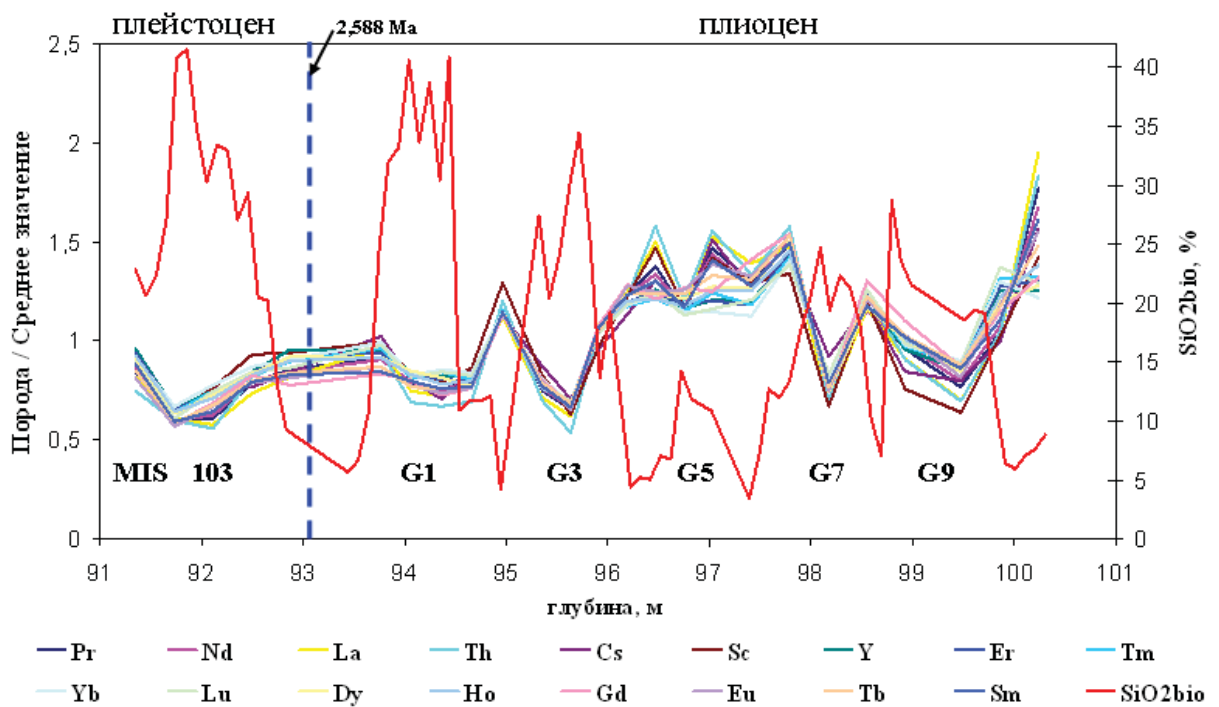


Рисунок 3.2 – Переход плиоцен–плейстоцен, группировка трендов РЗЭ с учетом корреляции модели по биогенному кремнезему ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$) и морских изотопных стадий МИС [36, 37] (стадии, соответствующие потеплениям, пронумерованы)

Донные отложения озера Байкал (скважина BDP-98)

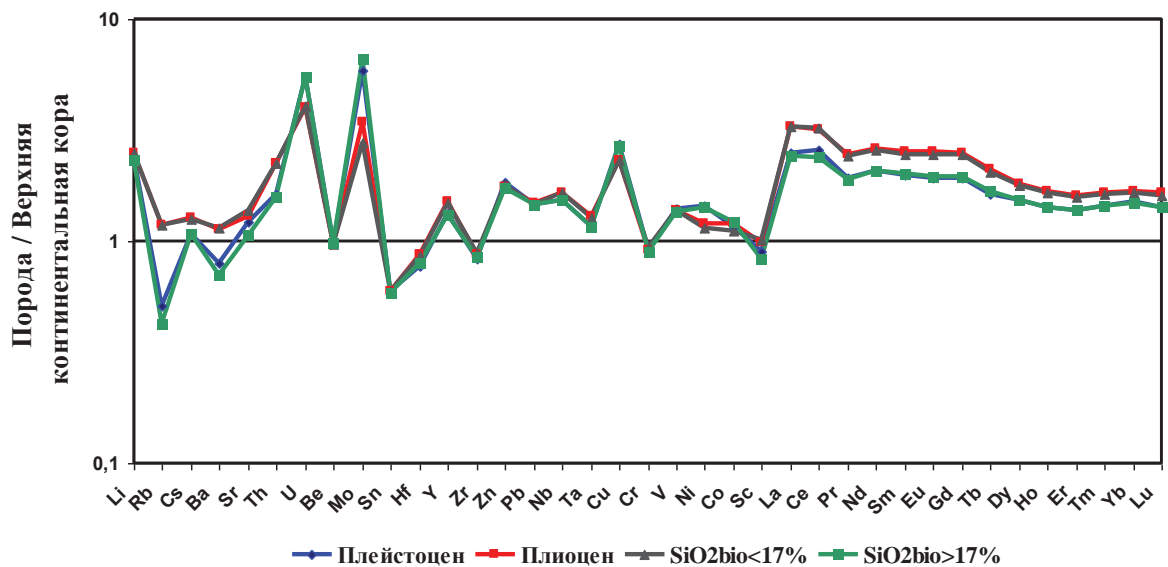


Рисунок 3.3 – Нормирование микроэлементного состава плиоцен–плейстоценовых осадков озера Байкал (скважина BDP-98) на кларки верхней континентальной коры по [38]

объясняется с позиций смешения вещества двух источников. Первый из них – коры выветривания, развивающиеся по гранитоидам и кислым кристаллосланцам. Второй – продукты разрушения основных пород (неогеновых вулканитов, палеозойских основных

кристаллосланцев, святоноситов), а также палеозойских карбонатных пород, т.е. продуктов разрушения комплексов ближайшего окружения водоема. При этом происходит значительное перемешивание продуктов химической и физической эрозии при общем похолодании климата и переносе в водоем.

Фигуративные точки на треугольных диаграммах La-Th-Sc, Th-Hf-Co [40], (рисунок 3.4) фиксируют преобладание кислых магматических пород в источниках сноса, т.к. очевидным является обеднение составов отложений Co и Sc, отвечающим за поступление в области размыва пород ультраосновного и основного состава. Достаточно плотное расположение фигуративных точек как плиоценовых, так и плейстоценовых осадков свидетельствует о неизменности источников сноса для всего исследуемого возрастного интервала. Отсутствие резких различий для фигуративных точек плиоцен–плейстоценовых разностей, обогащенных и обедненных $\text{SiO}_{2\text{bio}}$, также свидетельствует о нивелировании эффекта разбавления автохтонной биогенной компонентой при подобных построениях.

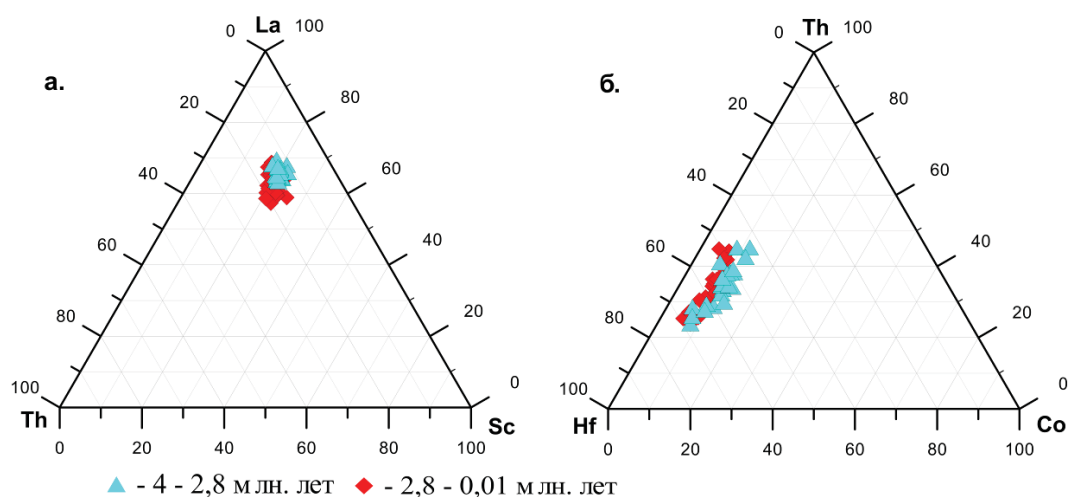


Рисунок 3.4 – Положение фигуративных точек плиоцен – плейстоценовых разностей осадков озера Байкал на диаграммах: а. La-Th-Sc, б. Th-Hf-Co (скважина BDP-98)

При оценке основных источников поступления материала в озеро плиоцен – плейстоценовые разности осадков озера Байкал были вынесены на дискриминационную диаграмму [41] (рисунок 3.5). Фигуративные точки при этом располагаются в двух полях: изверженных пород основного состава и изверженных пород среднего состава.

