

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

УДК 550.4:552.57/.58)  
Reg № НИОКТР АААА-А17-  
117041910028-4  
Инв. № \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИГХ СО РАН,  
д. г.-м.н.  
\_\_\_\_\_ А.Б.Перепелов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

Эволюция экосистем Внутренней Азии в позднем кайнозое – экологические  
сценарии (заключительный)  
№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 темы  
доктор географических наук

\_\_\_\_\_ Е.В. Безрукова  
(подпись, дата)

Иркутск, 2020



## РЕФЕРАТ

Отчет 115 с., 1 кн., 66 рис., 81 источник, 2 прил.

### ЭВОЛЮЦИЯ ЭКОСИСТЕМ ВНУТРЕННЕЙ АЗИИ В ПОЗДНЕМ КАЙНОЗОЕ – ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СЦЕНАРИЙ

Ключевые слова: НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА, ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Объектами исследования были донные отложения озер Восточной Сибири, Полярного Урала, субаэральные разрезы Забайкалья, современные почвы, снега, воды, воздуха.

Цель исследований – реконструкция пространственно-временной эволюции региональных изменений природной среды внутриконтинентальной территории России 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, тефрохронология, биогеохимические циклы.

Проведено комплексное изучение кернов донных отложений из озер, болот, склонового ряда на юге Восточной Сибири методами абсолютной геохронологии, рентгенофлуоресцентного, палеомагнитного, палинологического, литологического анализов. Показана перспективность использования результатов гранулометрического состава, петрохимических характеристик, магнитных свойств донных отложений озер для комплексных реконструкций палеоэкологических условий седиментогенеза. Разработана первая тефрохронологическая шкала последних 15 тысяч лет для Окинского плато. Впервые показана высокая перспективность изучения изотопного состава атмосферных осадков в регионе для понимания перестроек глобальной/региональной атмосферной циркуляции.

Исследовано пространственно-временное изменение содержания полихлорированных бифенилов и хлорорганических пестицидов в природных средах Сибири и Монголии. 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 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.....	10
Основная часть.....	11
1 Эволюция озерных геосистем в позднем плейстоцене – голоцене .....	11
1.1 Реконструкция растительности и климата юга Восточной Сибири в позднем плейстоцене – голоцене.....	11
1.2 Динамика процессов выветривания в Восточном Саяне в последние 14 тысяч лет.....	14
1.3 Природная среда бассейна оз. Ильчир (исток р. Иркут) в раннем-позднем голоцене.....	18
2 Исследование изотопного состава кислорода створок диатомовых водорослей из донных отложений озер центральной и северной Евразии.....	24
3 Разработка способа рентгенофлуоресцентного определения основных породообразующих элементов в донных отложениях озер из малых навесок и применение его для реконструкции геохимической эволюции озер юга Восточной Сибири.....	32
4 Результаты изучения донных отложений озер юга Восточной Сибири методами палеомагнитного, петромагнитного и гранулометрического анализов.....	40
4.1 Обнаружение палеомагнитных экскурсов Гётеборг и Моно Лейк в осадочных отложениях оз. Баунт.....	40
4.2 Реконструкция природной среды позднеледникового времени и голоцена на основе комплексного изучения осадков оз. Енгаргинское и оз. Хикушка.....	40
5 Тефрохронологическое изучение позднеледниковых вулканических извержений в долине р. Жом-Болок (Восточный Саян).....	51
6 Комплексные исследования опорного разреза верхнего кайнозоя Тологой (Западное Забайкалье).....	55
7 Изучение компонентного состава газа и изотопного состава углерода метана подводного нефтегазового проявления Горевой утес (оз. Байкал).....	63
8 Исследование значения атмосферного транспорта на формирование количественного и качественного состава органического вещества природного происхождения, стойких органических загрязнителей и хлорорганических пестицидов в Байкальской рифтовой зоне.....	65

9 Геохимические и изотопно-геохимические записи из отложений оз. Байкал как индикаторы природной среды в позднем кайнозое.....	81
Заключение.....	102
Список использованных источников.....	104
Приложение А. Список публикаций 2020 г. по теме исследований.....	113
Приложение Б. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в соответствии с государственным заданием.....	115

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчёте о НИР используются следующие сокращения и обозначения.

А – ампер

абс. – абсолютный

АВ – атмосферный воздух

АМ – алюмокремниевый модуль

Б. – Большой

БЦБК – Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат

В. – Восточный

в.д. – восточная долгота

в т.ч. – в том числе

выс. – высота

г – грамм

г. – год

гг. – года

ГМ – гидролизатный модуль

гор. – город

гПа – гектапаскаль

ГХБ – гексахлорбензол

ГХЦГ – гексахлорциклогексан

ДДД – дихлордифенилдихлорэтан

ДДТ – дихлордифенилтрихлорэтан

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

др. – другие

ед. – единица

зал. – залив

и т.д. – и так далее

ИТС – индекс трофического статуса

кал. – калиброванный

кв. – квадратный

км – километр

КМ – калиевый модуль

л. – лет  
л.н. – лет назад  
м – метр  
мА – миллиампер  
МВ – магнитная восприимчивость  
мг – миллиграмм  
МД – медианный диаметр  
мес. – месяц  
мкм – микрометр  
мм – миллиметр  
мТл – миллитесла  
напр. – например  
нг – нанограмм  
НКМ – модуль нормированной щелочности  
НМ – натриевый модуль  
н.у.м. – над уровнем моря  
о. – остров  
об/мин – обороты в минуту  
ОВ – органическое вещество  
оз. – озеро  
ок. – около  
ООВ – общее органическое вещество  
ООН – Организация Объединенных Наций  
ПО – плотность осадка  
пос. – поселок  
ППП – потери при прокаливании  
ПХБ – полихлорированные бифенилы  
р. – река  
РЗЭ – редкоземельные элементы  
р-н – район  
РФА – рентгенофлуоресцентный метод анализа  
см – сантиметр  
см. – смотри  
СПС – спорово-пыльцевые спектры



СОЗ – стойкий органический загрязнитель  
с.ш. – северная широта  
т.е. – то есть  
ТМ – титановый модуль  
тыс. – тысяча  
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль  
УВГ – углеводородные газы  
УМС – ускорительная масс-спектрометрия  
ХБ – хлорированные бифенилы  
ХОС – хлорорганические соединения  
ХОП – хлорорганические пестициды  
ЩМ – щелочной модуль  
ЮНЕП – Программа ООН по окружающей среде  
АР – arboreal pollen  
ARM – безгистерезисная остаточная намагниченность  
ChRM – характеристическая остаточная намагниченность  
CIA – индекс химического изменения пород  
CIW – chemical index of weathering  
CPA – chemical proxy of alteration  
CWI – интенсивность химического выветривания  
ICV – индекс изменения состава  
LCC – низкокоэрцитивный компонент  
MIS – marine isotope stage  
NAP – non arboreal pollen  
NRM – естественная остаточная намагниченность  
NGRIP – North Greenland Ice Core Project  
PIA – plagioclase index of alteration  
SFI – steppe-forest index  
SIRM – остаточная намагниченность насыщения  
TIC – total inorganic carbon  
TOC – total organic carbon  
к – магнитная восприимчивость

## 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 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 тефрохронологических 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 пространственно-временных изменений содержания полихлорированных бифенилов и хлорорганических пестицидов в природных средах Сибири и Монголии.

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

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1 Эволюция озерных геосистем Восточной Сибири в позднем плейстоцене – голоцене

#### 1.1 Реконструкция растительности и климата юга Восточной Сибири в позднем плейстоцене – голоцене

Донные отложения сравнительно небольших озер в мире рассматриваются как ценнейшие природные архивы. Осадки оз. Арахлей уже позволили реконструировать природную среду Беклемишевской котловины за последние 13 тыс. лет [1]. Однако для новой, более детальной палеоэкологической модели развития растительности и климата в Беклемишевской котловине на основе дополнительных радиоуглеродных датировок для донных отложений оз. Арахлей был изучен новый керн.

Озеро Арахлей является самым крупным и глубоким в системе Ивано-Арахлейских озёр (рисунок 1.1.1). Оно располагается на высоте 965 м н.у.м. в Беклемишевской котловине. Максимальная глубина озера достигает 17 м, площадь зеркала озера составляет 58 кв. км. Климат в бассейне оз. Арахлей резко континентальный, со среднегодовой суммой атмосферных осадков около 350 мм. В растительности преобладают горно-таёжные леса из лиственницы Гмелина *Larix gmelinii*, редко – с примесью ели *Picea obovata*. Небольшие площади заняты сосновыми *Pinus sylvestris* и берёзовыми *Betula sect. Albae* лесами с лиственницей. По берегам озера распространены мезоксерофильные степи и лугово-болотная растительность. Ивово-ерниковые из *Salix sp.* и *Betula middendorffii* ассоциации обычны для пологих склонов и речных русел [2].

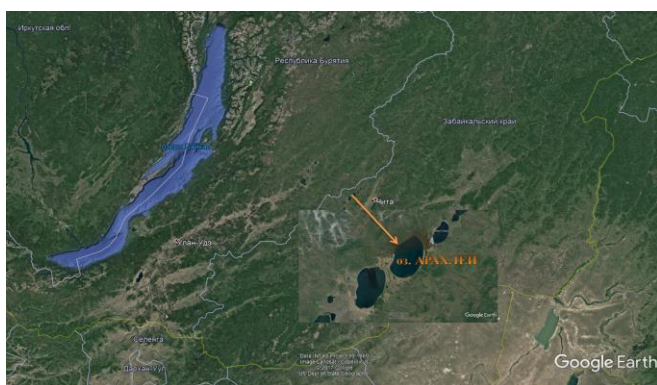


Рис. 1.1.1 – Место положения озера Арахлей в системе Ивано-Арахлейских озёр

Керн озёрных отложений длиной 128 см был отобран в северо-восточной части озера. Верхние 110 см осадка в керне представлены глинисто-органогенными илами

черно-зеленого цвета, нижние 18 см – плотной глиной с органикой светло-коричневого цвета. Для палинологического анализа опробован каждый второй сантиметр отложений в керне. Спорово-пыльцевая диаграмма для отложений оз. Арахлей построена с использованием программы Tilia/Tilia-Graph/TGView [3] (рисунок 1.1.2). Возрастная модель разреза базируется на шести УМС  $^{14}\text{C}$  датах. Датирование отложений выполнено по общему органическому веществу в радиоуглеродной лаборатории гор. Познань, Польша. В тексте все возрастные оценки приведены в калиброванном летоисчислении.

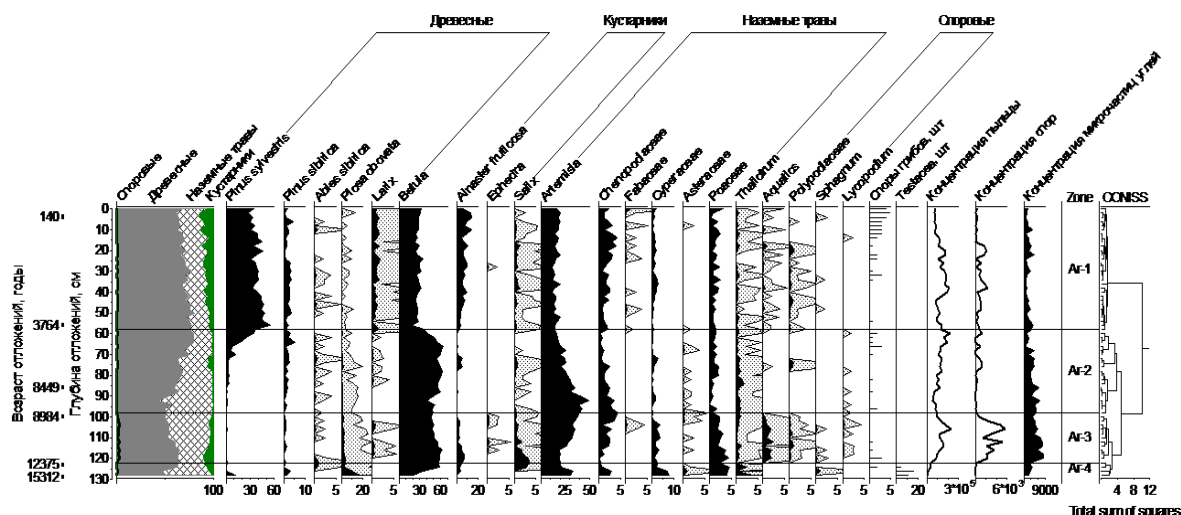


Рис. 1.1.2 – Спорово-пыльцевая диаграмма отложений оз. Арахлей

Содержание общего органического углерода ТОС и общего неорганического углерода ТИС измерено для каждого сантиметра отложений (рисунок 1.1.3). Результаты датирования показали, что возраст отложений в керне изменяется от почти современного до 15500 лет.

Новая комплексная запись из донных отложений оз. Арахлей отражает эволюцию природной среды в Беклемишевской котловине за последние почти 15500 лет, что соответствует части позднеледникового времени и всему голоцену.

Состав СПС зоны Ar-4, створки панцирных амёб показывают более низкий, чем современный, уровень озера ~15500-12500 л.н., и более близкое нахождение точки бурения керна к береговой линии озера. Резкая смена значений ТИС, скорее всего, соответствует возросшему образованию кальцита в летнее время, когда пониженный объем воды в озере прогревался сильнее. Сравнение изменений природной среды в Беклемишевской котловине с европейскими записями позволяет соотнести интервал ~15500-12500 л.н. с кратковременными колебаниями климата от GS-2a до GS-1 [4], что

согласуется и с ранее полученным палеоботаническим записями из Байкальского региона [5, 6].

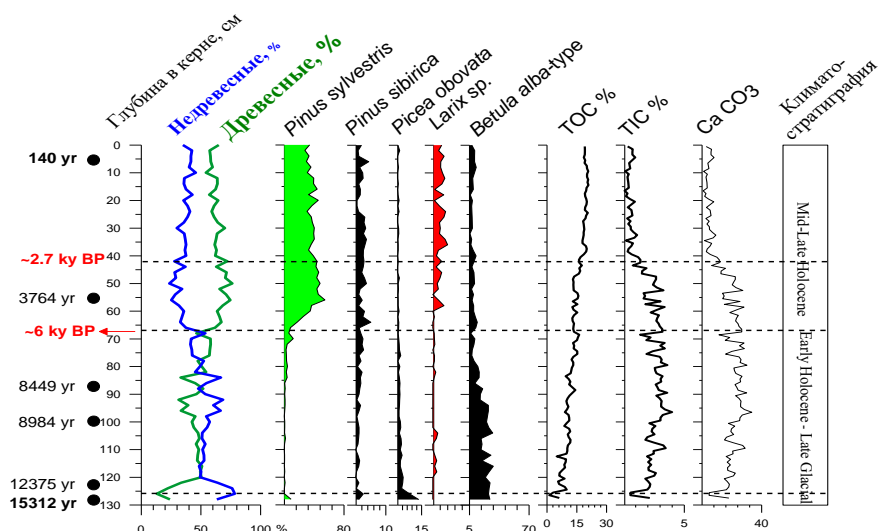


Рис. 1.1.3 – Обобщающая диаграмма избранных палинологических и геохимических показателей изменения природной среды бассейна оз. Арахлей. Слева от шкалы глубин в керне черными кружками показаны датированные уровни в керне донных отложений озера. Значения возраста выражены в калиброванных годах

Позднее, около 12500-8800 л.н., состав СПС свидетельствует о менее благоприятном для произрастания ели климате, который, однако, способствовал медленному расширению в регионе лесной растительности с участием сосны сибирской *Pinus sibirica* и обыкновенной.