Примечательно отсутствие разделения фигуративных точек в поле кислых источников сноса при формировании осадочной толщи независимо от условий седиментации как для Академического хребта, так и для Селенгино-Бугульдейской перемычки (рисунок 3.5).

Существует два варианта объяснения подобного поведения донных осадков. С одной стороны, среди комплексов герцинских гранитоидов Забайкалья наиболее ярко выделяются породы чивыркуйского и нижнеселенгинского комплексов монцонитов и сиенитов, частично

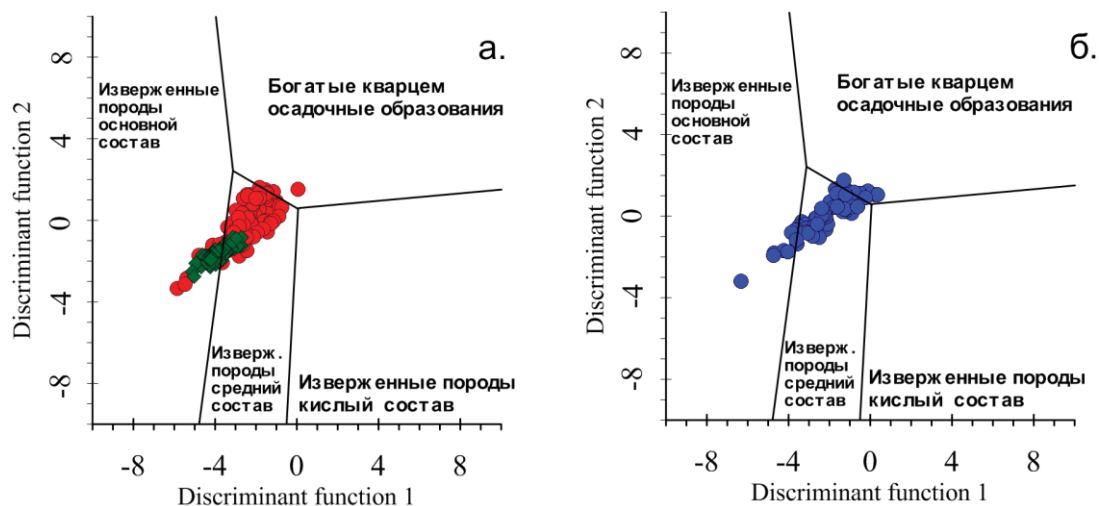


Рисунок 3.5 – Дискриминационная диаграмма [41] для осадков: а. – BDP-98 (ромбы 4–2,8 млн. лет, кружки 2,8–0,01 млн. лет); б. – BDP-99

локализованных как в береговой зоне восточного побережья оз. Байкал, так и в долине рек Баргузин и Селенга [42]. Таким образом, имело место поступление пород среднего или близкого к среднему составу в осадочные горизонты разрезов. С другой стороны, необходимо учитывать, что, несмотря на локализацию в водосборных бассейнах рек Баргузин, Селенга и береговой зоне озера большого количества кислых гранитоидов, наблюдается усреднение составов отложений вплоть до основного состава за счет выщелачивания ряда элементов субстрата донных осадков при химической переработке и дальнейшей аккумуляции преимущественно твердых продуктов выветривания в отложениях водосборной площади. Это можно проследить по группе образцов, соответствующих возрастному интервалу 4–2,8 млн. лет и имеющих более основной состав и отражающих спокойную седиментационную обстановку плиоцена, свидетельствуя о большем поступлении продуктов, связанных с латеритной корой выветривания по сравнению с более молодыми осадками плейстоцена, имеющими более средний состав. Так как подводные поднятия, такие как Академический хребет, отражают поступление преимущественно тонких фракций из водной толщи, очевидным становится вывод о максимальной аккумуляции в разрезе BDP-98 продуктов химического выветривания среди большинства подводных морфоструктур озера.

Поскольку одной из основных задач, стоящих при детализации микроэлементных характеристик донных отложений озера Байкал, является реконструкция палеотектонических обстановок, очевидно, что эффект разбавления автохтонной составляющей несколько нивелирует тектонический сигнал. В дальнейшем при определении степени контаминации терригенных отложений автохтонной биогенной компонентой палеотектонические реконструкции будут продолжены.

4 Изучение компонентного состава и изотопного состава углерода метана и его гомологов из осадков Южной и Центральной котловин оз. Байкал.

Вопросы генезиса метана в водных экосистемах привлекают все более пристальное внимание исследователей в связи с проблемой глобального потепления. Считается, что в общем балансе CH_4 роль акваторий оказалась недооцененной. Поэтому в последнее время развернуты работы по исследованию механизмов и масштабов образования метана в континентальных озерах, в том числе и озере Байкал.

В соответствии с планами НИР в 2019 году проведено обобщение данных по компонентному составу и изотопным характеристикам ($\delta^{13}\text{C}$) метана смешанного типа (термогенный +микробный) и его гомологов.

Полевой материал был отобран в рейсах НИС “Верещагин”, организованных Лимнологическим институтом СО РАН.

Метан смешанного типа широко распространен в Южной и Центральной котловинах оз. Байкал, в местах, где происходит разгрузка газа [43, 44]. В большинстве исследованных нами образцов газа смешанный метан имеет изотопный состав углерода, типичный для микробного газа ($\delta^{13}\text{C}-\text{C}_1 = -69,5 \text{ ‰} \div -52,6 \text{ ‰}$), но содержит в качестве примеси этан термогенного ($\delta^{13}\text{C}-\text{C}_2 = -30,2 \text{ ‰} \div -20,8 \text{ ‰}$) происхождения (рисунок 4.1).

Гомологи представлены в основном этаном, причем в некоторых образцах его содержание достигает 3-4 об.%. Пропан и бутаны присутствуют в следовых количествах.

Образование метана такого типа происходит в результате механического смешения термогенного газа с микробным метаном, который образуется на меньших глубинах. Этот процесс реализуется в любых газовых системах, протекает на всем пути миграции термогенного газа от источника к поверхности дна и приводит к снижению концентрации гомологов и значения $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_1$ в смеси.

Однако байкальский метан смешанного типа имеет необычный компонентный состав, который получить путем простого смешения микробного и термогенного газа, содержащий большое количество более тяжелых гомологов, невозможно.

Практически полное отсутствие примеси пропана и бутанов в байкальском смешанном метане свидетельствует о том, что он является продуктом вторичных преобразований, которые существенным образом меняют компонентный состав исходного газа. На наш взгляд, наиболее вероятной причиной низкой концентрации пропана и бутана является процесс их анаэробной биодеградации, результате которого происходит предпочтительное удаление *n*-алканов (пропан, *n*-бутан и т.д.) (см. напр. [46, 47]). При этом микробное сообщество практически не затрагивает метан и этан. Наиболее легко подвержен

биодеградация пропан, обладающий наибольшей растворимостью в воде по сравнению с другими *n*-алканами, что делает его более доступным для микроорганизмов. В газе, не подверженном бактериальной переработке, в ряду метан – *n*-бутан происходит монотонное увеличение значения $\delta^{13}\text{C}$ в виде гладкой прогрессии. В процессе же бактериального разложения *n*-алканов продукты реакции обогащаются изотопом ^{12}C , а остаточные компоненты – изотопом ^{13}C , и эта закономерность нарушается, и соответствующая кривая приобретает пилообразную форму, что и является индикатором процессов биодеградация гомологов метана.

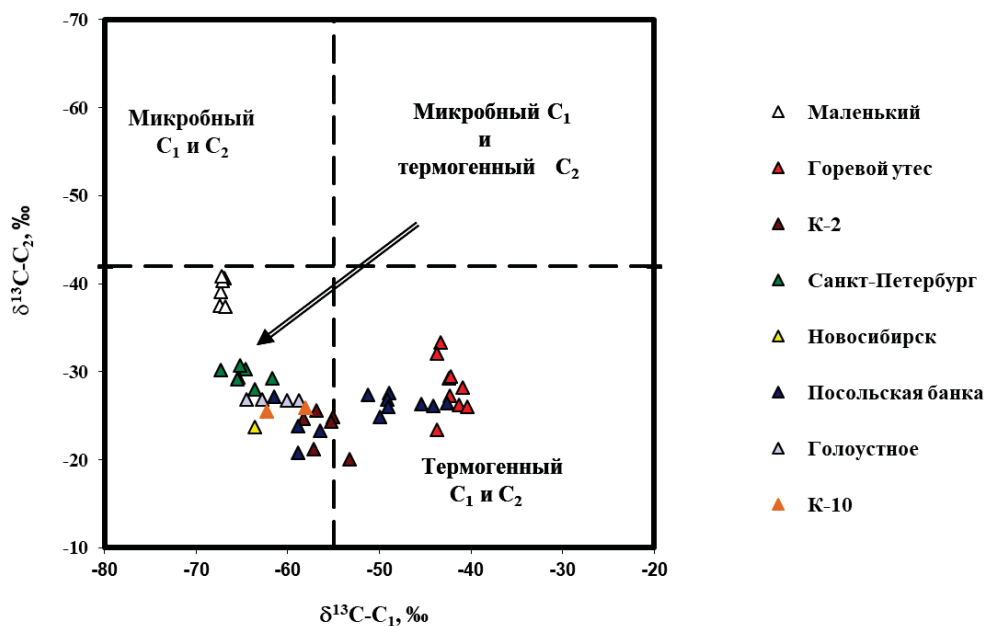


Рисунок 4.1 Диаграмма в координатах $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}-\text{C}_1$ для байкальского метана смешанного типа (по [45]). На диаграмму нанесены также значения $d^{13}\text{C}-\text{C}_2$ и $d^{13}\text{C}-\text{C}_1$ для термогенного метана (Посольская банка, нефтегазовое проявление Горевой утес)

Из-за низкой примеси пропана в газе, растворенном в поровых водах, провести изотопный анализ гомологов метана удалось лишь в единичных образцах гидратного газа. Измерения $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_3$ проведены А. Хачикубо в Технологическом институте г. Китами (Япония) по методике, описанной в работе [48], позволяющей определить значение $\delta^{13}\text{C}$ при концентрациях гомологов $< 0,1\%$ относительно метана.

Результаты измерений приведены на рисунке 4.2. Видно, что пропан аномально обогащен изотопом ^{13}C относительно этана, что приводит к высоким значениям $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_3$. Это является свидетельством того, что *n*-алканы были подвержены бактериальной переработке. Существенного фракционирования изотопов углерода в процессе образования ГГ не происходит [49], поэтому с большой долей вероятности можно предположить, что бактериальной переработке подвергался также и материнский газ.

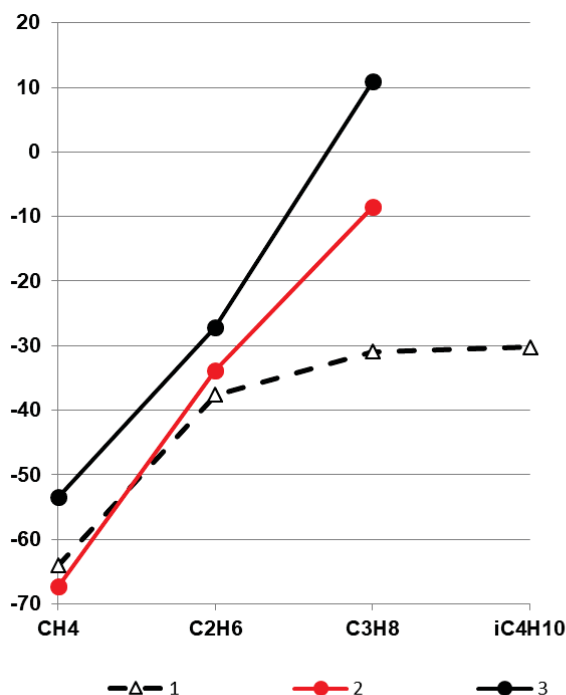


Рисунок 4.2 – $\delta^{13}\text{C}$ метана и его гомологов 1 – газ не подвержен бактериальной переработке; 2 – Новосибирск; 3 – К-10. Видно, что в местах разгрузки смешанного газа пропан аномально обогащен изотопом ^{13}C относительно этана. Это является свидетельством того, что пропан был подвержен бактериальной переработке

Процесс формирования компонентного состава смешанного газа может происходить при биодegradации гомологов метана уже после смешения микробного газа с термогенным и/или при смешении микробного метана с термогенным газом подверженном бактериальной переработке. Примером такого газа, может служить обнаруженный нами в осадках подводной возвышенности Посольская банка термогенный метан, в котором согласно результатам измерения $\delta^{13}\text{C}$ гомологов реализуется процесс биодegradации *n*-алканов [50]. В результате этого содержание этана в этом газе, также как и в метане смешанного типа достигает 4 % при практически полном отсутствии более тяжелых гомологов.

Были обобщены данные по компонентному составу и изотопному составу углерода метана смешанного типа и его гомологов из осадков Южной и Центральной котловин оз. Байкал, в местах, где происходит разгрузка газа со дна озера.

Установлено, что метан смешанного типа (термогенный+микробный) имеет изотопный состав углерода, типичный для микробного газа ($\delta^{13}\text{C-C}_1 = -69,5\text{‰} \div -52,6\text{‰}$), но содержит в качестве примеси этан термогенного типа ($\delta^{13}\text{C-C}_2 = -30,2\text{‰} \div -20,8\text{‰}$), причем в больших количествах (до 4%). Более тяжелые гомологи присутствуют в следовых количествах.

Показано, что такой необычный компонентный состав байкальского газа смешанного типа определяется процессом анаэробной биодegradации гомологов метана, в результате которого селективно удаляются *n*-алканы (пропан, *n*-бутан и т.д.).

5 Временные изменения содержания полихлорированных бифенилов и хлорорганических пестицидов в почвах Прибайкалья.

Полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды входят в число стойких органических загрязнителей. Общей характеристикой всех соединений группы СОЗ является способность переноситься с атмосферными потоками на значительные расстояния от источников их образования или мест использования или хранения (Maskay, Wania, 1995; АМАР, 2004). Значительную роль в процессах глобального и регионального транспорта СОЗ играют климатические факторы, включая температурный режим. В теплое время года происходит испарение СОЗ с поверхности почв. При отрицательных температурах преобладают процессы осаждения [51, 52]. Климат на территории Восточной Сибири резко континентальный (с жарким летом и морозной зимой с частыми температурными инверсиями) [53]. Поэтому на данной территории изменения в перераспределении СОЗ в системе почва - атмосферный воздух могут быть хорошо выражены в течение года.

Цель настоящего исследования - изучить сезонную и межгодовую изменчивость содержания ПХБ и ХОП в почвах Прибайкалья.

Отбор проб почв для исследования межгодовой изменчивости производился в центральной зоне Байкальской природной территории в 1997, 2002, 2006, 2012 и 2016 гг. Места отбора проб настоящего исследования охватили широкий спектр биомов Байкала, от мест произрастания смешанных лесов до темнохвойной, сильно увлажненной тайги, подгольцового и субальпийского комплексов растительности. Глубина горизонтов О и А в сумме составляла 13–18 см. Отбор проб почв производился методом конверта, цилиндрическим почвенным буром на глубину 16–18 см. Общая площадь отбора каждой пробы составляла 106 см² для проб 2016 г. и 90 см² для прежних лет.

Для исследования сезонной изменчивости в почвах были выбраны территории с ненарушенным почвенным покровом в районе поселков Большое Голоустное (степные песчаные почвы) и Большой Луг (лесные дерновые почвы), а также с антропогенно-измененными почвами в садоводстве Шелеховского района, в рекреационных зонах городов Иркутск и Усолье-Сибирское, в селитебных зонах двух районах города Усолье-Сибирское.

Пробы почв отбирались каждый месяц или через месяц в бесснежный период года. Отбор проводился методом конверта металлической лопаткой на глубину 5 см.

Доставленные в лабораторию пробы почв сушились при комнатной температуре до постоянного веса. Фракция менее 2 мм была использована для дальнейшего анализа.

В почвах были определены 34 конгенера ПХБ и хлорорганические пестициды (ГХБ, α - и γ -изомеры ГХЦГ, p,p' -ДДТ и его метаболиты p,p' -ДДД и p,p' -ДДЭ) методом, опубликованным ранее с использованием газового хроматографа HP 5890 серия II совмещенного с детектором электронного захвата [54, 55].

Статистическая обработка полученных результатов (корреляционный и факторный анализ) проведена с использованием программы “STATISTICA’6”.