Березовые и разнотравно-полынные ассоциации продолжали доминировать в бассейне оз. Арахлей ~8800-4000 л.н. Однако, примерно с 6000 л.н. начинают быстро распространяться леса с сосной. Очевидно, что летние сезоны стали более теплыми и продолжительными, что обеспечивало глубокое протаивание многолетнемерзлых пород и широкое развитие сухих и теплых мест обитания для лесных ландшафтов с сосной обыкновенной. Распространение сосны обыкновенной на огромной территории бассейна оз. Байкал 7000–6000 л. н. рассматривается как важнейший региональный палеоэкологический рубеж голоцена [5, 6].

Позднее 4000 л.н. леса из *Larix* и кустарниковые ассоциации стали важнейшим элементом региональных и локальных ландшафтов. Проведенные исследования показали, что, новая запись эволюции природной среды и климата Беклемишевской котловины однозначно указывает на высокую чувствительность региональных ландшафтной к климатическим изменениям, подчеркивая, что современное глобальное потепление может

вызвать резкую реорганизацию наземных и аквальных экосистем в ближайшем будущем, создавая тем социально-экономические проблемы в регионе, например, с дефицитом питьевой воды.

### ***1.2 Динамика процессов выветривания в высокогорной зоне Восточного Саяна в последние 14 тысяч лет***

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. 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).

Методом РФА исследован керн из донных отложений оз. Хикушка (рисунок 1.2.1). Возрастная модель для отложений озера построена с использованием пяти УМС  $^{14}\text{C}$  датировок методом интерполяции средних значений возраста между датированными горизонтами. Далее в тексте используются только калиброванные значения возраста.

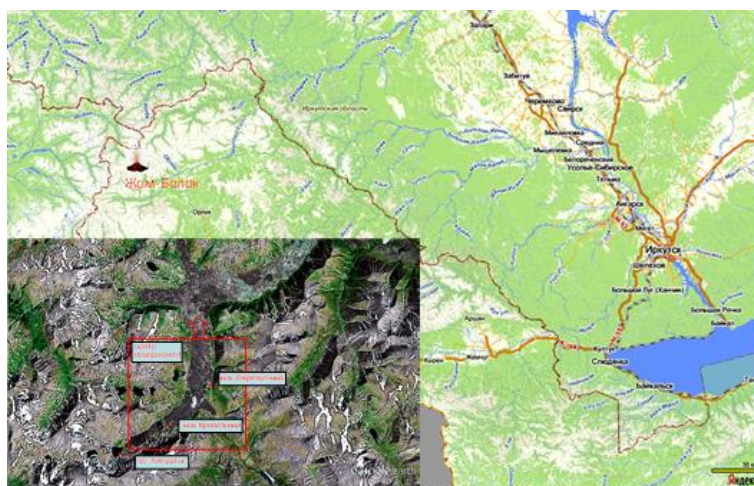


Рис. 1.2.1 – Местоположение оз. Хикушка в пределах Жомболокского вулканического района, Восточный Саян

Изменение элементного состава в отложениях озера показаны на рисунках 1.2.2 и 1.2.3. Мы нормировали элементы к Al, который является наименее растворимым (как в кислородных, так и в бескислородных условиях) и широко распространенным элементом [7] для оценки относительного химического растворения и миграции относительно Al.



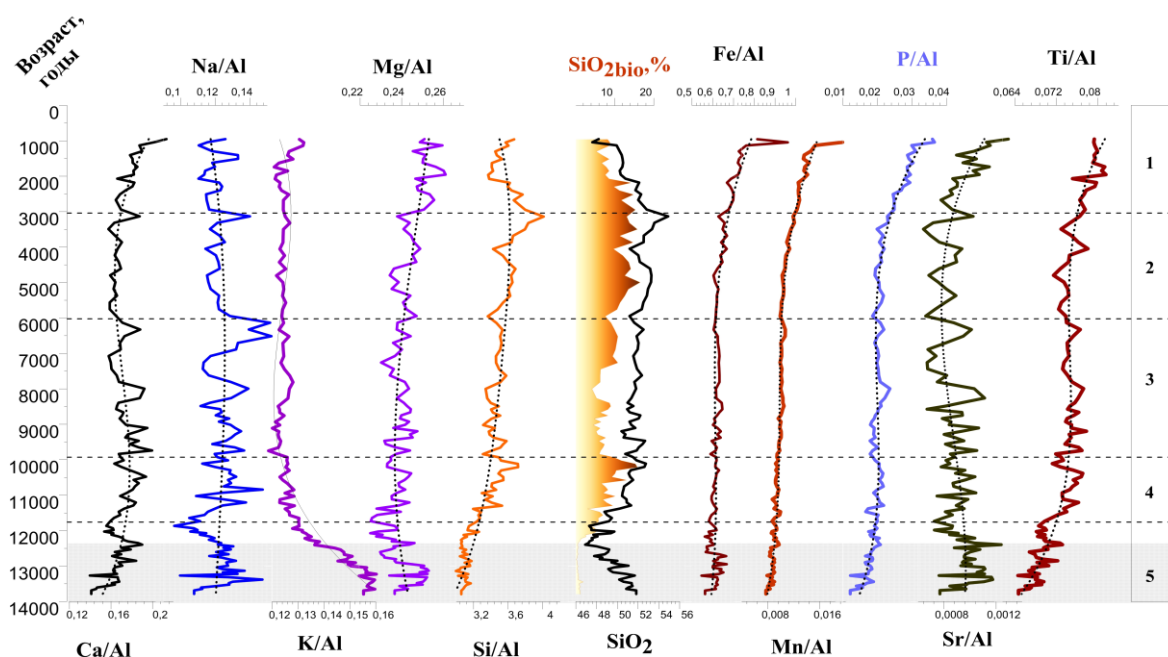


Рисунок 1.2.2 – Обобщающий график изменчивости отношений элементов в разрезе донных отложений оз. Хикушка

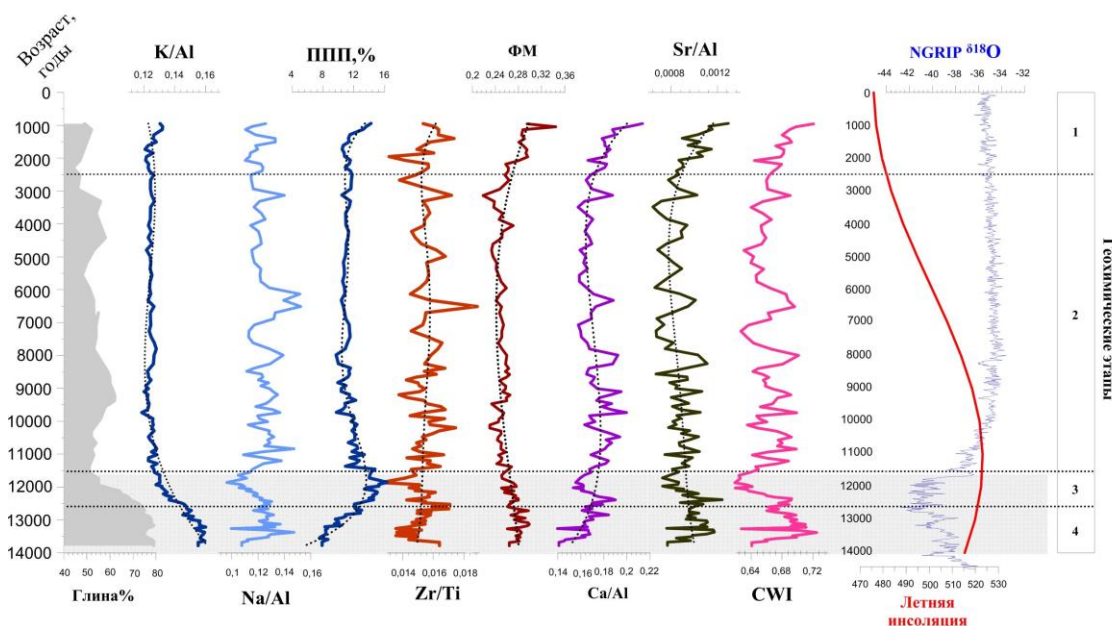


Рисунок 1.2.3 – Сравнение избранных геохимических записей в разрезе донных отложений оз. Хикушка с изменением  $\delta^{18}\text{O}$  из кернов Гренландского ледника как показателем температуры воздуха северного полушария [9] и поступлением летней инсоляции на широты юга Сибири за соответствующий временной интервал [10]

Нормирование может также исправить проблему эффекта переменного разбавления в элементных записях из-за поступления общего органического углерода. 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 подвижных элементов, попадающих в озеро в результате более активного химического выветривания и наоборот.

Для понимания возможных причин геохимической эволюции бассейна оз. Хикушка мы сравнили некоторые геохимические записи из донных отложений озера с ключевыми записями изменения природной среды северного полушария. Изменения геохимических показателей из отложений озера позволили выделить пять этапов в истории его бассейна.

Результаты показали, что ранее ~13800–12800 л.н. (этап 4) 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 характерны повышенные значения  $K/Al$  (рисунок 1.2.3). Значения  $CWI$  в этой зоне высокие, что должно означать активное химическое выветривание в бассейне озера. Поскольку время формирования отложений этапа 4 соответствует кратковременному глобальному потеплению (рисунок 1.2.3, NGRIP  $\delta^{18}O$ ), то улучшение климата этого интервала в бассейне оз. Хикушка логично рассматривать как ответ локальной озерной геосистемы на быстрые изменения глобального климата в интерстадиал позднеледникового времени. Возможно, что теплые летние сезоны обеспечивали быструю деградацию ледника, высокую эрозию в бассейне озера, приводившую к аккумуляции тонких глин и соответствующих им минеральных, преимущественно силикатных, элементов. Высокий коэффициент корреляции между  $Si/Al$  и  $CWI$  ( $r^2=0.99$ ) поддерживает вывод об усилении интенсивности химического выветривания.

Значения  $CWI$  снижаются 12800–11500 л.н., а значения ППП (550 °C), наоборот, повышаются (рисунок 1.2.3). Для этого интервала времени, соответствующего похолоданию Позднего Дриаса в северо-атлантическом регионе, в Байкальском регионе реконструирована усиливавшаяся сезонность климата [8] с теплыми летними и холодными зимними сезонами [6] и пониженными, по сравнению с предыдущим интервалом, среднегодовой суммой атмосферных осадков. Тогда, возможно, что снизившиеся суммы атмосферных осадков летом не могли обеспечить снос в озеро прежнего объема минерального вещества со склонов, а в условиях теплых летних сезонов развивающийся относительно густая травяно-кустарниковая растительность еще больше ограничивала возможность поступления в озеро минерального вещества, но была источником  $OB$ . Значительно снизившиеся значения  $K/Al$  означают затухание



флювиальной активности впадавших в озеро водотоков, поддерживая предположение о снижении атмосферных осадков и/или исчезновения питавшего озеро локального ледника.

В отложениях, сформированных в этап 4 (ок. 13200–11500 л.н.), 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 гранулометрическими измерениями (здесь не приведены).

Для следующего интервала (11500–2500 л.н., рисунки 1.2.2. и 1.2.3) характерна смена режима седиментации, когда в озере стали накапливаться биогенно-терригенные илы, обогащенные створками диатомовых водорослей. Геохимические индексы показывают начало развития более продуктивного водоема, в котором снижение глинистой составляющей привело к более благоприятным условиям для развития диатомовой флоры ставшего пригодным для продолжающегося снижение поступления в озеро воды (K/Al).

Геохимическая эволюция бассейна и котловины оз. Хикушка ~11500–2500 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 [11].

Повышение значений CWI в этап 2, ~2500–1200 л.н. (рисунок 1.2.3) 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 2500 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. Повышенное содержание P и Ti/Al модуля

в отложениях этапа 2 (рисунок 1.2.2) могло быть следствием эолового переноса с атмосферной пылью в теплые сезоны.

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

### ***1.3 Природная среда бассейна озера Ильчир (исток р. Иркут) в раннем-позднем голоцене***

Целью исследований 2020 года была реконструкция экологической эволюции котловины и водосборного бассейна оз. Ильчир. Для этого была реализована задача проведения палинологического изучения донных отложений озера.

Район исследования приурочен к Ильчирскому грабену на границе Окинского плато и Тункинских Гольцов (рисунок 1.3.1).

Ильчирский грабен со всех сторон окружен высокими хребтами, что обуславливает особый тип климатического режима [12]. Климат характеризуется средней июльской температурой  $+11^{\circ}\text{C}$  и средней январской температурой  $-26^{\circ}\text{C}$ . Минимальные температуры часто опускаются ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ , а максимальные летние температуры могут превышать  $25^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовая температура не превышает  $-6,6^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовое количество осадков составляет около 400 мм, из которых только 10% выпадает в холодное время года с октября по март. С октября по июнь озеро покрыто льдом [13].

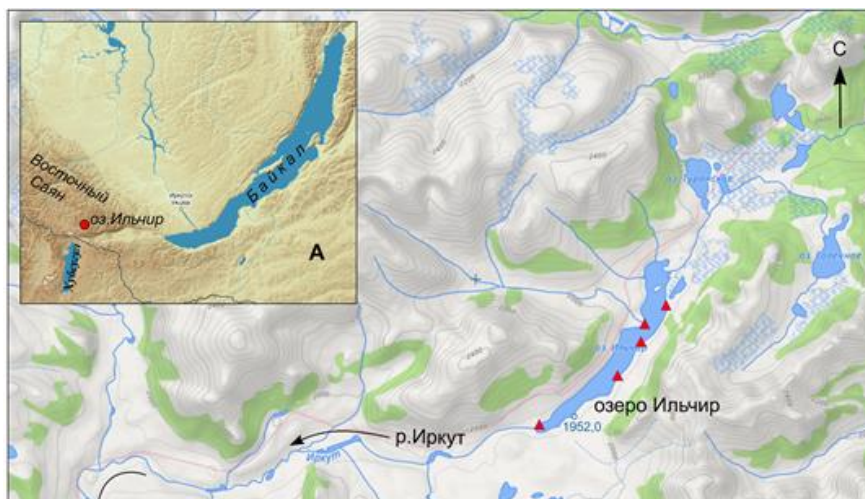


Рисунок 1.3.1 – Местонахождение озера Ильчир

Современная растительность в горах Восточного Саяна имеет четкое высотное зонирование. Деревья *Abies sibirica* (пихта), *Picea obovata* (ель) и *Pinus sibirica* (сосна сибирская) доминируют на высотах ниже 1000 м над уровнем моря. *P. sibirica* и лиственница *Larix sibirica* преобладают в интервале высот 1000 и 1800/2000 м. Кустарники, в том числе виды кустарниковой березки *Betula sect. Nanae*, ольхи кустарниковой *Duschekia fruticosa* и Ericales распространены в нижнем ярусе темнохвойных лесов и в субальпийском поясе над линией деревьев. Леса из *Pinus sylvestris* (сосна обыкновенная) занимают более теплые и сухие места обитания в восточной части Саян на низких высотных уровнях и на предгорных равнинах.