Результаты и обсуждение. На всех станциях пробоотбора и во все годы исследований превышения ОДК для почв (60 нг/г), кроме гор. Усолья-Сибирского (155 нг/г в 2013 г.), зафиксировано не было (рисунок 5.1). Уровень содержания ПХБ в почвах южного Байкала за все годы исследований (с 1995 года) соответствовал фоновому уровню почв индустриально развитых стран северного полушария. Это почти в 5 раз превышает фоновый уровень загрязнения среднего и северного Байкала, а также фоновый уровень полярных районов нашей страны. Причиной превышения концентраций ПХБ южной части БПТ над концентрациями среднего и северного Байкала является воздействие ангарской промышленной зоны, влияющей на Байкал посредством северо-западного воздушного переноса, а также в результате последствий работы БЦБК, расположенного в г. Байкальске, и других более мелких источников.

По результатам исследования было определено, что концентрация всей суммы ПХБ проб почв Байкальского региона (рисунок 5.1) изменялась по годам и в зависимости от района исследования.

Концентрации ПХБ почв гор. Усолье-Сибирское – как исторически сложившегося источника с 1997 по 2013 годы – изменились незначительно. Ряд снижения концентраций суммы 8 ПХБ составил от принятого за 100% 1997 г. 88% для 2002 и 84% для 2013 г., что может свидетельствовать об отсутствии в этой зоне новых значимых источников ПХБ и о значительности запасов имеющегося источника.

В настоящее время наблюдается тенденция к снижению концентраций ПХБ в почвах южного Байкала. Основная причина этого – закрытие в 2013 г. БЦБК. Соотношение ДДТ и его метаболитов соответствует свежему поступлению исходного ДДТ, и за последние 5 лет отмечается рост его концентраций.

Временной ряд изменений концентраций ПХБ фонового района наиболее полно отражают точки 23 и 26 (рисунок 5.1). Увеличение концентраций наблюдается с 1997 по 2006 годы с последующим снижением к 2012 году, не достигая, тем не менее, исходного уровня наблюдений 1997 г.

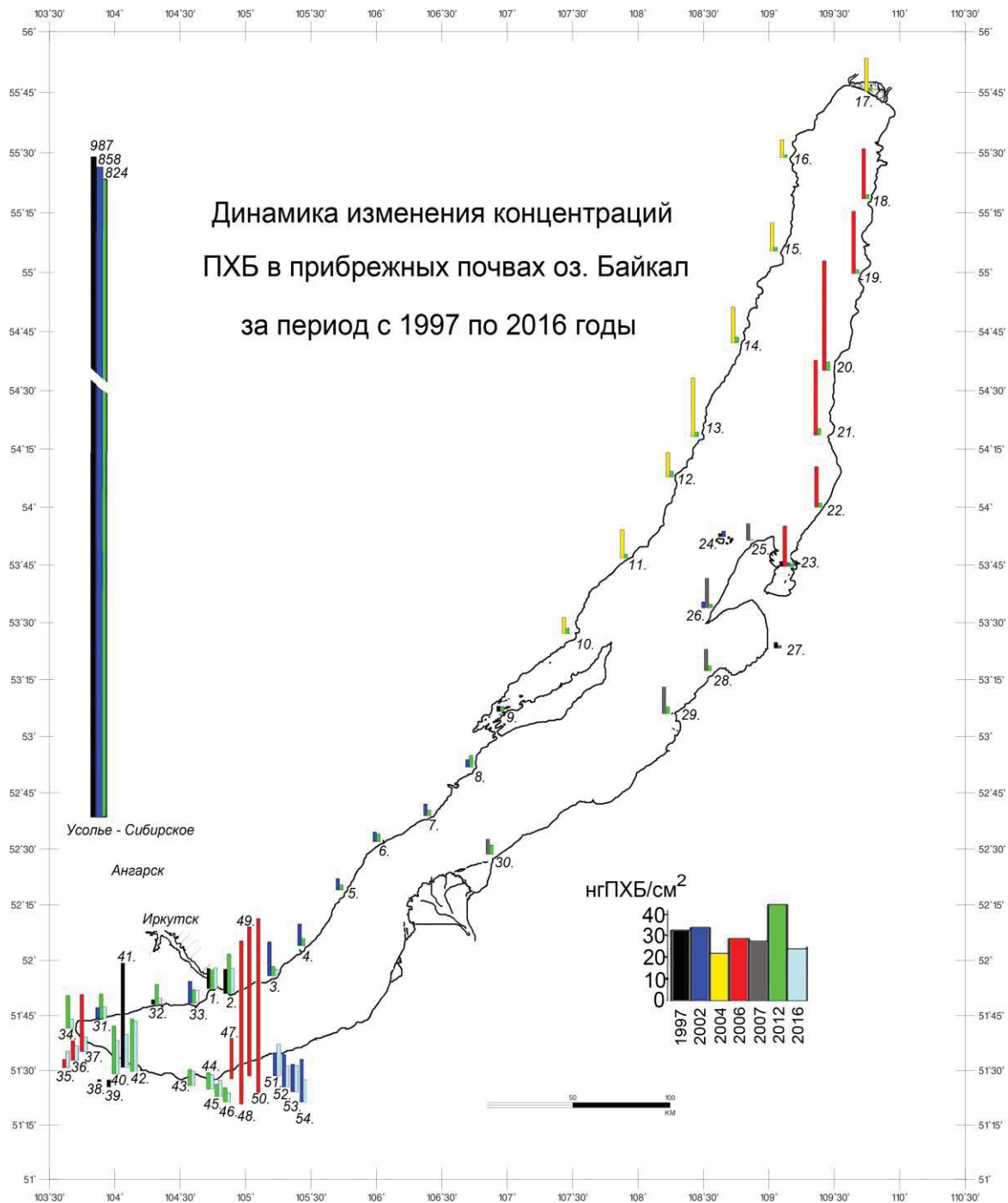


Рисунок 5.1 – Динамика изменения концентраций ПХБ в прибрежных почвах озера Байкал за период с 1996 по 2016 годы

Все пробы почв северного Байкала (точки №10–23 на рисунке 5.1) показали в 2004–2006 гг. повышенные концентрации ПХБ сравнимы с почвами городов Шелехов, Байкальск, Слюдянка, Улан-Удэ, имеющими концентрации 18–45 нг/см².

Максимальные концентрации, определенные в настоящем исследовании, приходились примерно на центральную часть северного Байкала - на разрезе мыс Елохин (13) – мыс Кабаний (20), достигая величины в 50 нг/см². В этих же точках отбора проб экспедиции 2012 года концентрации ПХБ были более чем в 13 раз ниже. Подобные колебания содержания

ПХБ в почвах, когда за 6 лет происходит более чем 13 кратное падение концентраций, не имеют опубликованных в мировой печати аналогов.

Таким образом, принимая во внимание величины ПХБ проб среднего Байкала (точки 23–26), мы имеем возможность предполагать, что в 1990-е гг. поступление ПХБ в северную котловину озера было значительно ниже, чем в 2002–2006 гг., когда северный Байкал испытывал воздействие достаточно мощного источника воздушной эмиссии ПХБ. Большая площадь покрытия сравнительно высокими концентрациями ПХБ северного Байкала может свидетельствовать о продолжительной работе исключительно мощного источника воздушной высокотемпературной эмиссии.

Вероятно, из-за того, что северный Байкал является фоновым районом и, скорее всего до 2002 г. испытывал минимальное антропогенное воздействие, поступившие массы ПХБ не успели проникнуть в глубинные слои почвы. Вероятно, поэтому вынос ПХБ из почв происходил с максимально возможной скоростью после прекращения работы источника. Таким образом, нам теперь известен пример приблизительной скорости снижения концентраций ПХБ в почвах умеренных широт без дополнительного влияния извне.

Исследования сезонных изменений концентраций СОЗ в почвах Прибайкалья проводились в районах с разной степенью антропогенной нагрузки. Соответственно, уровни концентраций СОЗ различались по районам исследования. Наибольшие концентрации СОЗ обнаружены в антропогенно-измененных почвах гор. Усолье-Сибирское, где расположен длительно действовавший источник ПХБ (Усольехимпром), а наименьшие – в степных песчаных почвах в районе пос. Большое Голоустное, в 150 км от Усоля-Сибирского и 80 км от Иркутска вне значительного влияния атмосферного переноса доминирующими ветрами со стороны Иркутско-Черемховского промышленного узла. Рассматривались только те различия в концентрациях по сезонам года в почвах каждой станции, которые превышали ошибку метода.

Распределение СОЗ в почвах по сезонам года также различается в зависимости от степени нагрузки СОЗ. В условиях наименьшей исследованной антропогенной нагрузки (степные почвы у поселка Большое Голоустное и лесные почвы у поселка Большой Луг) изменения СОЗ в почвах обусловлены в основном глобальным и региональным атмосферным переносом (рисунок 5.2). Самые низкие концентрации ПХБ в обоих типах почв найдены в июле-сентябре; ДДТ и его метаболитов - в лесных почвах - в июле-октябре, в степных - июле-октябре; ГХЦГ - в лесных - сентябре-ноябре, в степных - июле-августе. Наибольшие концентрации ПХБ в почвах степных районов обнаружены в июне, октябре, а в лесных - в мае и октябре-ноябре; ДДТ и его метаболитов и ГХЦГ - в степных - в июне, ноябре, в лесных - в мае и ноябре.

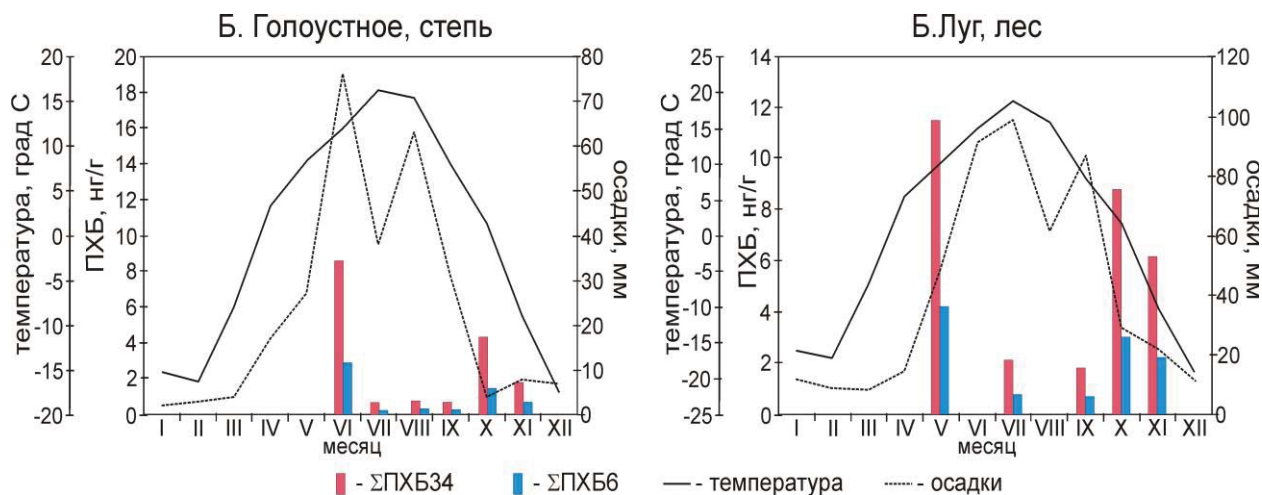


Рисунок 5.2 – Сезонные изменения концентраций ПХБ в степных почвах в районе поселка Большое Голоустное и лесных почвах поселка Большой Луг

Изменяется и соотношение индивидуальных соединений. Например, отношения α/γ -ГХЦГ, ДДТ/ДДЭ и ДДЭ/ДДД в лесных и степных почвах изменялись в пределах 2-5 и 1,5-2,7; 1,5-2,9 и 1-4,3; 1,8-4,8 и 2-4,3, соответственно, что говорит о разнице как в механизмах метаболизма данных соединений, так и направления потоков в системе почва-атмосфера. Изменяется и соотношение гомологов ПХБ. Например, доля тетраХБ в июле-сентябре 17-22 % в степных и 10-15 % в лесных почвах, а в остальные месяцы 30-35 и 22-34 %, соответственно. И, наоборот, доля гексаХБ в июле-сентябре около 25 % в степных и 21-25 % в лесных почвах, а в остальное время 8,5-13 и 8,5-17 %, соответственно.

Первое повышение концентраций отдельных соединений в почвах отмечено в марте-мае. Это весеннее повышение концентраций обусловлено поступлением СОЗ, накопившихся в снеговом покрове за зиму. Падающие снежинки лучше, чем дождевые капли, вымывают исследуемые соединения из атмосферы [56, 57] и являются, таким образом, значимым фактором, влияющим на глобальный атмосферный перенос и осаждение СОЗ. Затем СОЗ поступают в почву при таянии снега, где адсорбируются на частицах, связываются с органическим веществом почв или остаются в растворенном состоянии в водной фазе (рисунок 5.2).

В теплое время года концентрации СОЗ в почвах уменьшаются и достигают наименьших уровней к августу-сентябрю. При повышении температуры летом происходит испарение СОЗ сначала с парами воды, а затем, с поверхности частиц почв.

Еще одно небольшое повышение концентраций СОЗ в лесных почвах появляется после листопада и начала устойчивых заморозков осенью, что связано с поступлением в почву СОЗ из лиственного опада. Листья деревьев и кустарников являются эффективными фильтрами и накопителями СОЗ из атмосферного воздуха [58].

В районах со средней антропогенной нагрузкой (например, рекреационная зона в гор. Иркутске, садоводство в Шелеховском районе) отмечается также еще одно повышение концентраций промышленных СОЗ (ПХБ, ГХБ) в почвах в июле, что может быть связано с увеличением количества осадков и вымыванием из атмосферного воздуха СОЗ, содержащихся в пыли и аэрозолях (рисунок 5.3).

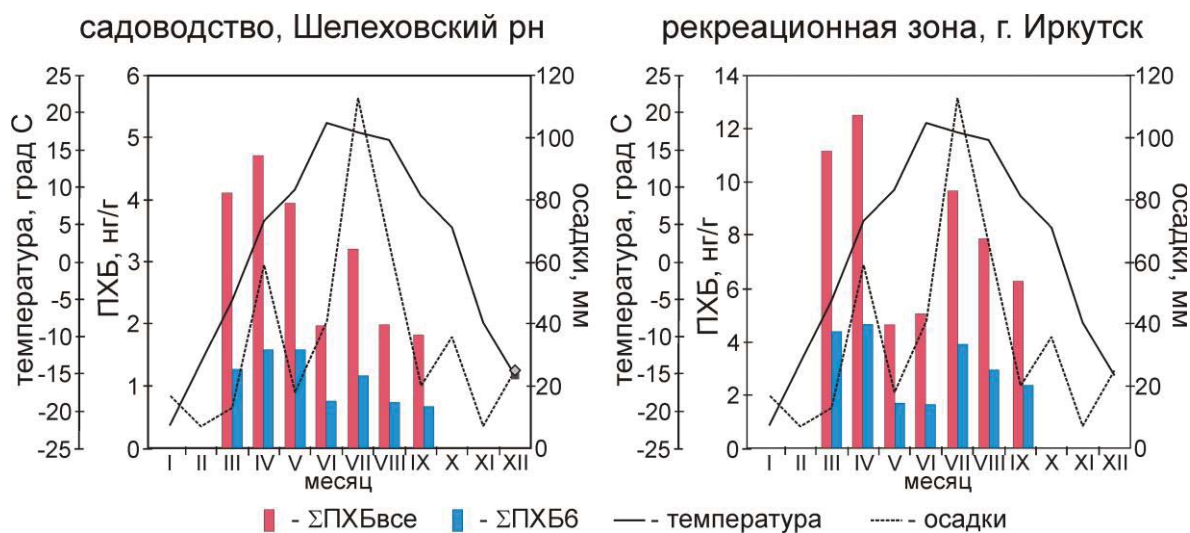


Рисунок 5.3 – Сезонные изменения концентраций ПХБ в почвах садоводства в Шелеховском районе и в рекреационной зоне г. Иркутска

В почвах в районе со значительной антропогенной нагрузкой (г. Усолье-Сибирское) выявить выраженные сезонные изменения концентраций СОЗ не удалось, так как отбор проб осуществлялся через месяц (по 3 пробы на каждой станции). Другой причиной может быть влияние близко расположенного источника. В почвах селитебной зоны в северной части города влияние близко расположенного источника ПХБ (2,5 км до промплощадки Усольехимпрома) отражается в повышении концентраций ПХБ в почвах в период с наибольшим количеством осадков. В селитебной зоне в 6 км от промплощадки некоторое повышение концентраций отмечено в мае, т.е. в результате поступления из тающего снега. В одном случае – на станции в рекреационной зоне весной прошел лесной пожар. Концентрации ПХБ, ГХБ и ГХЦГ были наименьшие после пожара и постепенно увеличивались в последующие периоды пробоотбора.

Таким образом, проведенные исследования показали, что концентрация всей суммы ПХБ и ХОП проб почв Байкальского региона изменялась по годам и в зависимости от района исследования.