В растительности котловины озера Ильчир преобладают редкие лиственницы (рисунок 1.3.2) с подлеском из кустарниковой березки, наземным покровом из лишайников рода *Cladonia* и сфагновых мхов рода *Sphagnum*. Участки мохово-лишайниковой тундры чередуются с пятнами осоково-злаковых и кобрезиевых травяных лугов в понижениях рельефа.

Донные отложения озера Ильчир были пробурены в 2013 году, длина керна составила 132 см. Для целей палинологического анализа был опробован каждый второй сантиметр, что в сумме составило 67 образцов. Одновременно в этих же препаратах проводился и подсчет общего количества частиц угля. Подсчет микрочастиц углей полезен в любом случае, поскольку позволяет косвенно судить о возникновении или отсутствии пожарных явлений в исследуемом регионе/районе, независимо от размеров бассейна озера. На пыльцевых слайдах нами были определены и устья хвойных

древесных растений, нахождение которых является полезным методом для реконструкции истории растительности [14].



Рисунок 1.3.2 – Вид котловины озера Ильчир с запада, фото авторов

Возраст отложений в керне определен методом радиоуглеродного датирования с применением ускорительной масс-спектрометрии (УМС  $^{14}\text{C}$ ) в Познаньской радиоуглеродной лаборатории (Польша) и в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН). Всего получено пять дат. В тексте все значения возраста приводятся в калиброванном летоисчислении.

Используя полученную палинологическую запись, мы рассчитали некоторые пыльцевые индексы, характеризующие изменение климата исследуемого района. Так, соотношение пыльцы темнохвойных и светлохвойных древесных растений, имеющих различные требования к эколого-эдафическим и климатическим факторам [15], может служить качественным показателем относительной изменчивости континентальности климата (относительного увлажнения и контрастности средних температур летнего и зимнего сезонов). В группу пыльцы светлохвойных древесных включена пыльца *Pinus sylvestris* и *Larix*, а в группу пыльцы темнохвойных древесных - пыльца *Pinus sibirica*, *Abies sibirica*, *Picea obovata*. Отношение суммы пыльцы древесных растений (AP) к сумме пыльце кустарников и трав (NAP) характеризуют относительную лесопокрытость территории. Степь/лес индекс (SFI) отражает взаимоотношение между лесными и степными таксонами - индикаторами изменения уровня общего увлажнения [16]. Повышенные значения SFI соотносятся с повышенной засушливостью/аридностью климата и наоборот.

Результаты датирования показали, что возраст отложений в основании керна из озера Ильчир составляет около 8500 лет.

Известно, что пыльца лиственницы слабо представлена в поверхностных (современных) пыльцевых спектрах [17]. В современных СПС, взятых из илов у уреза воды в озере, среднее значение пыльцы лиственницы составляет 4%, формируя локальный компонент пыльцевого дождя. Это значение мы принимаем за пороговое, указывающее на ее произрастание в котловине озера Ильчир в виде островков, как в настоящее время (рисунок 1.3.2).

Пыльца пихты и ели также не разносится на значительные расстояния, и большая ее часть оседает у стены продуцирующих их древостоев. В составе современной растительности вокруг озера Ильчир пихта и ель не произрастают. Следовательно, в современных СПС района эти значения отражают региональный компонент пыльцевого дождя. Известно, что поверхностные СПС открытых ландшафтов, таких как лесотундра, тундра, степь содержат пыльцевые зерна из вне-региональных источников [18]. Особенно много в СПС из открытых ландшафтов пыльцы ветроопыляемых древесных растений, таких как сосна сибирская и обыкновенная и береза древовидная. В котловине озера Ильчир в настоящее время этих древесных таксонов нет. Следовательно, пыльца обеих сосен и березы также может быть отнесена к заносному компоненту СПС. Присутствие в поверхностных отложениях устьиц лиственницы характеризует ее присутствие вблизи береговой линии озера.

Результаты пыльцевого анализа донных отложений озера Ильчир суммированы на спорово-пыльцевой диаграмме (рисунок 1.3.3).

Полученная нами первая детальная пыльцевая запись из оз. Ильчир позволяет реконструировать историю растительности и природно-климатических условий водосборного бассейна озера за последние почти 8500 лет. Согласно формальному подразделению голоценовой эпохи [19] последние 8500 лет включают в себя финал гренландской эпохи, а также северо-гриппианскую и мегалайскую эпохи.

Состав СПС, повышенные значения AP/NAP и пониженные SFI свидетельствует о значительном участии лесной растительности в бассейне оз. Ильчир в финале гренландской и в первой половине северо-гриппианской эпохи, ок. 8490 - 6000 л.н (рисунок 1.3.4).

Согласно нашей записи для этого времени было характерно самое широкое развитие в лесном поясе Восточного Саяна кедровых лесов с участием пихты, лиственницы, сосны и березы. Повышенное содержание пыльцы сосны обыкновенной в

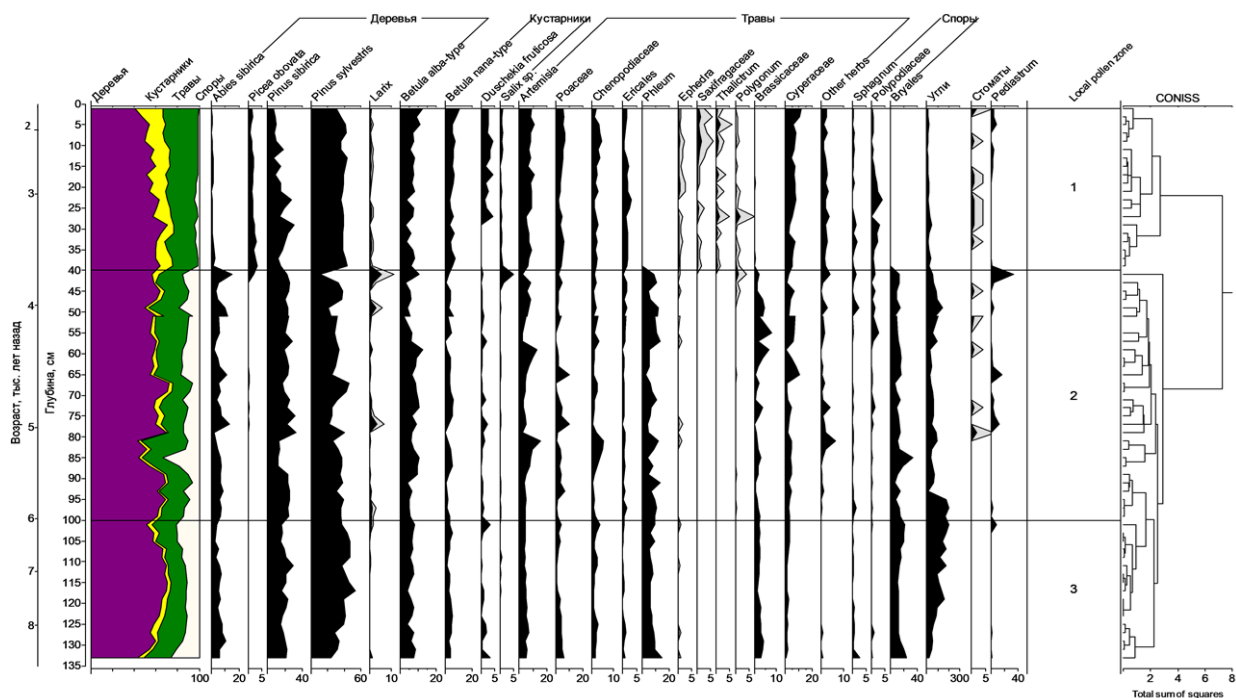


Рисунок 1.3.3 – Спорово-пыльцевая диаграмма донных отложений оз. Ильчир. В шкале общего состава СПС лиловый цвет – пыльца древесных растений, желтый – кустарников, зеленый – наземных трав, белый – споры папоротникообразных, сфагновых и зеленых МХОВ

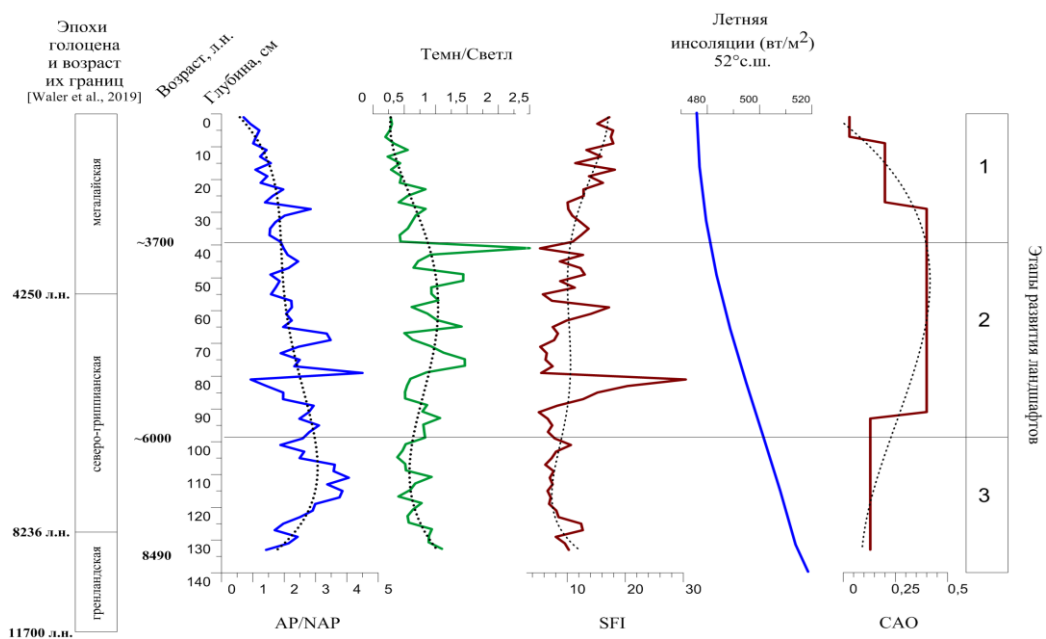


Рисунок 1.3.4 – Изменение избранных палинологических индексов природной среды бассейна озера Ильчир в сравнении с поступлением летнего тепла на широту Восточного Саяна согласно [12]. Пунктирные линии в шкалах AP/NAP, Темн/Светл и SFI – полиномиальная аппроксимация данных (полином 5 степени). CAO – средняя скорость аккумуляции отложений между датированными уровнями

СПС зоны 3, сосны сибирской, пихты предполагает более высокое, чем сегодня, положение верхней границы леса и ее приближение к бассейну озера Ильчир. Повышенное обилие микрочастиц углей в эту эпоху может служить косвенным подтверждением более густого растительного покрова в котловине и/или в бассейне озера и/или активной эрозии в бассейне озера. Локальная растительность была представлена разнотравно-злаковыми луговыми группировками с небольшими древесной растительности из лиственницы и, возможно, пихты, хотя отсутствие в отложениях их устьиц предполагает произрастание деревьев довольно далеко от берега озера.

Вероятно, в котловине климат был умеренно-холодный с недостаточным увлажнением. Скорее всего, значительно более высокий, чем современный, уровень летней инсоляции (рисунок 1.3.4) приводил к высокому испарению с поверхности почв в котловине озера, затрудняя распространение в ней древесных.

Во второй половине северо-гриппианской и первой половине мегалайской эпохи (рис. 1.3.4), 6050–3700 л.н. климат бассейна оз. Ильчир характеризовался более теплыми, чем современные, зимними сезонами и высоким снежным покровом, который не позволял промерзнуть почвам и поддерживал развитие пихты в бассейне озера Ильчир. Однако повышенное обилие пыльцы лиственницы и клеток устьиц ее хвои в отложениях этого времени предполагают постепенное усиление роли лиственницы в составе локальной растительности склонов котловины озера и/или ее приближение к береговой линии озера. Расширение площадей лиственницы в бассейне озера Ильчир ок. 6000–3700 л.н. может означать похолодание, обусловленное снижением уровня летней инсоляции, приведшее к формированию близко залегающего к поверхности слоя многолетнемерзлых пород. Пыльцевые индексы также свидетельствуют о развитии более изреженной, чем в предыдущий этап, древесной растительности.

Состав СПС, формировавшихся в мегалайскую эпоху голоцена, в последние примерно 3700 лет (рисунок 1.3.4), предполагает продолжающееся усиление континентальности климата, снижение среднегодовой суммы атмосферных осадков, особенно, в виде снега, который ранее предотвращал глубокое промерзание почв. Такие условия привели к почти полному исчезновению пихты в бассейне озера Ильчир и расширению площадей ели, кустарниковых тундр, хорошо приспособленных к существованию на близко залегающих многолетнемерзлых породах. Палинологические индексы свидетельствуют о постепенном сокращении лесной растительности параллельно снижению летней инсоляции, расширению степной растительности.

Многочисленные исследования показывают, что состав локальной/региональной растительности в значительной степени может быть взаимосвязан не только с климатом, но и с режимом пожаров на протяжении всего голоцена [20]. В полученной нами записи подсчитаны микрочастицы углей размерностью менее 120 мкм. Как правило, предполагается, что микрочастицы угля длиной примерно 10–200 мкм могут переноситься ветром на большие расстояния от места осаждения и, следовательно, в основном отражают историю региональных пожаров. В донных отложениях озера Ильчир их самое высокое обилие характерно для периода ок. 8490–6000 л.н. В это же время реконструировано само высокое положение границы сосны относительно бассейна озера Ильчир и локальное присутствие пихты, лиственницы, разнотравных сообществ. Вероятно, эти растения обеспечивали биомассу для природных пожаров в летние сезоны.

В интервал времени ок. 6000–3700 л.н. среднее значение встречаемости микрочастиц углей на слайде снизилось, вероятно, из-за сокращения растительной биомассы и/или повышение влажности почв. Такое предположение согласуется с реконструированным похолоданием, активизацией многолетней мерзлоты.

Самое низкое количество микрочастиц углей характерно для последних 3700 лет, для которых реконструировано прогрессирующее похолодание, снижение среднегодовой суммы атмосферных осадков, верхней границы леса в регионе, развитие многолетней мерзлоты - источника высокого почвенного увлажнения, сдерживающего низовые пожары.

Первые результаты палеоэкологического изучения донных отложений озера Ильчир показали их высокий потенциал для дальнейшей работы с донными отложениями озер этого региона. Планируемое еще более детальное временное разрешение подобных записей улучшит наше понимание взаимодействия гидрологического режима озер с климатом и предоставит ценнейшую научную информацию для рационального использования водных ресурсов.

## **2 Исследование изотопного состава кислорода створок диатомовых водорослей из донных отложений озер центральной и северной Евразии**

Озерные отложения являются надежным архивом экологических и климатических изменений, содержащим информацию об истории развития озерной системы с момента ее образования. Изучение реакции озерных систем на прошлые изменения климата дает уникальную возможность спрогнозировать, какие изменения в экосистемах могут произойти в будущем. Диатомовые изотопно-кислородные записи из озерных отложений



дают фундаментальную информацию о прошлой изменчивости климато-гидрологических условий в исследуемом регионе [21].

Задачи: (1) исследование изотопного состава кислорода створок диатомовых водорослей, извлеченных из донных отложений оз. Котокель, Баунт (Байкальский регион), Ладожское (северо-запад России), Большое Щучье (Полярный Урал), (2) выявление факторов, определяющих величину изотопного сигнала, (3) интерпретация изотопно-кислородных записей из центральной и северной Евразии, (4) оценка динамики природной среды, климата и гидрологических изменений в центральной (оз. Котокель, Баунт) и северной Евразии (оз. Ладожское, Большое Щучье), (5) исследование изотопного состава атмосферных осадков Байкальского региона (на примере гор. Иркутска) с целью получения информации для расшифровки региональных изотопно-кислородных записей.

Районы исследования: Байкальский регион, включающий объекты исследования гор. Иркутск, оз. Котокель и Баунт, расположен в центре Евразийского континента (рисунок 2.1), вдали от океанических влияний. Климатические условия характеризуются высокой степенью континентальности. 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.

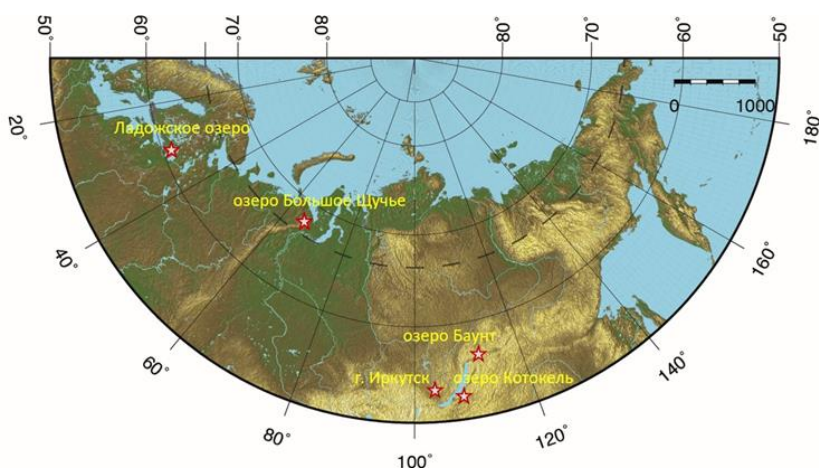


Рисунок 2.1 – Районы исследований: Байкальский регион (оз. Баунт, керн BNT14) и Полярный Урал (оз. Большое Щучье, керн Co1321)

Ладожское озеро (рисунок 2.1) расположено на северо-западе России. Климат в регионе – переходный между морским и континентальным. Циклоны с западной части Атлантического океана приносят облачную, ветреную погоду и осадки, а также вызывают резкое потепление зимой и похолодание летом. Сухие континентальные воздушные массы с востока/юго-востока вызывают относительно жаркое лето и холодную зиму. Вторжение сухих арктических воздушных масс с севера/северо-востока сопровождается ясной погодой, уменьшением количества осадков и резким падением температуры воздуха.

Оз. Большое Щучье (рисунок 2.1) расположено во внутренних районах Полярного Урала, на границе Европы и Азии. Климат в регионе континентальный и достаточно суровый, с продолжительной холодной зимой и коротким прохладным летом. Зимой преобладают западные циклоны, формирующиеся над Атлантикой (Северное море), принося пасмурную, ветреную погоду и обильные осадки. Сильные ветра вызывают перераспределение снега в горах и его накопление на подветренных склонах. Летом сухие континентальные воздушные массы с востока создают условия для относительно жаркой и сухой погоды, тогда как вторжения северо-западных и северных циклонов вызывают дожди и резкое падение температуры воздуха.

Материалы и методы исследования: Створки диатомовых водорослей были извлечены из кернов донных отложений КТК2 (52°47' с.ш., 108°07' в.д.; 458 м н.у.м.; глубина 3,5 м), BNT14 (55°11' с.ш., 113°01' в.д.; 1050 м н.у.м.; глубина 33 м), Co1309 (60°59' с.ш., 30°41' в.д.; 5 м н.у.м.; глубина 111 м) и Co1321 (67°53' с.ш., 66°19' в.д.; 186 м н.у.м.; глубина 132 м) озер Котокель, Баунт, Ладожское и Большое Щучье (рисунок 2.1), соответственно, с помощью многостадийной методики [22]. Степень чистоты препаратов створок оценена методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии [22, 23]. Изотопный анализ образцов из оз. Котокель, Ладожское, Большое Щучье выполнен в Институте им. Альфреда Вегенера центра им. Геймгольца полярных и морских исследований (гор. Потсдам, Германия) [24], тогда как образцы из оз. Баунт были проанализированы в Национальном центре экологических изотопов Британской геологической службы (гор. Кейворт, Великобритания) [25]. Атмосферные осадки отобраны в гор. Иркутске (52°18' с.ш., 104°17' в.д.; 469 м н.у.м.; рисунок 2.1), изотопный анализ выполнен в АВИ-Потсдам, Германия) на масс-спектрометре Finnigan MAT Delta-S [26]. Оценка синоптических условий в период выпадения осадков осуществлялась на основе данных метеонаблюдений Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA). Обратные траектории

движения воздушных масс, приносящих атмосферные осадки, рассчитывались с помощью модели HYSPLIT [27].

Результаты и обсуждение: Значения  $\delta^{18}\text{O}$  створок диатомовых водорослей из исследуемых озер изменяются от +22,7 до +35,0‰ (рисунок 2.2) и охватывают диапазон,

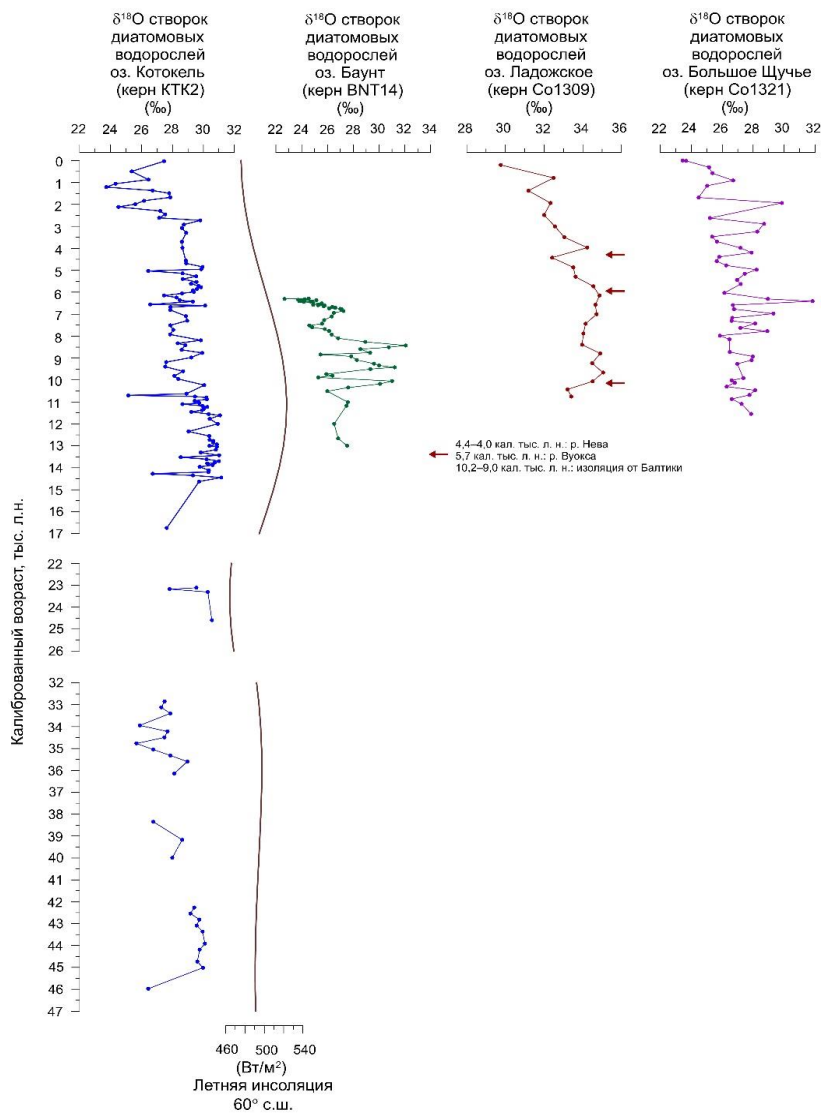


Рисунок 2.2 – Изотопный состав кислорода створок диатомовых водорослей в отложениях оз. Котокель, Баунт (Байкальский регион) и оз. Ладожское (северо-западная часть России), Большое Щучье (Полярный Урал), график изменения летней инсоляции (60° с.ш.)

характеризующий озерные диатомовые (от +15 до +40 ‰) [21]. Полученные диатомовые изотопно-кислородные записи (рисунок 2.2) характеризуются заметной вариабельностью и свидетельствует о нестабильности климато-гидрологических условий как в Байкальском регионе, так и в северной части России. В период голоцена (последние ~11,6 тыс. кал. л.) все записи четко демонстрируют постепенное истощение величин  $\delta^{18}\text{O}$  створок на ~3–4‰

и следуют тренду летней солнечной инсоляции в средних широтах северного полушария [10], свидетельствуя о положительной реакции изотопного состава створок на крупномасштабные климатические изменения.

Оз. Котокель. В изотопно-кислородной записи из оз. Котокель (рисунок 2.2) отчетливо отражает высокую изменчивость природно-климатических условий байкальского региона, обусловленную главным образом глобальным изменением температуры Северного полушария и региональной перестройкой атмосферной циркуляции, определяющей количество атмосферных осадков в регионе и их внутригодовое распределение. Преобладание доли снега в питании озера около 42–35 кал. тыс. л. н. приводило к снижению величин  $\delta^{18}\text{O}$  створок, тогда как увеличение атмосферных осадков в летнее время около 46–42 и 11,5–10,0 кал. тыс. л. н. оказывало противоположный эффект. Испарение, снижение речного стока и температуры воды стали основными причинами повышенных значений  $\delta^{18}\text{O}$  створок 25,0–23,0 и 17,0–11,5 кал. тыс. л. н. Высокая доля в водном балансе региона атмосферных осадков, образованных южными/юго-восточными воздушными массами ~11–9 кал. тыс. л. н., и последующее усиление западного переноса воздушных масс, начиная с ~6 кал. тыс. л. н., объясняют тренд изотопной записи в МИС 1.

Оз. Баунт. В изотопной записи из оз. Баунт слабо проявляются кратковременные климатические осцилляции, такие как Аллеред или Молодой Дриас (~13,0–11,7 кал. тыс. л.н.). Возможно, это обусловлено ярко-выраженной сезонностью, подразумевающей короткое, но достаточно теплое лето в период Молодого Дриаса. Высокий уровень значений  $\delta^{18}\text{O}$  створок диатомовых водорослей, характеризующий ранний голоцен (~11,7–8,2 кал. тыс. л.н.), соответствует высокому уровню летней инсоляции и обусловлен не только общим повышением температуры воздуха, но и преимущественным поступлением в регион атмосферных осадков с юга. Резкие колебания изотопного сигнала в это время, по-видимому, вызваны локальным таянием ледников. Постепенное снижение значений  $\delta^{18}\text{O}$  створок после ~8,2 кал. тыс. л.н. обусловлено общей перестройкой атмосферной циркуляции на территории Центральной Азии, связанной с усилением западного переноса воздушных масс, способствующего увеличению доли атмосферных осадков, приносимых в регион атлантическими воздушными массами, а также общим похолоданием климата, вызванным снижением летней солнечной инсоляции.

Оз. Ладожское. Полученная изотопно-кислородная запись из Ладожского озера четко показывает, что озеро в период голоцена существовало как пресноводный водоем и представляло собой испарительную систему. Высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$  створок диатомовых

водорослей (около +34,7 ‰) 7,1–5,7 кал. тыс. л. н. характеризуют температурный оптимум голоцена, тогда как четкий минимум (около +30 ‰) 0,8–0,2 кал. тыс. л. н. соответствует малому ледниковому периоду. Повышение уровня озера приводит к истощению изотопного состава диатомей, тогда его снижение вызывает рост значений  $\delta^{18}\text{O}$  створок. Кроме того, диатомовая изотопно-кислородная запись свидетельствует о более раннем, чем установлено, образовании стока через р. Нева около 4,4–4,0 кал. тыс. л. н.

Оз. Большое Щучье. Изотопная запись из оз. Большое Щучье значительно отличается от записей из оз. Котокель, Баунт и Ладожское, четко демонстрируя серию кратковременных колебаний с изотопными модификациями, достигающими 6‰ в течение нескольких сотен лет. На наш взгляд, такие колебания вызваны серьезными гидрологическими изменениями в водосборном бассейне озера. Резкое снижение значений  $\delta^{18}\text{O}$  створок, скорее всего, является следствием увеличения в водном балансе озера доли воды, обогащенной легкими изотопами. В горных районах, таких как Полярный Урал, ледники или значительные скопления снега, особенно на подветренных склонах гор, как правило, являются источником воды более легкого изотопного состава, чем в самом озере. Выраженные минимумы (0,2–0,7; 1,6; 2,7; 3,4; 4,5; 5,5; 6,1; 7,3; 8,1; 9,2; 10,1 кал. тыс. л.н.) в изотопной записи оз. Большое Щучье примерно соответствуют периодам наступления ледников на большей части северного полушария [28]. Таким образом, кратковременные колебания (в масштабе нескольких столетий) в значениях  $\delta^{18}\text{O}$  створок из оз. Большое Щучье могут свидетельствовать об увеличении притока талой воды в озеро, что связано с наступлением ледников на Полярном Урале или с увеличением количества зимних атмосферных осадков в регионе.

Изотопная запись из оз. Большое Щучье значительно отличается от записи из оз. Баунт, четко демонстрируя серию кратковременных колебаний с изотопными модификациями, достигающими 6‰ в течение нескольких сотен лет. На наш взгляд, такие колебания вызваны серьезными гидрологическими изменениями в водосборном бассейне озера. Резкое снижение значений  $\delta^{18}\text{O}_{\text{диат}}$ , скорее всего, является следствием увеличения в водном балансе озера доли воды, обогащенной легкими изотопами. В горных районах, таких как Полярный Урал, ледники или значительные скопления снега, особенно на подветренных склонах гор, как правило, являются источником воды более легкого изотопного состава, чем в самом озере. Выраженные минимумы (0,2–0,7; 1,6; 2,7; 3,4; 4,5; 5,5; 6,1; 7,3; 8,1; 9,2; 10,1 тыс. л.н.) в изотопной записи оз. Большое Щучье примерно соответствуют периодам наступления ледников на большей части северного полушария [28]. Таким образом, кратковременные колебания (в масштабе нескольких столетий) в

значениях  $\delta^{18}\text{O}_{\text{диат}}$  из оз. Большое Щучье могут свидетельствовать об увеличении притока талой воды в озеро, что связано с наступлением ледников на Полярном Урале или с увеличением количества зимних атмосферных осадков в регионе.