В 2013 годы концентрации ПХБ в почвах г. Усолье-Сибирское, где расположен длительно действовавший источник ПХБ, составляли 84% от концентраций 1997 г., что может свидетельствовать о значительности запасов имеющегося источника.

В настоящее время наблюдается тенденция к снижению концентраций ПХБ в почвах южного Байкала и основная причина этого – закрытие в 2013 г. БЦБК. Тогда как, соотношение ДДТ и его метаболитов соответствует свежему поступлению исходного ДДТ, и за последние пять лет отмечается рост его концентраций.

Обнаруженная сезонная изменчивость СОЗ в почвах может быть обусловлена как физико-химическими свойствами СОЗ, так и типом почв и растительности, температурным режимом, количеством твердых и жидких осадков и антропогенными факторами (например, промышленные предприятия – источники СОЗ). Сезонные изменения концентраций СОЗ в почвах необходимо учитывать при проведении мониторинга СОЗ в почвах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые научные результаты проведенных исследований вносят значимый вклад в понимание эволюции эко- и геосистем Внутренней Азии в позднем кайнозое.

Так, первые результаты исследования изотопного состава атмосферных осадков Байкальского региона, отобранных в г. Иркутске в период с июня 2011 г. по октябрь 2013 г. и с декабря 2014 г. по апрель 2017 г. позволили выявить четкие сезонные колебания значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD , вызванные преимущественно изменением температуры воздуха. Впервые проведенный анализ траекторий и изотопных данных показал, что атмосферные осадки с самыми низкими средними значениями $\delta^{18}\text{O}$ и δD ($-34,1\text{‰}$ и $-269,1\text{‰}$; $d = +5,3\text{‰}$) поступают в Иркутск зимой с севера, с акватории Северного Ледовитого океана. Тогда как атмосферные осадки, имеющие самый тяжелый изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -6,9\text{‰}$; $\delta\text{D} = -59,2\text{‰}$; $d = -4,1\text{‰}$), поступают летом с запада/юго-запада и имеют происхождение из вторичного источника влаги, расположенного на континенте. Определение основных траекторий движения воздушных масс, приносящих осадки в регион в течение года, станет основой реконструкций и моделирования траекторий движения влагонесущих масс в прошлом для понимания современного состояния регионального атмосферного переноса.

Впервые реализованное бурение и последующее комплексное исследование донных отложений озер Восточно-Саянской горной провинции на юге Восточной Сибири позволило получить первые записи физических, петромагнитных, гранулометрических свойств отложений озера Хикушка, продуктивности озерной системы. Эти записи стали основой первых реконструкций гидродинамического режима озера Хикушка и его бассейна при переходе от последнего ледникового периода к голоцену и в самом голоцене, что позволило выявить реакцию озерных геосистем юга Восточно-Саянской горной провинции на изменения природной среды в это время.

Первые реконструкции геохимической эволюции котловины оз. Хикушка показали высокий потенциал геохимических записей как показателей эволюции природной среды озер Окинского плато в позднеледниковое время и в голоцене. Установлено, что индекс интенсивности химического выветривания CWI отражает чередование этапов разной увлажненности и теплообеспечения в котловинах и бассейнах озер. Установлено, что геосистема оз. Хикушка после таяния локального ледника развивалась постепенно, следуя общему региональному/глобальному тренду эволюции природной среды.

Полученная первая, наиболее полная на сегодняшний день запись вулканической активности в долине р. Жом-Болок является самой длительной из известных к настоящему времени надежно датированных последовательностей голоценовых извержений в северной Азии и объединяет результаты изучения микрочастиц тефры, физических и химических

свойств донных отложений и их ^{14}C датирование. Разработанная шкала может рассматриваться в качестве основы для межрегиональных корреляций вулканических событий и их сравнения с известными палеоклиматическими записями для понимания возможного влияния вулканической деятельности на изменения региональной и глобальной климатической системы. Полученная тефрохронологическая запись хорошо согласуется с вулканическими событиями в долине р.Жом-Болок, установленными ранее различными методами и исследователями. Таким образом, впервые показано, что вулканическая активность в долине р.Жом-Болок проявилась в виде двух крупных фаз. Извержения начались около 14300 л.н. и продолжались с небольшими перерывами до 6280 л.н. Последняя фаза извержений началась около са. 1600 BP и, вероятно, не завершилась.

Новые исследования изменчивости во времени содержания полихлорированных бифенилов (ПХБ) и хлорорганических пестицидов (ХОП) в почвах Прибайкалья показали, что концентрация всей суммы ПХБ и ХОП проб почв Байкальского региона изменялась по годам и в зависимости от района исследования. В 2013 годы концентрации ПХБ в почвах г. Усолье-Сибирское, где расположен длительно действовавший источник ПХБ, составляли 84% от концентраций 1997 г., что может свидетельствовать о значительности запасов имеющегося источника. Установлено, что в настоящее время наблюдается тенденция к снижению концентраций ПХБ в почвах южного Байкала и основная причина этого – закрытие в 2013 г. БЦБК. Обнаруженная сезонная изменчивость СОЗ в почвах может быть обусловлена как физико-химическими свойствами СОЗ, так и типом почв и растительности, температурным режимом, количеством твердых и жидких осадков и антропогенными факторами (например, промышленные предприятия – источники СОЗ). Сезонные изменения концентраций СОЗ в почвах необходимо учитывать при проведении мониторинга СОЗ в почвах.

Таким образом, все полученные результаты имеют очевидную научную новизну и вносят весомый вклад в сумму знаний о эволюции природной среды большой территории Внутренней Азии в позднем кайнозое.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. – 1964. – Vol. 16. – p. 436–468.
- 2 Rozanski K., Araguás-Araguás L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation // *Climate Change in Continental Isotope Records*. – American Geophysical Union. – 1993. – p. 1–36.
- 3 Kurita N. Origin of Arctic water vapor during the ice-growth season // *Geophysical Research Letters*. – 2011. – Vol. 38 (L02709).
- 4 Jouzel J., Merlivat L. Deuterium and oxygen-18 in precipitation: modelling of the isotopic effects during snow formation // *Journal of Geophysical Research*. – 1984. – Vol. 89. – p. 11749–11757.
- 5 Kostrova S.S., Meyer H., Chaplugin B., Tarasov P.E., Bezrukova E.V. The last glacial maximum and late glacial environmental and climate dynamics in the Baikal region inferred from an oxygen isotope record of lacustrine diatom silica // *Quaternary International*. – 2014. – Vol. 348. – p. 25–36.
- 6 Fernandoy F., Meyer H., Tonelli M. Stable water isotopes of precipitation and firn cores from the northern Antarctic Peninsula region as a proxy for climate reconstruction // *The Cryosphere*. – 2012. – Vol. 6. – p. 313–330.
- 7 Pang H., Hou S., Kaspari S., Mayewski P.A. Influence of regional precipitation patterns on stable isotopes in ice cores from the central Himalayas // *Cryosphere*. – 2014. – Vol. 8. – p. 289–301.
- 8 Liang F., Brook G.A., Kotlia B.S., Railsback L.B., Hardt B., Cheng H., Edwards R.L., Kandasamy S. Panigarh cave stalagmite evidence of climate change in the Indian Central Himalaya since AD 1256: Monsoon breaks and winter southern jet depressions // *Quaternary Science Reviews*. – 2015. – Vol. 124. – p. 145–161.
- 9 IAEA/WMO. Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. – URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser> (дата обращения 10.07.2018).
- 10 Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) // NOAA Air Resources Laboratory. – Silver Spring. – MD. – 2015.
- 11 Seal R.R., Shanks W.C. Oxygen and hydrogen isotope systematics of Lake Baikal, Siberia: implications for paleoclimate studies // *Limnology and Oceanography*. – 1998. – Vol. 43. – p. 1251–1261.