1. Полученная изотопно-кислородная запись из оз. Баунт отражает высокую изменчивость климата и природной среды Байкальского региона ~13,0–6,2 тыс. л.н., обусловленную глобальным изменением температуры северного полушария и региональной перестройкой атмосферной циркуляции.

2.  $\delta^{18}\text{O}_{\text{диат}}$  запись из оз. Большое Щучье четко отражает значительные гидрологические изменения на территории Полярного Урала за последние ~11,6 тыс. л., связанные с наступлением ледников в регионе.

Атмосферные осадки (гор. Иркутск): Изотопный состав атмосферных осадков в гор. Иркутске изменяется в широких пределах: от  $-41,4$  до  $-4,4\text{‰}$  для  $\delta^{18}\text{O}$  и от  $-322,4$  до  $-39,6\text{‰}$  для  $\delta\text{D}$ . Полученные изотопные данные демонстрируют четкие сезонные вариации. Образцы дождя характеризуются более высокими средними значениями  $\delta^{18}\text{O} = -11,7\text{‰}$  и  $\delta\text{D} = -92,6\text{‰}$  и низким избыточным дейтерием  $d = +1,0\text{‰}$ , тогда как в образцах снега средние значения  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  существенно ниже и составляют  $-26,7\text{‰}$ ,  $-205,3\text{‰}$  соответственно,  $d = +9,0 \text{‰}$ . Линейная зависимость между средневзвешенными месячными значениями и среднемесячными температурами воздуха имеет следующий вид:  $\delta^{18}\text{O} = 0,5 \cdot t_{\text{возд}} - 20$  ( $r^2 = 0,85$ ) и  $\delta\text{D} = 3,9 \cdot t_{\text{возд}} - 154$  ( $r^2 = 0,85$ ).

Обратные 5-дневные (120 часов) траектории движения воздушных масс, приносящих атмосферные осадки в Байкальский регион (рисунок 2.3), свидетельствуют, что около 77% всех осадков 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).

Выводы. 1. Изотопно-кислородная запись из оз. Котокель является примером, демонстрирующим разнонаправленное влияние нескольких факторов на величину  $\delta^{18}\text{O}$  створок в различные интервалы времени позднего плейстоцена и голоцена. Высокие значения в максимум последнего оледенения стали следствием повышенного испарения озерной воды на фоне снижения речного стока, тогда как увеличенная доля летних атмосферных осадков объясняет высокие значения, характеризующие первую половину голоцена. Снижение величины  $\delta^{18}\text{O}$  створок во второй половине голоцена обусловлено общим снижением средней температуры воздуха в Северном полушарии и атмосферными осадками, приносимыми в регион атлантическими воздушными массами.

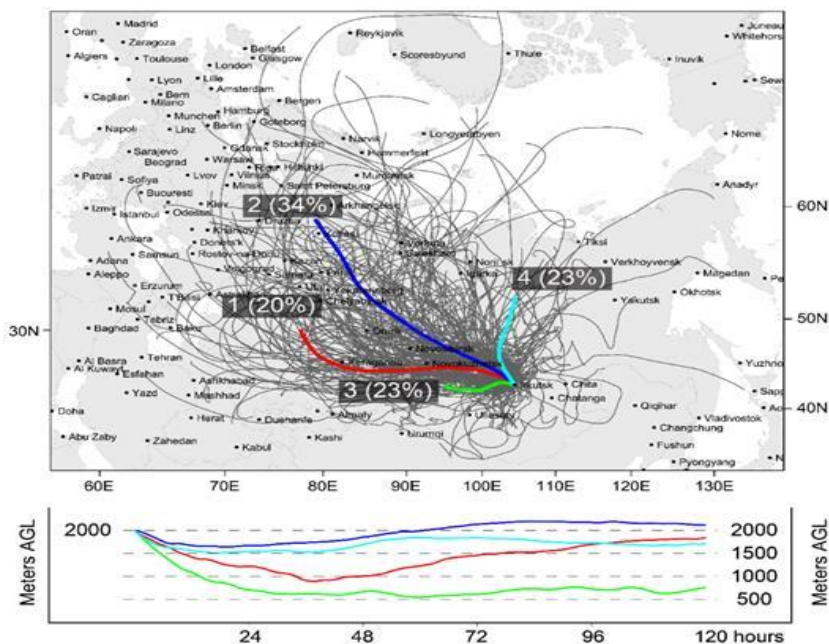


Рисунок 2.3 – Обратные траектории движения воздушных масс на изобарической поверхности 850 гПа для всех отобранных в гор. Иркутске образцов атмосферных осадков ( $n = 284$ ) за период с июня 2011 г. по апрель 2017 г. Четыре основных кластера обратных траекторий для осадков, достигающих г. Иркутск, включая их вертикальный профиль

2. Изотопно-кислородная запись из оз. Баунт отражает высокую изменчивость климата и природной среды Байкальского региона ~13,0–6,2 кал. тыс. л.н., обусловленную глобальным изменением температуры северного полушария и региональной перестройкой атмосферной циркуляции.

3. Изотопно-кислородная запись из Ладожского озера четко отражает региональные гидрологические изменения в период голоцена. Изоляция озера от Балтики в раннем голоцене и последующее образование р. Вуокса ~5,7 кал. тыс. л.н. и р. Невы ~4,4–4,0 кал. тыс. л.н. связаны с изменениями уровня озера и отмечены в изотопной записи соответствующими максимумами и минимумами.

4. Изотопно-кислородная запись из оз. Большое Щучье четко отражает значительные гидрологические изменения на территории Полярного Урала за последние ~11,6 тыс. л., связанные с наступлением ледников в регионе.

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

6. Анализ траекторий и изотопных данных показал, что атмосферные осадки с самыми низкими средними значениями  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  ( $-34,1\text{‰}$  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.

### **3 Разработка методики рентгенофлуоресцентного определения основных породообразующих элементов в донных отложениях озер из малых навесок и применение его для реконструкции геохимической эволюции озер юга Восточной Сибири**

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, для определения которых используется классический химический силикатный анализ. Рентгенофлуоресцентный метод анализа обладает очевидным преимуществом в производительности по сравнению с классическими методами, современная аппаратура обеспечивает высокую прецизионность измерений аналитического сигнала, что определило распространение метода РФА при определении элементного состава осадочных горных пород в последние десятилетия. Для рентгенофлуоресцентного определения основных породообразующих элементов обычно используются сравнительно большие навески пробы (500 мг и более), что затрудняет применение метода в случаях, когда масса материала для анализа ограничена, в частности, 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 малых навесок.

Цель работы состояла в разработке методических процедур рентгенофлуоресцентного определения содержания основных породообразующих элементов из малых навесок в образцах озерных и торфяных отложений для палеоэкологических исследований.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:



- разработать способ подготовки проб гомогенизацией сплавлением малой навески для РФА изверженных и осадочных горных пород и провести его метрологические исследования;
- апробировать разработанный способ РФА для определения элементного состава озерных и торфяных отложений;
- исследовать изменчивость содержаний основных породообразующих элементов по глубине кернов озерных и торфяных отложений для реконструкций природных условий в Восточной Сибири в голоцене с временным разрешением приблизительно 100 лет.

Все измерения были выполнены на волноводдисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker AXS, Германия). Для подготовки проб был выбран способ гомогенизации сплавлением с боратными флюсами, позволяющий минимизировать влияние минерального и гранулометрического состава горных пород на интенсивность флуоресцентного излучения, что позволяет достигнуть высокой точности анализа.

На основании литературных данных выбирали флюсы и степени разбавления для подготовки проб сплавлением к рентгенофлуоресцентному определению основных породообразующих элементов из малых навесок в изверженных горных породах. Исследованы способы подготовки навесок различной массы (50, 110 и 500 мг) с метаборатом ( $\text{LiBO}_2$ ) и тетраборатом ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) лития и их смесью.

Навески пробы и степени разбавления для способов I–III подбирали таким образом, чтобы обеспечить размер излучателя, подходящий для измерения с использованием коллиматорной маски диаметром 8 мм, имеющейся в аппаратном оснащении спектрометра S8 Tiger. Способ IV с использованием навески пробы 500 мг применяется в лаборатории ИГХ СО РАН в качестве рутинной процедуры при определении состава горных пород.

Стандартные и анализируемые образцы предварительно прокаливали в течение 4 часов в муфельной печи при температуре 950 °С. Навески прокаленных образцов и флюса сплавливали с добавлением 7 капель 4% раствора LiBr в платиновых тиглях в электропечи TheOX (Claisse, Канада) при температуре 1050 °С. Время сплавления и охлаждения образца составило 19 минут. Из полученного расплава после выливания на платиновые изложницы в центре формировался диск диаметром 10–12 мм (способы I–III). Образцы, приготовленные по способу IV, формировались на изложнице и покрывали ее полностью (диаметр 32 мм).

На основании проведенных исследований способ с использованием навески пробы 110 мг и 1.1 г  $\text{LiVO}_2$  (способ II) выбран как оптимальный, поскольку он обеспечивает наименьшие погрешности результатов РФА среди способов с использованием малой навески (способы I–III). Погрешность  $V_0$  для выбранного способа II оказалась сопоставима или ниже по сравнению со способом IV (навеска пробы 500 мг) для большинства компонентов.

Осадочные горные породы существенно отличаются от изверженных как по химическому, так и по минеральному составу, они содержат в значительных количествах карбонатные и глинистые минералы, а также органическую составляющую, которая может препятствовать гомогенизации исследуемых образцов. Для анализа осадочных горных пород необходимо выбрать подходящий набор стандартных образцов для построения градуировочных функций, соответствующий составам осадочных горных пород, и провести дополнительные оценки точности результатов анализа путем сравнения полученных результатов с данными других методов. Настоящий раздел посвящен исследованию возможности применения разработанного способа количественного РФА малых навесок изверженных горных пород для анализа осадочных горных пород.

Исследования выполняли с использованием 23 стандартных образцов донных отложений производства ИГХ СО РАН, Научно-исследовательского института прикладной физики Иркутского государственного университета, Центрального геологического института Германии, а также образцы, состав которых был определен в рамках программы GeoPT: БИЛ-1, БИЛ-2, СГХ-1, СГХ-3, СГХ-5, СГХМ-1, СГХМ-3, СГХМ-2, СГХМ-4, СИ-1, СИ-2, СИ-3, СДО-1, СДО-2, СДО-3, СДО-8, СДО-9, СА-1, КН-1, КН-2, СН-1, UoK Loess и SdAR-1.

На рисунке 3.1 приведены корреляции между аттестованными значениями и аналитическими данными, полученными методом РФА для прокаленных стандартных образцов осадочных горных пород. Для всех компонентов величины множественных коэффициентов детерминации между аналитическими данными и аттестованными значениями для стандартных образцов близки к 1, что подтверждает их согласованность.

Для оценки правильности результатов определения пороодообразующих элементов использовали пробы керна донных отложений озера Баунт и разреза торфяных отложений реки Сенцы (Республика Бурятия). Для большинства образцов керна донных отложений озера Баунт после пробоподготовки с целью исследования распределения содержания элементов по глубине керна (см. ниже) масса оставшегося материала была недостаточна для проведения количественного химического анализа, поэтому близкие по составу пробы

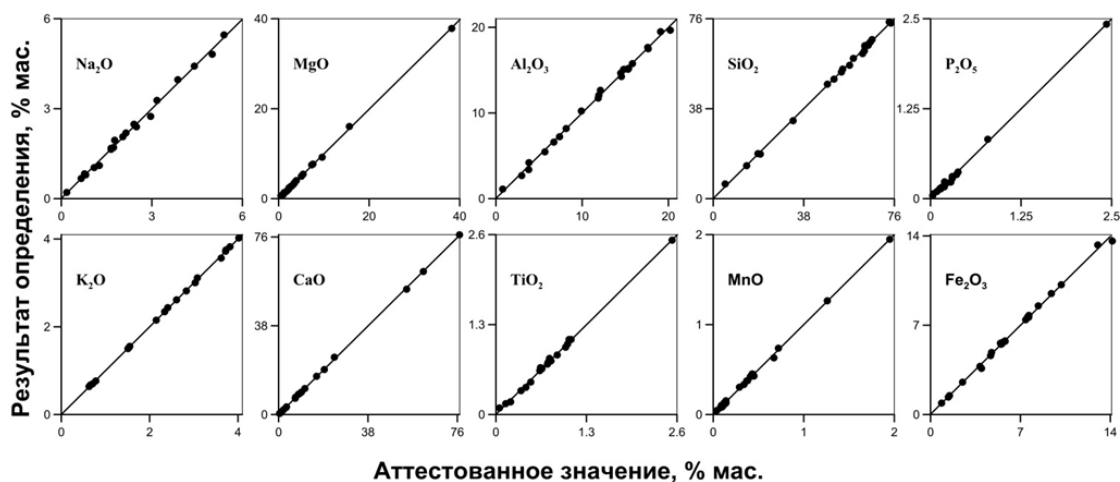


Рисунок 3.1 – Корреляции между аттестованными значениями и аналитическими данными, полученными методом РФА для прокаленных сплавленных стандартных образцов осадочных горных пород

объединяли. Точность полученных данных рентгенофлуоресцентного определения петрогенных элементов была проверена сопоставлением с результатами анализа 8 объединенных проб донных отложений озера Баунт и 15 проб торфяных отложений поймы реки Сенцы массой 0,5–3 г методами атомной абсорбции, спектрофотометрии и атомно-эмиссионной пламенной фотометрии (методики НСАМ № 138-Х, НСАМ № 172-С, НСАМ № 61-С). Для всех определяемых породообразующих элементов полученные результаты РФА соответствуют III категории точности количественного химического анализа согласно отраслевому стандарту ОСТ 41-08-212-04 и могут быть использованы для палеоэкологических исследований.

Далее приведены результаты рентгенофлуоресцентного определения основных породообразующих элементов в донных отложениях озер Баунт, Арахлей, Ильчир. Для каждого сантиметра отложений были определены потери при прокаливании при 950 °С (ППП950), характеризующие карбонатную составляющую, потери при прокаливании при 550 °С (ППП550), содержания основных породообразующих элементов предложенным способом РФА и рассчитаны общепринятые геохимические индексы, оценка изменения которых является одним из важных инструментов в решении палеогеографических и палеоэкологических задач и оценки степени деформации и выветривания породы. В этих индексах мобильными элементами являются Са, Na и К, а немобильным – Al. Считается, что при химическом выветривании горные породы теряют мобильные элементы, причем, чем выше степень выветривания, тем меньше в них остается мобильных элементов и

выше значения приведенных индексов. Как правило, химическое выветривание проходит более интенсивно при теплом и влажном климате, поэтому эти индексы зачастую используют как климатические индикаторы.

Известно, что интенсивность химического выветривания, характеризуемая индексом CIA, в областях размыва контролируется изменением палеоклимата. Породы, характеризующиеся значениями CIA порядка 50, рассматриваются как не подвергавшиеся выветриванию; тогда как сильно выветрелые характеризуются индексом CIA от 50 до 100 единиц. В качестве критерия для разграничения отложений, формировавшихся в обстановках теплого и холодного климата, принято считать значение индекса CIA около 70. Выше этой величины климат считается гумидным, в интервале значений 60-70 единиц – переходным, менее 60 – относительно аридным. Величина индекса CIW и CIA возрастает с ростом степени разложения исходных пород или отложений, т.е. с ростом степени выветрелости материала палеоводосборов. Таким образом, торфяные отложения поймы реки Сенцы соответствуют слабо измененным невыветрелым породам водосбора по значениям индексов CIW и CIA.

Индекс ICV так же, как и два других индекса CIA и CIW, отражает степень зрелости поступающей в область седиментации тонкой алюмосиликокластики. Незрелые глинистые сланцы, с высоким содержанием неглинистых силикатных минералов, имеют значения ICV более 1, напротив, более зрелые глинистые породы с большим количеством собственно глинистых минералов имеют более низкие величины ICV.

На рисунке 3.2 приведен обобщающий график геохимических и палинологических индексов для отложений озера Баунт в сравнении с записью изотопного состава кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  из ледника Агассиз, северный сектор Атлантического океана, рассматриваемой как индикатор изменчивости глобальной температуры, и уровнем летней инсоляции за последние 7000 лет. Фиолетовые линии во всех колонках соответствуют сглаженным значениям параметра с применением полинома 5 степени.

Первые геохимические и палинологические записи показывают заметную изменчивость природной среды исследованного региона. Сокращение лесной растительности и особенно сосновых лесов происходило параллельно снижению уровня летней инсоляции и средних годовых температур воздуха в северной части Атлантического океана. Сравнение набора новых записей из оз. Баунт с изменением солнечной инсоляции и средней температурой в северном секторе Атлантического океана показало отчетливую взаимосвязь между региональными изменениями природной среды и глобальными записями  $\delta^{18}\text{O}$  из ледника Агассиз и уровнем летней инсоляции.

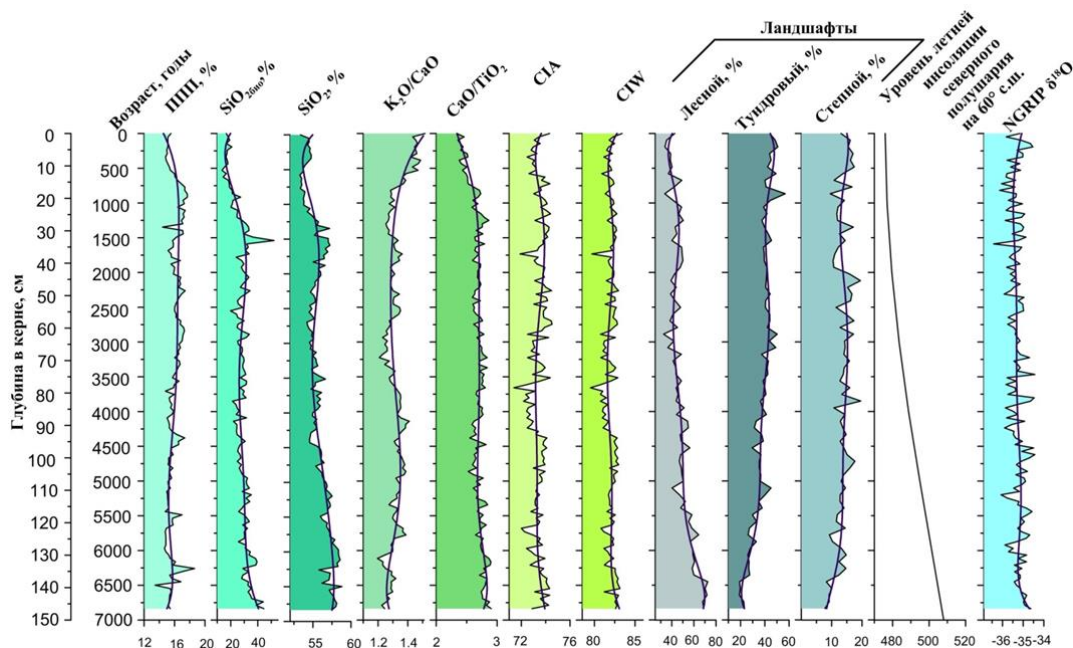


Рисунок 3.2 – Обобщающий график изменения геохимических и палинологических индексов в отложениях озера Баунт

В отложениях керна озера Арахлей наблюдается заметные вариации содержаний породообразующих элементов и геохимических индексов (рисунок 3.3). Содержания  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{K}_2\text{O}$  постоянно повышаются с глубиной, в то время как происходит снижение значений ППП950. Кластерным анализом с использованием программы «Tilia» выделено четыре этапа естественной изменчивости климата и окружающей среды в бассейне озера.

Arach-4 (128–114 см) – в осадках нижней части керна отмечены максимальные значения содержаний  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{TiO}_2$  и минимальные значения ППП950. В этом интервале керна наблюдается возрастание значений CIA и  $\text{SiO}_2$  и уменьшение  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$ .

Arach-3 (114–84 см) – резкое повышение величины  $\text{CaO}$  и, наоборот, резкое снижение величины CIA и слабое снижение значений ППП950, также для интервала отмечены максимальные значения содержаний  $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Arach-2 (84–40 см) – наблюдаются повышения содержаний  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{CaO}$  в конце интервала, максимальное содержание для всего керна  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . В отложениях этой части керна отмечен тренд снижения величины ППП950.

Arach-1 (40–0 см) – для самой верхней части отложения керна характерны минимальные содержания  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и максимальных содержаний ППП950.

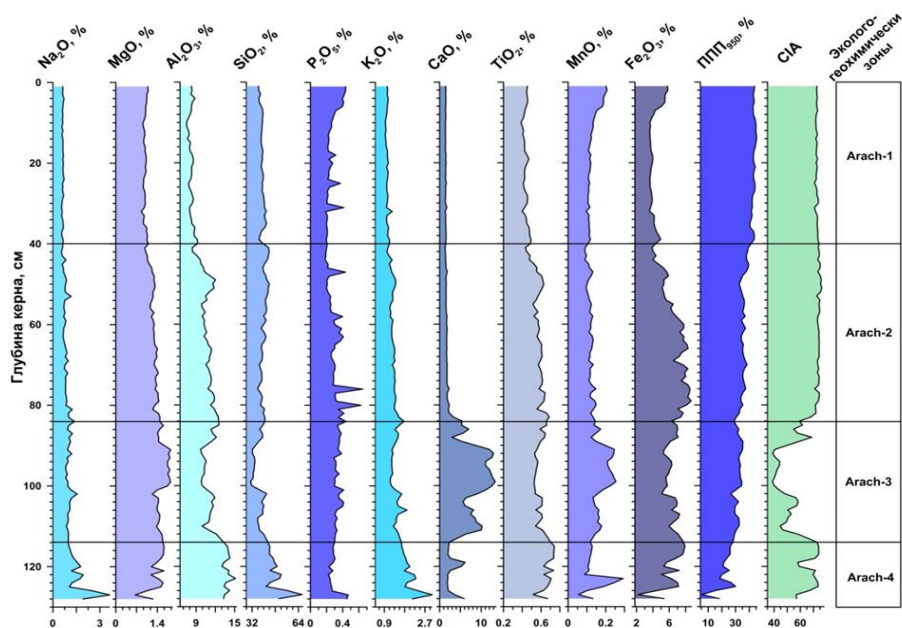


Рисунок 3.3 – Изменение избранных геохимических показателей в зависимости от глубины в керне озера Арахлей

В 2020 году был исследован керн донных отложений высокогорного озера Ильчир, которое остается чистым из-за удаленности от прямого антропогенного воздействия и из которого вытекает крупнейшая река Тункинской долины – Иркут, являющаяся одним из главных источников водных, рекреационных и других ресурсов в регионе.

В образцах донных отложений озера Ильчир значения индекса CIA варьируют от 65,4 до 73,8 и характеризуют сильно выветрелые породы, формировавшиеся в условиях переходных от аридных к гумидным. В отложениях озера Ильчир значения индексов CIW, PIA и CPA во многом повторяют тренд индекса CIA (рисунок 3.4).

Изменения значений индекса ICV в интервале от 1,0 до 1,7 описывают поступление менее зрелых глинистых сланцев с высоким содержанием неглинистых силикатных минералов.

Геохимические индексы отражают пониженное поступление в озеро более легкорастворимых и мобильных элементов (пониженные значения CIA) в интервале 5500–2500 л.н., вероятно, из-за похолодания и/или снижения суммы атмосферных осадков.

В другие интервалы времени повышенные значения CIA свидетельствуют о повышенном поступлении в озеро из его водосборного бассейна легкорастворимых и мобильных элементов вследствие более теплого и/или влажного климата.

В целом, разработанный подход рентгенофлуоресцентного определения основных породообразующих элементов в изверженных горных породах из навески 110 мг

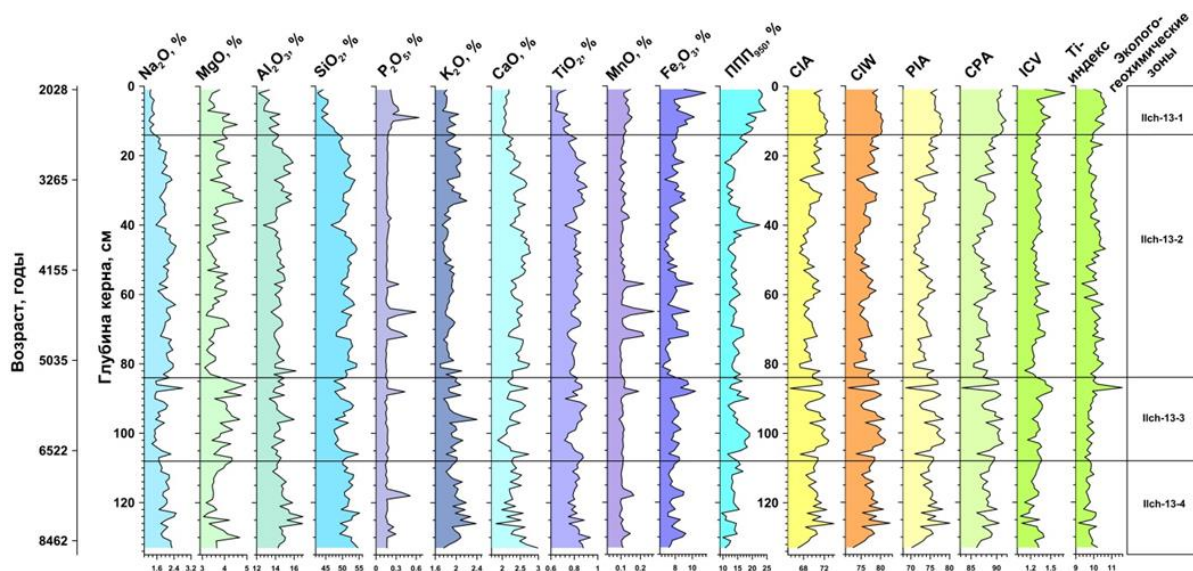


Рисунок 3.4 – Изменение избранных геохимических показателей в зависимости от глубины и возраста отложений в керне озера Ильчир

погрешность определения, сопоставимую с методикой анализа, оперирующей навеской 500 мг. Использование малой навески 110 мг с гомогенизацией образца сплавлением позволило проанализировать керны донных отложений озер с уникальным для региона временным разрешением. Разработанные методические подходы РФА применены для изучения различных кернов донных отложений озер Восточной Сибири, внедрены в аналитическую практику ИГХ СО РАН и используются для анализа других геохимических объектов ограниченной массы.

На основе полученных данных РФА были рассчитаны геохимические индексы, что позволило выделить этапы естественной изменчивости климата и природной среды бассейнов континентальных озер с применением стратиграфически ограниченного кластерного анализа с использованием программы TILIA-TGView. Полученные распределения содержаний основных породообразующих элементов и важнейших климатических модулей по глубине керна применяются для реконструкции региональных палеоэкологических изменений в комплексе с палинологическими и литологическими данными.

По результатам проведенных исследований Амосовой А.А. защищена кандидатская диссертация «Рентгенофлуоресцентное определение элементов в донных отложениях для палеоэкологических исследований» по специальности 02.00.02 – Аналитическая химия. Защита состоялась 12 декабря 2019 г. в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).

## **4 Результаты изучения донных отложений озер юга Восточной Сибири методами палеомагнитного, петромагнитного и гранулометрического анализов**

### ***4.1 Обнаружение палеомагнитных экскурсов Гётеборг и Моно Лейк в осадочных отложениях озера Баунт***

Важнейшим научным результатом, полученным в рамках реализации данного научно-исследовательского проекта, является первое для малых озер региона обнаружение и датирование геомагнитных экскурсов Гётеборг и Моно Лейк, сохранившихся в осадочных отложениях озера Баунт (Северное Забайкалье).

Проведённый комплекс петромагнитных исследований (SIRM, ARM,  $\kappa$ ) позволил уверенно отнести обнаруженные палеомагнитные события к экскурсам.

Сочетание высоких скоростей осадконакопления и высокого временного разрешения полученной палеомагнитной записи стали основой выделения временных интервалов, соответствующих проявлению известных в мире геомагнитных экскурсов Гётеборг и Моно Лейк, а надёжная возрастная модель позволила не только обосновать их выделение, но и рассчитать время существования этих экскурсов.

Достоверное установление экскурсов Гётеборг и Моно Лейк в записи озёрных отложений оз. Баунт позволяет утверждать, что:

- экскурс Гётеборг может рассматриваться как глобальное палеомагнитное событие, которое на севере Забайкальского региона, согласно нашим исследованиям, имело место в интервале 13,3–13,1 тыс. лет назад;

- возраст экскурса Моно Лейк составляет 26,1–25,9 тыс. лет, что надёжно отделяет его от происходившего на 10–20 тыс. лет ранее экскурса Лашамп.

Полученные результаты могут рассматриваться как надёжная основа для последующих региональных исследований, связанных с важнейшими вопросами, относящимися к установлению времени проявления, частоты, длительности, характера геомагнитных экскурсов и их влияния на эволюцию природно-климатической системы Забайкалья и связанными с ней адаптивными стратегиями человека.

### ***4.2 Реконструкция природной среды позднеледникового времени и голоцена на основе комплексного изучения осадков оз. Енгаргинское и оз. Хикушка***

В 2020 году были завершены первые комплексные исследования донных отложений двух озер из районов с разными современными физико-географическими условиями – оз. Хикушка из высокогорной зоны В. Саяна и оз. Енгаргинское из



Тункинской рифтовой долины - юго-западной секции Байкальской рифтовой зоны. Цель исследований - реконструкция природной среды восточной части Восточного Саяна и Тункинской рифтовой долины в позднеледниковье и голоцене, корреляция реконструированных изменения природной среды этих районов с таковыми из соседних регионов и установление возможных причин реконструированных изменений.