- 12 Папина Т.С., Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Галанин А.А., Железняк М.Н. Изотопный состав и источники атмосферных осадков в Центральной Якутии // Криосфера Земли. – 2017. – Том XXI, № 2. – с. 60–69.
- 13 Латышева И.В., Синюкович В.Н., Чумакова Е.В. Современные особенности гидрометеорологического режима южного побережья оз. Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2009. – Том 2, № 2. – с. 117–133.
- 14 Марченко О.Ю., Мордвинов В.И., Бережных Т.В. Экстремальная водность р. Селенга и особенности летней циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 10. – с. 81–93.
- 15 Осипова О.П., Осипов Э.Ю. Атмосферные циркуляционные механизмы и их связь с процессами таяния ледников Байкальского хребта // География и природные ресурсы. – 2016. – №5. – с. 15–19.
- 16 Allen J.R.L. and Thornley D.M. Laser granulometry of Holocene estuarine silts: effects of hydrogen peroxide treatment // Holocene. – 2004. – 14(2) . – p.p. 290-295.
- 17 Свальнов В.Н., Алексеева Т.Н. Гранулометрический состав осадков Мирового океана; Рос. акад. наук, Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова. – М.: Наука. – 2005. – 299 с.
- 18 Mikutta, R., Kleber, M., Kaiser, K. and Jahn, R. Review: Organic Matter Removal from Soils using Hydrogen Peroxide, Sodium Hypochlorite, and Disodium Peroxodisulfate // Soil Science Society of America Journal. – 2005. – 69. – p.p.120–135, doi:10.2136/sssaj2005.0120.
- 19 Казанский А.Ю., Безрукова Е.В., Кривоногов С.К., Молодин В.И., Матасова Г.Г., Чемякина М.А., Абзаева А.А., Летунова П.П., Кулагина Н.В. Реконструкция среды обитания древнего человека для комплекса археологических памятников у озера Большая Ложка // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Материалы Годовой сессии Института археологии и этнографии СО РАН 2007 года. – Т. XIII. – с. 249–254.
- 20 Здобин Д.Ю., Соколова Ю.Ю., Бахматова К.А., Свертилов А.А., Матинян Н.Н., Гостинцева Е.В., Семенова Л.К. Методы лабораторного определения содержания органических веществ в грунтах // Инженерная геология. – 2015. – №1. – с.26–36.
- 21 L. Håkanson and M. Jansson: Principles of Lake Sedimentology. – With 187 figs, 320 pp. Berlin–New York.

- 22 Xiao J. L., Chang Z. G., Fan J. W., Zhou L., Zhai D. Y., Wen R. L., Qin X. G. The link between grain-size components and depositional processes in a modern clastic lake // *Sedimentology*. – 2012. – 59(3) . – p. 1050–1062.
- 23 Rasmussen S.O., Bigler M., Blockley S.P., Blunier T., Buchardt S.L., Clausen H.B., Cvijanovic I., Dahl-Jensen D., Johnsen S.J., Fischer H., Gkinis V., Guillevic M., Hoek Z., Lowe J.J., Pedro J.B., Popp T., Seierstad I.K., Steffensen J.P., Svensson A.M., Vallelonga P., Vinther B.M., Walker M.J., Wheatley J.J., Winstrup M. A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy // *Quaternary Science Reviews*. – 2014. – 106. – p. 14–28.
- 24 Mackereth, F.J.H.. Some chemical observations on postglacial lake sediments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. – 1966. – p. 165–213.
- 25 Sun Q.L., Wang S.M., Zhou J., Chen Z.Y., Shen J., Xie X.P., Wu F., Chen P. Sediment geochemistry of Lake Daihai, north-central China, implications for catchments weathering and climate change during the Holocene // *Journal of Paleolimnology*. – 2010. – 43. – p. 75–87.
- 26 Brown E.T., Le Callonnec L., German C.R. Geochemical cycling of redox sensitive metals in sediments from Lake Malawi, a diagnostic paleotracer for episodic changes in mixing depth // *Geochim Cosmochim Acta*. – 2000. – 64. – p. 3515–3523.
- 27 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., Rothlisberger R., Seierstad I., Steffensen J.P., Vinther B.M. A 60 000 year Greenland stratigraphic ice core chronology // *Climate of the Past*. – 2008. – 4. – p. 47–57.
- 28 Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // *Quaternary Science Reviews*. – 1991. – 10 (4) . – p. 297–317.
- 29 Taboada T., Cortizas A.M., Garcia C., Garcia-Rodeja E. Particle-size fractionation of titanium and zirconium during weathering and pedogenesis of granitic rocks in NW Spain // *Geoderma*. – 2006. – 131. – p. 218–236.
- 30 Yang S.Y., Li C.X., Cai J.G. Geochemical compositions of core sediments in eastern China, implication for Late Cenozoic palaeoenvironmental changes // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2006. – 229. – p. 287–302.
- 31 Kylander M.E., Klaminder J., Wohlfarth B., Lowemark L. Geochemical responses to paleoclimatic changes in southern Sweden since the late glacial: the Ha"sseldala Port lake sediment record // *Journal of Paleolimnology*. – 2013. – 50. – p. 57–70.

- 32 Ganyushkin D., Chistyakov K., Volkov I., Bantcev D., Kunaeva E., Brandov D., Raab G., Christl M., Egli M. Palaeoclimate, glacier and treeline reconstruction based on geomorphic evidences in the Mongun-Taiga massif (south-eastern Russian Altai) during the Late Pleistocene and Holocene // *Quaternary International*.– 2018.– 470.– p. 26–37.
- 33 Jiri Kopacek, Josef Hejzlar, Jaroslav Vrba, and Evzen Stuchlik. Phosphorus loading of mountain lakes: Terrestrial export and atmospheric deposition // *Limnology and Oceanography*.– 2011.– 56(4) .– p. 1343–1354.
- 34 Ярмолюк, В. В., Кузьмин, М. И. О взаимодействии эндогенных и экзогенных факторов в новейшей геологической истории юго-западной части Байкальской рифтовой зоны // *Геотектоника*.– 2004.– №3.– с. 55–78.
- 35 Shackleton N.J. Pliocene stable isotope stratigraphy of Site 846 // *Proc. ODP, Sci. Results*. – College Station, TX (Ocean Drilling Program). – 1995.– Vol. 138.– p. 337–355.
- 36 Tani Y., Nara F., Soma Y., Soma M., Itoh N., Matsumoto G.I., Tanaka A., Kawai T. Phytoplankton assemblage in the Plio-Pleistocene record of Lake Baikal as indicated by sedimentary sterol chlorin esters // *Quaternary International*. – 2009. – Т. 205. – №. 1-2. – С. 126-136.
- 37 Prokopenko A.A., Khursevich G.K. Plio-Pleistocene transition in the continental record from Lake Baikal: Diatom biostratigraphy and age model // *Quaternary International*.– 2010.– Vol. 219.– №. 1.– p. 26–36.
- 38 McLennan S.M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*.– 2001.– Vol. 2.– №. 4.
- 39 Кузьмин М.И., Дриль С.И., Сандимиров И.В., Сандимирова Г.П., Гелетий В.Ф., Чуканова В.С., Калмычков Г.В., Бычинский В.А. Вариации изотопного состава SR в осадочном разрезе оз. Байкал // *Доклады Академии наук*.– 2007.– Т. 412.– № 4.– с. 1–5.
- 40 Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее возраст и эволюция – М. : Мир. 1988. – 371 с.
- 41 Roser B.P., Korsch R.J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data // *Chemical geology*.– 1988.– Vol. 67.– №. 1–2.– p. 119–139.

- 42 Цыганков А.А. Позднепалеозойские гранитоиды Западного Забайкалья: последовательность формирования, источники магм, геодинамика // Геология и геофизика.– 2014.– Т. 55.– № 2.– с. 197–227.
- 43 Калмычков Г.В., Егоров А.В., Кузьмин М.И., Хлыстов О.М. Генетические типы метана озера Байкал // Доклады Академии наук.– 2006.– т. 411.– № 5.– с. 672—675.
- 44 Nachikubo A., Khlystov O., Krylov A. et al. Molecular and isotopic characteristics of gas hydrate-bound hydrocarbons in southern and central Lake Baikal // Geo-Marine Letters.– 2010.– V. 30.– № 3-4.– p. 321-329.
- 45 Milkov A.V. Molecular and stable isotope compositions of natural gas hydrates: A revised global dataset and basic interpretations in the context of geological settings // Organic Geochemistry.– 2005.– v 36.– № 5.– p. 681–702.
- 46 James, A.T., Burns, B.J. Microbial alteration of subsurface natural gas accumulations // American Association of Petroleum Geologists Bulletin.– 1984.– v. 68.– p. 957–960.
- 47 Pallasser R.J. Recognising biodegradation in gas/oil accumulations through the $\delta^{13}\text{C}$ compositions of gas components // Organic Geochemistry.– 2000.– v. 31.– p. 1363–1373.
- 48 Nachikubo A., Yanagawa K., Tomaru H. et al. Molecular and Isotopic Composition of Volatiles in Gas Hydrates and in Sediment from the Joetsu Basin, Eastern Margin of the Japan Sea // Energies.– 2015.– V. 8.– № 6.– p. 4647–4666.
- 49 Sassen R., MacDonald I.R. Hydrocarbons of experimental and natural gas hydrates, Gulf of Mexico continental slope // Organic Geochemistry.– 1997.– v. 26.– № 3-4.– p. 289 – 293.
- 50 Калмычков Г. В., Покровский Б. Г., Хачикубо А., Хлыстов О. М. Геохимические характеристики метана из осадков подводной возвышенности Посольская банка // Литология и полезные ископаемые.– 2017.– № 2.– с. 121–129.
- 51 Wania F., Mackay D. Tracking the distribution of persistent organic pollutants // Environmental Science and Technology.– 1996.– vol. 30.– p. 390A–396A.
- 52 AMAP assessment 2002: Persistent organic pollutants in the Arctic. Norway, Oslo: Arctic monitoring assessment program.– 2004.– 309 p.
- 53 Атлас Иркутской области. Главное управление геодезии и картографии Министерства геологии и охраны недр СССР: Москва-Иркутск.– 1962. – 182 с.