Оз. Хикушка является каровым, проточным озером и находится в верховьях пади Хи-Гол (абс. выс. 1956 м), (Рисунок 4.2.1). Площадь его водной поверхности составляет 0,3 км<sup>2</sup>, глубина достигает 42 м. Котловина оз. Хикушка имеет крутые скалистые склоны, основания которых покрыты коллювиальными шлейфами и курумами, спускающимися в озеро. Грубообломочные породы на дне водоема быстро замещаются глинистыми отложениями.

Оз. Енгаргинское имеет тектонический генезис [29] и является крупным озеровидным расширением русла р. Енгарга, берущей свое начало в высокогорьях Тункинских Гольцов. Оно приурочено к поясу низких аккумулятивных равнин пойменного уровня (Рисунок 4.2.1). Характерным элементом морфологических ландшафтов днища Тункинской впадины являются низкие озерно-болотные равнины участков интенсивных молодых тектонических погружений [30]. Озеро – крупнейшее в предгорьях Тункинской долины, располагается на высоте 749 м н.у.м., протяженность его с севера на юг около 3 км, максимальная ширина до 800 м, площадь водной поверхности около 1 км<sup>2</sup>. Озеро имеет малые глубины (до 2,2 м), характеризуется морфологически юными низкими заболоченными берегами и значительным гидрологическим влиянием на его функционирование р. Енгарга. Береговая линия озера довольно подвижна. В сезон летних, особенно селевых паводков, озеро значительно расширяет свою акваторию, в его котловину поступает особенно много терригенного материала. Котловина озера располагается в лесостепном поясе днища Тункинской долины [31]. По южному берегу озера растет сосново-лиственнично-березовый лес.

Батиметрические измерения донных отложений озер проведены трехмерным 6-лучевым эхолотом Humminbird Matrix 748x3D, Австрия. В оз. Хикушка керн отобран с глубины 32 м (52° 41' 39,0" с.ш.; 98° 58' 03,8" в.д); в оз. Енгаргинское бурение осуществлялось в точке с максимальной глубиной воды в 2 м (51° 46' 33,99" с.ш.; 102° 05' 31,71" в.д.) (Рисунок 4.2.1). Длина полученных кернов из озер Хикушки и Енгаргинского составила 124 и 407 см, соответственно.

Ориентированные образцы для петромагнитных исследований отбирались с шагом 3 см в керне из оз. Хикушка и с шагом 5 см из оз. Енгаргинского. Для измерения

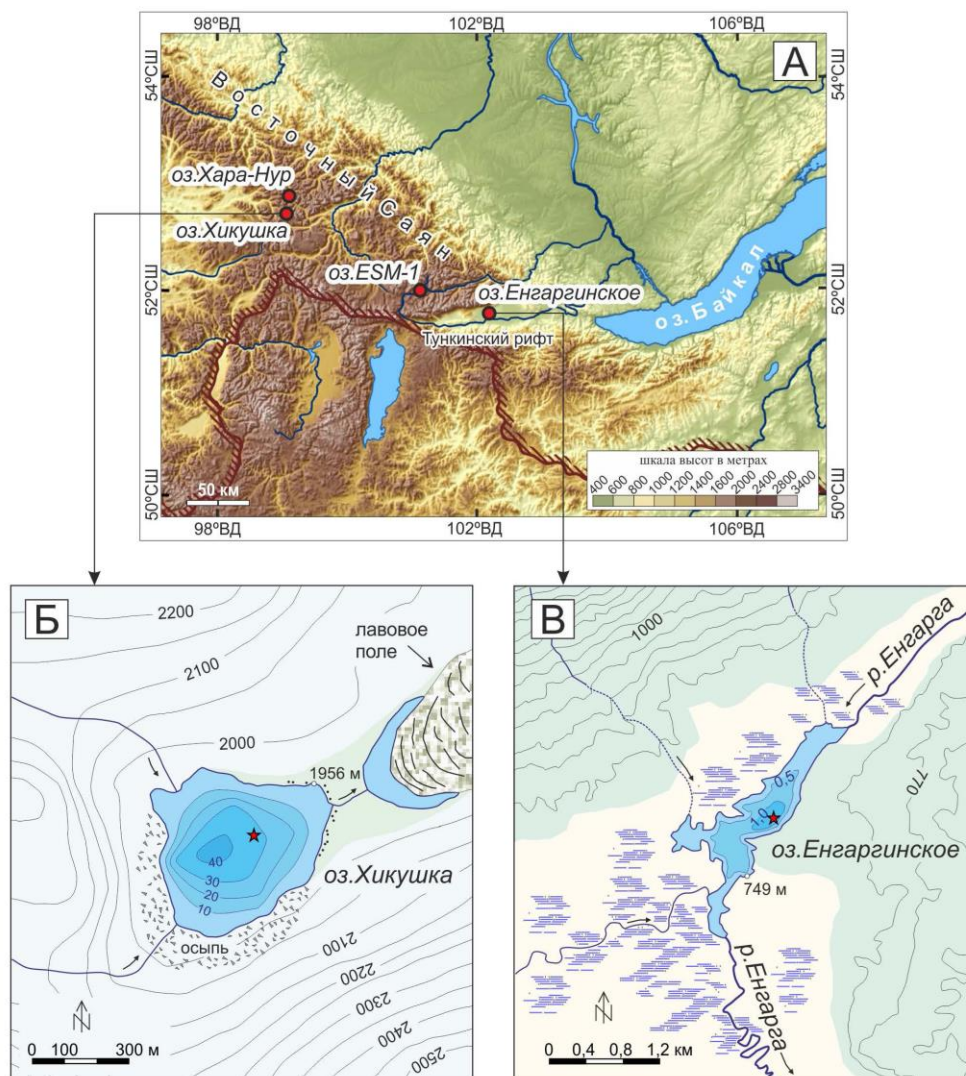


Рисунок 4.2.1 – Обзорная карта, показывающая положение Восточного Саяна и обсуждаемых в статье озер (А). Батиметрическая схема оз. Хикушка (Б) и батиметрическая схема оз. Енгаргинское (В). Точки бурения обозначены красными звездочками

безгистерезисной остаточной намагниченности образцы предварительно размагничивались переменным магнитным полем (10 мТл) в катушке, помещённой в магнитный вакуум. Далее, при той же величине переменного поля, образцы дважды намагничивались в этой катушке, помещённой в современное поле Земли - по оси  $z$  (направлена вдоль керна) и против неё. На основе полученных данных и рассчитывалась ARM, для чего использовался спин-магнитометр JR-6 (Agico, Чехия). Магнитная восприимчивость измерялась на капнометре KLY-2.

Гранулометрические исследования проводились с использованием навески массой  $\sim 0,5$  г сухого вещества. Органическое вещество выжигалось 10% раствором пероксида

водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) в пробирках, помещённых в шейкер [32–34]. После этого пробы в пробирках центрифугировались 15 минут на скорости 3000 об/мин., затем пероксид водорода удалялся, вместо него добавлялась дистиллированная вода, и процесс повторялся. Затем образцы высушивались при температуре 105 °С.

Содержание фракции крупнее 0,3 мм определялось стандартным ситованием, фракции размером 0,3–200 мкм – на лазерном дифракционном анализаторе частиц Frish Analysette 22. Выделенные подфракции объединялись в следующие группы: <5 мкм (мелкая пелитовая); вторая – 5–10 мкм (крупная пелитовая); третья – 10–50 мкм (мелкоалевритовая), четвертая – >50 мкм (крупноалевритовая с мелкозернистым песком, в которую входили и частицы крупнее 300 мкм, полученные стандартным ситованием).

Для оценки возраста отложений в лаборатории радиоуглеродного анализа в гор. Познань (Польша) и в лабораториях пробоподготовки и изотопного анализа ИАЭТ СО РАН, радиоуглеродных методов анализа НГУ, на УНУ «УМС ИЯФ СО РАН» были получены УМС<sup>14</sup>С датировки по общему органическому веществу. Измеренные значения приведены в соответствие с калиброванным возрастом с использованием калибровочной кривой INTCAL 13 [35]. При интерпретации изменений природной среды в бассейне оз. Енгаргинское мы не использовали возрастную модель из-за перерывов в озерной седиментации, приведших к неопределенности установления возраста формирования слоя торфа. Кроме того, для интервала 60–67 см от поверхности керна нет данных, поскольку на этот интервал приходится разрыв (по техническим причинам).

На основе результатов изучения донных отложений оз. Хикушка (рисунок 4.2.2) было выделено пять этапов накопления его донных отложений. Согласно возрастной модели, построенной на основании датировок УМС<sup>14</sup>С, среднее временное разрешение записей плотности, влажности и  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  составляет 112 лет, для остальных параметров – 500 лет.

В этап 5 (123–82 см; ~ 13800–11700 л.н.) происходила аккумуляция плотных ледниковых глин с господством тонких фракций минерального зерна размерностью <5 мкм и 5–10 мкм. Для отложений этого этапа характерны низкие значения медианного диаметра зерен (<8,5 мкм, за исключением одного образца), биогенного кремнезёма  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  (<2% с ростом до 6% в последние столетия этапа), высокие – плотности осадка (до 1,6 г/см<sup>3</sup>), ARM (местами свыше  $50 \cdot 10^{-4}$  А/м) и MB (до  $50 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ)

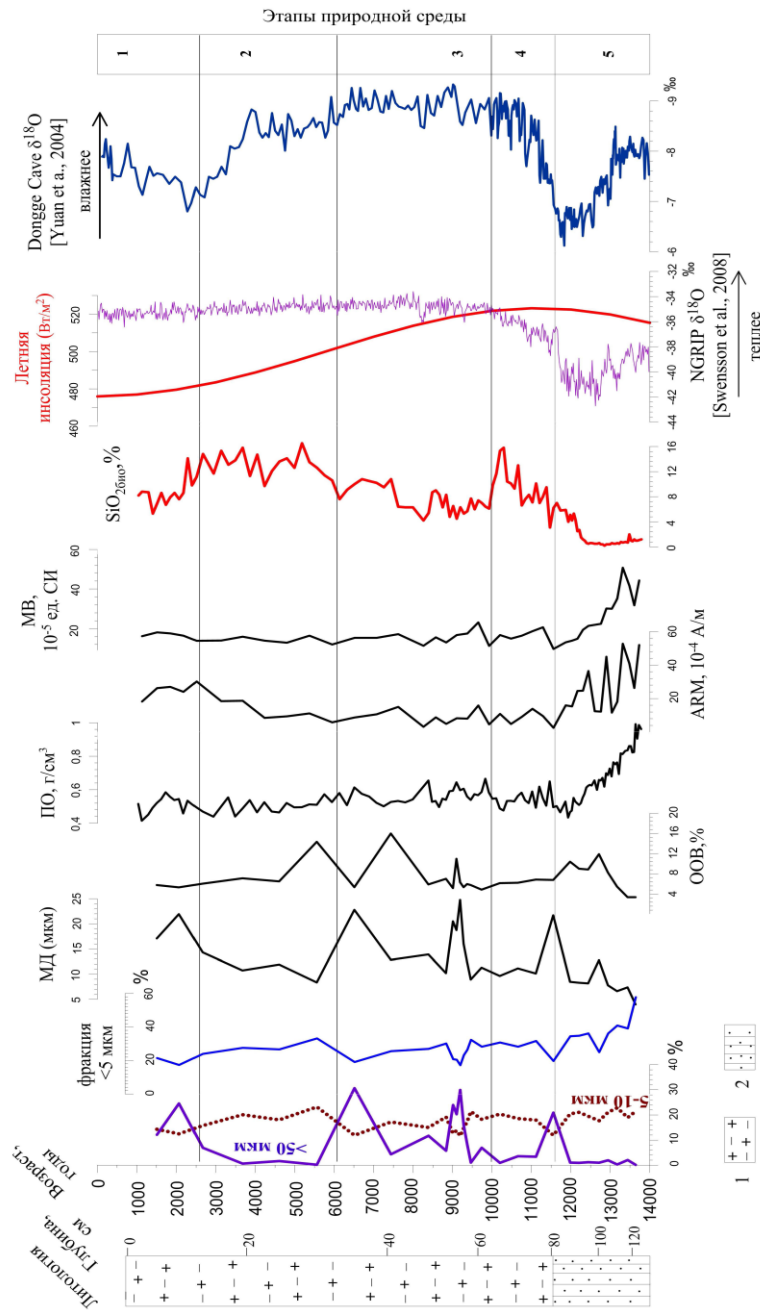


Рисунок 4.2.2 – Обобщающий график избранных записей из донных отложений оз. Хикушка в сравнении с записями климата северного полушария: средние расчетные значения летней инсоляции на 55° с.ш. [10]; запись NGRIP  $\delta^{18}\text{O}$  из ледовых кернов Гренландии как показатель температуры воздуха в северном полушарии [9]; запись Dongge Cave  $\delta^{18}\text{O}$  из китайских сталагмитов как показатель интенсивности тихоокеанского летнего муссона [36]. 1 – биогенный ил с диатомовыми; 2. – алевритистая глина

В отложениях этапа 4 (82–63 см, ~ 11700–10000 л.н.) снизилось обилие мелкой фракции <5 мкм (рисунок 4.2.2) на границе с этапом 5, отмечен пик содержания крупной

фракции размерностью  $>50$  мкм и МД ок. 11700 л.н. Содержание крупной фракции размерностью  $>50$  мкм возросло до 20%, МД – до 22 мкм в горизонте ок. 11700 л.н. Концентрация  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  значительно повысилась от 6% до 10–15%, а значения ПО, ARM и MB резко снизились по сравнению с предыдущим этапом (с 1,35–1,60 до 1,20–1,30 мкм; с  $15\text{--}50 \cdot 10^{-4}$  А/м до  $2,5\text{--}14 \cdot 10^{-4}$  А/м и с  $15\text{--}50 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ до  $10\text{--}20 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ соответственно).

Для этапа 3 (63–33 см,  $\sim 10000\text{--}6000$  л.н.) характерно продолжающееся снижение обилия фракций 5–10 мкм и  $<5$  мкм, ПО и небольшое повышение значений ARM. В отложениях, возраст которых составляет  $\sim 9000$  и 6500 л.н., отмечены самые значительные во всей гранулометрической записи пики крупной фракции размерностью  $>50$  мкм.

В отложениях этапа 2 (33–16 см,  $\sim 6000\text{--}3000$  л.н.) несколько повысилось обилие фракции  $<5$  мкм. Показатели ARM и, особенно,  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  повысились по сравнению с предыдущим этапом.

Этап 1 (верхние 15 см, последние 3000 лет). В отложениях повысилось обилие фракции размерностью  $>50$  мкм и значений ARM. Значения MB остались близкими с таковыми предыдущего этапа. Концентрации  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  значительно снизились.