- 54 Полихлорированные бифенилы (ПХБ) в Байкальском регионе: источники, дальний перенос и оценка риска (результаты гранта INTAS 2000-00140) / Отв. ред М.И. Кузьмин. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2005. – 52 с.
- 55 Mamontov A.A., Mamontova E.A., Tarasova E.N., Kuzmin M.I., McLachlan M.S. Persistent organic pollutants in soil and snow from the Lake Baikal Region, Russia // *Organohalogen Compounds*. – 2004. – Vol. 66. – P. 1327–1332.
- 56 Finizio A., Villa S., Raffaele F., Vighi M. Variation of POP concentrations in fresh-fallen snow and air on an Alpine glacier (Monte Rosa) // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2006. – Vol. 63. – Issue 1. – p. 25–32.
- 57 Franz T.P., Eisenreich S.J. Snow scavenging of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in Minnesota // *Environmental Science and Technology*. – 1998. – Vol. 32(12). – p. 1771–1778.
- 58 Wania F., McLachlan M.S. Estimating the influence of forests on the overall fate of semivolatile organic compounds using a multimedia fate model. – *Environmental Science and Technology*. – 2001. – vol. 35. – p. 582–590.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций 2019 г. по теме исследований

Статьи

- 1 Мамонтова Е.А., Тарасова Е.Н., Мамонтов А.А., Горегляд А.В., Ткаченко Л.Л. Изменение концентрации полихлорированных бифенилов и хлорорганических пестицидов в атмосферном воздухе на северном побережье озера Хубсугул в 2008-2015 гг. // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 1. – С. 113-123.
- 2 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.
- 3 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.– V. 144.– p. 118-123.
- 4 Г.В. Калмычков, А.В. Егоров, А. Хачикубо, О.М. Хлыстов Углеводородные газы подводного нефтегазового проявления Горевой утес (оз. Байкал, Росстя) // Геология и геофизика. – 2019.– т. 60.– № 10.– с. 1488-1495.
- 5 Kostrova S.S., Meyer H., Bailey H.L., Ludikova A.V., Gromig R., Kuhn G., Shibaev Y.A., Kozachek A.V., Ekaykin A.A., Chaplignin B. Holocene hydrological variability of Lake Ladoga, northwest Russia, as inferred from diatom oxygen isotopes // Boreas. – 2019. – V. 48. – № 2. – p. 361-376.
- 6 Tarasov P.E., Pyashuk B.P., Leipe C., Müller S., Plessen B., Hoelzmann P., Kostrova S.S., Bezrukova E.V., Meyer H. Insight into the Last Glacial Maximum climate and environments of the Baikal region // Boreas. – 2019. – V. 48. – № 2. – p. 488-506.
- 7 Kostrova S.S., Meyer H., Fernandoy F., Werner M., Tarasov P.E. Moisture origin and stable isotope characteristics of precipitation in southeast Siberia. Hydrological Processes.– 2019. – DOI: 10.1002/hyp.13571.
- 8 Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Krivonogov S.K. Late Glacial to Holocene volcanism of Jom-Bolok Valley (East Sayan Mountains, Siberia) recorded by microtephra layers of the Lake Kaskadnoe-1 sediments // Journal of Asian Earth Sciences.– 2019.– 173 (4) .– p. 291–303.
- 9 Shchetnikov A.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.– 29(11) .– p. 1823-1840.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Конференции, на которых были представлены результаты исследований

- 1 Амосова А.А., Чубаров В.М., Пашкова Г.В. Рентгенофлуоресцентный анализ торфяных отложений для палеоклиматических исследований // ЭКОАНАЛИТИКА-2019: тезисы докладов XI Всероссийской конференции по анализу объектов окружающей среды с международным участием (Пермь, 27 мая – 01 июня 2019 г.). – с. 18.
- 2 Амосова А.А., Чубаров В.М., Пашкова Г.В. Рентгенофлуоресцентный анализ торфяных отложений для палеоклиматических исследований // III Всероссийская конференция по аналитической спектроскопии с международным участием. Материалы конференции. (Краснодар, 29 сентября – 5 октября 2019 г.) – с. 126.
- 3 Кострова С.С., Тарасов П.Е., Майер Х., Фернандой Ф. Изотопный состав атмосферных осадков Байкальского региона (на примере г. Иркутска). Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы II Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования ИГУ. Иркутск, 5-7 июня 2019 г. // ФГБОУ ВО «ИГУ»; [редкол.: Сутырина Е.Н., Латышева И.В., Вологжина С.Ж.]. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. – стр. 714-722.
- 4 Krainov M.A., Bezrukova E.V., Shchetnikov A.A., Peskov A.Yu.. Evidence for the Existence of the Gothenburg and Mono Lake Excursions Based on Paleomagnetic Data from Baunt Lake Sediments (Northern Transbaikalia) // Chapter 5 in book Recent Advances in Rock Magnetism, Environmental Magnetism and Paleomagnetism. International Conference on Geomagnetism, Paleomagnetism and Rock Magnetism (Kazan, Russia). Editors: Nurgaliev, D., Shcherbakov, V., Kostero, A., Spassov, S. (Eds.). – 2019. – pp. 55-65. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-90437-5_5
- 5 Безрукова Е.В., Кулагина Н.В., Амосова А.А., Летунова П.П., Крайнов М.А., Левина О.В., Ткаченко Л.Л., Кербер Е.В., Щетников А.А., Волчатова Е.В., Филинов И.А.. Ландшафтно-климатические условия Жомболокского вулканического района (Восточный Саян, Сибирь) в позднеледниковье и голоцене: результаты комплексного изучения донных отложений озер // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса. От океана к континенту. Материалы совещания. ВЫПУСК 17. – Иркутск. – 2019. – с.23–24.

- 6 Bezrukova E.V., Kulagina N.V., Amosova A.A., Aisueva T.S., Letunova P.P., Levina O.V., Kraynov M.A., Kerber E.V., Tkachenko L.L., Volchatova E.V., Shchetnikov A.A., Ivanov E.V., Filinov I.A. Landscapes and climate of Eastern Sayan since the end of the last glaciation. – Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы. Материалы симпозиума, посвященного 90-летию Н.А. Логачева, Иркутск, 14-15 октября 2019.– с. 38-39.
- 7 Безрукова Е.В., Кулагина Н.В., Летунова П.П., Амосова А.А., Левина О.В., Крайнов М.А., Ткаченко Л.Л., Щетников А.А., Кербер Е.В., Волчатова Е.В., Филинов И.А. Растительность и климат Жомболокского вулканического района (Восточный Саян, Сибирь) в голоцене: результаты комплексного изучения донных отложений озер.– Материалы V Всероссийской конференции с международным участием «Динамика экосистем в голоцене» (к 100-летию Л. Г. Динесмана).– Москва.– 11–15 ноября 2019 г.– Медиа-ПРЕСС.– с. 39-41.
- 8 Крайнов М.А., Безрукова Е.В., Щетников А.А., Кулагина Н.В., Филинов И.А., Левина О.В., Кербер Е.В., Летунова П.П., Иванов Е.В., Ткаченко Л.Л. Реакция озерных геосистем юга Восточной Сибири на изменения природной среды в голоцене.– Материалы V Всероссийской конференции с международным участием «Динамика экосистем в голоцене» (к 100-летию Л. Г. Динесмана).– Москва.– 11–15 ноября 2019 г.– Медиа-ПРЕСС.– с. 159-162.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

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

индикатор	Ед. измерения	Всего
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	единиц	8
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	единиц	7
Количество монографий (глав в монографиях)	единиц	-
Количество публикаций в сборниках конференций	единиц	2
Число тезисов в конференциях	единиц	6