Господство тонких фракций размерностью  $<5$  мкм и 5–10 мкм в самый ранний этап существования оз. Хикушка,  $\sim 13800\text{--}11700$  л.н. предполагает, что на протяжении большей части года озеро было покрыто льдом. Сравнение времени существования начального этапа онтогенеза оз. Хикушка с глобальной шкалой событийной стратиграфии (рисунок 4.2.2, шкала NGRIP  $\delta^{18}\text{O}$ ) показывает, что этот этап соотносится с финалом потепления климата северного полушария в гренландский интерстадиал 1 (GI-1) и последующим похолоданием в гренландский стадиал 1 (GS-1) [37]. Повышенный уровень летней (рисунок 4.2.2.) инсоляции стал причиной активного таяния локального ледника и образования озера в непосредственной близости от его края.

Низкое содержание  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  предполагает, что вода была мутной и очень холодной, а сама озерная система - низкопродуктивной. Высокие значения MB поддерживают предположение об обильном поступлении минеральной составляющей.

С наступлением голоцена,  $\sim 11700$  л.н., в оз. Хикушка произошла смена типа осадконакопления – стали накапливаться биогенно-терригенные илы, (рисунок 4.2.2, этап 4). Вероятно, к этому времени локальный ледник растаял, и источниками питания озера стали талые снежные воды и летние дожди. Изменение режима питания привело к снижению уровня воды в озере. Снижение значений MB предполагает ослабление эрозии склонов, что могло быть результатом развития на склонах озерной котловины

относительно плотного почвенно-растительного покрова, снизившего эрозионные процессы и снос в озеро терригенного материала. Природные условия четвертого этапа были благоприятны для формирования продуктивной озерной системы, развитию в ней диатомовых водорослей.

В это же время произошло снижение продуктивности экосистемы озера (минимум  $\text{SiO}_{2\text{био}}$ ). Хотя, последующее быстрое и значительное повышение  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  означает общий сдвиг в природно-климатической обстановке системы оз. Хикушка от низко продуктивной к гораздо более продуктивной в интервале времени  $\sim 11700\text{--}10000$  л.н. Наступление благоприятных условий для развития экосистемы оз. Хикушка в этап 4 согласуется с общим потеплением климата северного полушария (рисунок 4.2.2, NGRIP  $\delta^{18}\text{O}$ ), наступлением более теплых летних сезонов из-за орбитально-обусловленного повышения летней инсоляции. Активный летний восточно-азиатский муссон (рисунок 4.2.2, Dongge  $\delta^{18}\text{O}$ ) мог способствовать увеличению общего увлажнения.

В начале этапа 3,  $\sim 10000$  л.н., снижение концентраций  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  предполагает формирование менее продуктивной системы оз. Хикушка. Позднее 8300 л.н. водная система озера становится более продуктивной. Продолжающееся на протяжении этапа 3 незначительное снижение содержания пелитовой фракции индицирует усиление гидродинамики. Около 9000 и 6500 л.н. имели место короткие события увеличения объемов поступления минерального вещества в озеро. Вероятно, как и в начале этапа 4, это было связано с эпизодами возрастания роли ливневых атмосферных осадков.

Этап 3 в развитии оз. Хикушка соответствует времени максимальной активности влажного азиатского циклона и продолжающегося роста температур воздуха в северо-атлантическом регионе (изотопные и инсоляционная шкалы на рисунке 4.2.2.).

В этап 2, позднее  $\sim 6000$  л.н., несколько снижалась гидродинамическая активность в озере, что видно из повышенного содержания тонких фракций, снижения значений МД, плотности и МВ. Это обеспечило благоприятные условия для развития диатомовой флоры в оз. Хикушка, продуцировавшей  $\text{SiO}_{2\text{био}}$ .

Этап 2 соответствует ослаблению влажного азиатского муссона, постепенному снижению температуры воздуха в северном полушарии. Похолодание климата северного полушария могло приводить к ухудшению климата в высокогорных условиях Восточного Саяна, удлинению времени существования ледового покрова воды на оз. Хикушка и усилению аутигенного процесса седиментогенеза. Этап 2 соотносится с завершением оптимума голоцена в Байкальском регионе [38].

Повышение доли крупной фракции и МД в отложениях моложе ~ 3000 лет указывает на повышенную энергию переноса терригенного вещества в оз. Хикушка, что согласуется с повышенными значениями ARM, MB в этап 1. Снижение концентраций  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  свидетельствует о формировании менее продуктивной, чем ранее, озерной системы. Этап 1 в развитии оз. Хикушка соответствует позднему голоцену, для которого в северном полушарии реконструировано резкое ослабление азиатского муссона, постепенное снижение температуры воздуха в северном полушарии (рисунок 4.2.2., изотопные и инсоляционная шкалы). В котловине оз. Хикушка в это время усилились эрозионные процессы синхронно с активизацией эрозии в этот этап и в бассейне оз. Харанур [39].

В целом, следует отметить, что постепенно снижающаяся доля глинистой фракции размерностью <5 мкм в донных отложениях оз. Хикушка на протяжении всего времени существования озера может свидетельствовать о постепенном понижении уровня воды в озере после таяния локального ледника и смены источника питания с ледникового на атмосферное. Однако снижение доли этой фракции может быть следствием постепенного сокращения длительности стояния ледового покрова озера, то есть, постепенного повышения теплообеспеченности от позднего ледниковья к настоящему времени.

Результаты изучения донных отложений оз. Енгаргинское (рисунок 4.2.3.) позволяют выделить пять этапов изменения показателей его донных отложений. Учитывая возраст основания керна, равный 14850 л.н., и количество изученных образцов, среднее временное разрешение записей плотности, влажности и  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  составляет около 40 лет, для остальных параметров – около 200 лет.

В отложениях 5 этапа (404–232 см; начиная с 14800 л.н.) накапливались преимущественно глинистый алеврит и мелкозернистый песок, в которых преобладала крупная фракция минерального зерна размерностью >100 мкм. Здесь же отмечена высокая плотность осадка, а показатели ARM, MB достигают пиковых значений до  $200 \cdot 10^{-4}$  А/м,  $1370 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ, соответственно, в слое возрастом 12680 лет.

Возраст этапа 4, когда происходила аккумуляция торфа, не установлен. Даты 5400 и 4075 л.н. определяют лишь возраст слоя торфа с высокими значениями ООВ и самыми низкими – остальных измеренных показателей.

Донные отложения этапа 3 (189–142 см) представлены биогенно-терригенными илами, насыщенными створками диатомовых водорослей. В этом слое отмечен максимум обилия фракции минерального зерна размерностью 5–10 мкм и >5 мкм. Значения ООВ

понизились по сравнению с предыдущим этапом. Содержания  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  резко и многократно возросли.

Отложения этапа 2 (142–71 см) представлены глинистым алевритом со слоями мелкозернистого песка, в которых отмечено резкое повышение крупной фракции, ПО, МВ, АРМ и снижение значений ООВ и  $\text{SiO}_{2\text{био}}$ . Возраст нижней границы этого этапа прямым датированием не определялся, а возраст его верхней границы составляет ~ 3500 л.н.

В этап 1 (71–0 см, последние ~ 3500 лет) в оз. Енгаргинское накапливались биогенно-терригенные илы, насыщенными створками диатомовых водорослей. В этом слое отмечено повышение обилия мелких фракций размерностью < 5 мкм и в 5–10 мкм. Значения ООВ и  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  многократно возросли по сравнению с предыдущим этапом.

Результаты комплексного изучения донных отложений оз. Енгаргинское позволили реконструировать пять этапов изменения гидродинамических условий в самом озере и природной среды в его бассейне за последние 14800 лет (рисунок 4.2.3).

В 5 этап (404–232 см; начиная с 14800 л.н.) отмечено периодическое повышение доли фракции песка до максимальных значений в интервале 300–270 см, что свидетельствует о периодах повышенной энергии переноса минерального вещества в относительно мелком водоеме. Высокие значения МВ и АРМ характеризуют обильное поступление в озеро тонких магнитных минералов. Возможно, в этот этап в озере преобладал аллювиальный режим седиментогенеза. Проточный режим водотока в точке бурения препятствовал аккумуляции ООВ и диатомовых водорослей.

Как было указано выше, возраст торфяной толщи, сформированной в 4 этап, не установлен. Мы предполагаем перемещение слоя торфа в результате денудации торфяника, находившегося в области сноса. При затоплении берегов озера мог сформироваться торфяной плавучий остров, который в какой-то момент затонул в месте проведения буровых работ. Мы склоняемся именно к этому сценарию из-за наличия резких литологических границ, а также снижения доли песчаной фракции в предшествующем интервале (260–232 см), что означало подъем уровня воды из-за повышения уровня атмосферного увлажнения. Это и могло привести к усилению денудации и размыву береговых торфяников. Дата 4070 л.н. позволяет предполагать, что размыв торфа мог произойти примерно в это время.

Если это так, то увеличение водности реки ~4070 л.н. выглядит вполне вероятным, поскольку это время соотносится с наступлением частых событий холодных и снежных зимних сезонов неогляциального периода, и существует множество палеоклиматических



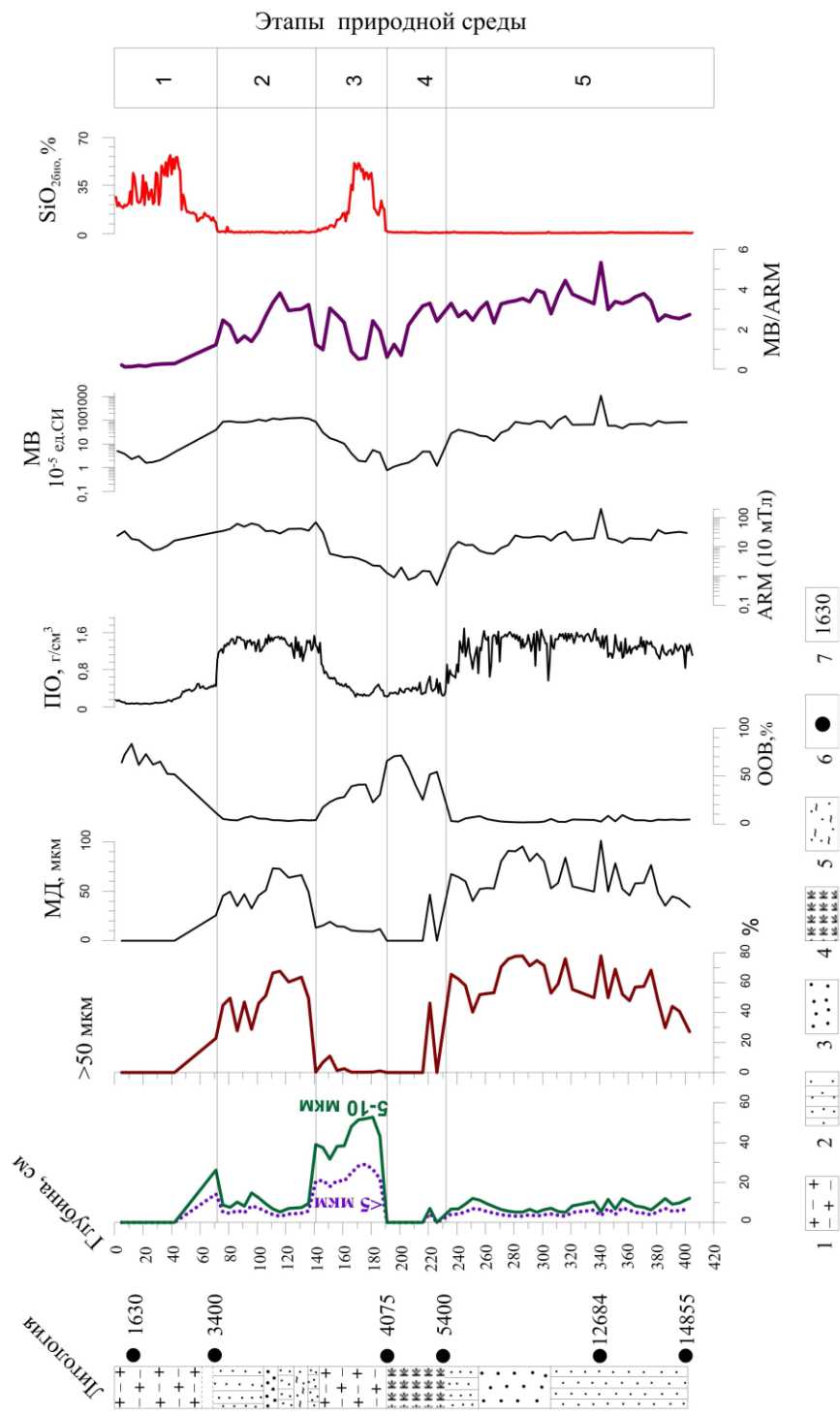


Рисунок 4.2.3 – Обобщающий график избранных записей из донных отложений оз. Енгаргинское. 1 – биогенный или с диатомовыми; 2 – глинистый алеврит; 3 – мелкозернистый песок; 4 – торф. 5 – мелкозернистый песок с растительными остатками; 6 – положение датированных уровней; 7 – калиброванные значения возраста

свидетельств, указывающих на то, что для периода ~4400–4000 л.н. отмечено похолодание, повышение увлажнения и продвижение ледников в горах юго-восточного Алтая ~4900–4200 л.н. [40], неогляциальный рост Гренландского ледникового щита [41].

В этап 3 (189–142 см) максимальное содержание тонкой и минимальные значения МД, первый максимум  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  предполагают смену типа осадконакопления, повышение уровня воды и формирование озерных биогенно-терригенных илов и развитие продуктивной водной системы. Низкие значения MB, ARM означают слабое поступление минерального вещества в донные отложения, удаленные от берега.

Этап 2 (142–71 см) характеризуется аккумуляцией глинистого алеврита с прослоями мелкого песка с высокими значениями MB, ARM, характеризующими снижение уровня воды в озере из-за наступления менее влажных условий. Возраст нижней границы этого этапа прямым датированием не определялся, а возраст его верхней границы может быть ~3400 л.н.

В I этап (71–0 см, последние 3500 лет) оз. Енгаргинское представляло продуктивную озерную систему, в которой формировались биогенные илы. Низкие значения MB, ARM свидетельствуют о незначительном привносе в озеро минерального вещества из-за отсутствия значительных паводков.

Комплексный анализ донных отложений оз. Хикушка и оз. Енгаргинское позволил впервые для исследуемого региона охарактеризовать динамику гидрологического режима и особенности седиментации и реконструировать изменения природной среды в позднем ледниковье и голоцене. Результаты показали, что дегляциация в подгорно-равнинных районах Тункинской долины и в высокогорной зоне Восточного Саяна, начавшаяся ~14800 л.н. и ~13800 л.н., соответственно, была обусловлена повышением уровня летней инсоляции и температуры воздуха северного полушария в GI-1.

Высокое временное разрешение и надежная возрастная модель записей из оз. Хикушка позволяет сравнивать их с ключевыми палеоклиматическими архивами из северо-атлантического и северо-тихоокеанского регионов. Соответствие между записями из оз. Хикушка и высокоразрешающими изотопными записями из этих отдаленных регионов подразумевает, что горные районы юга Восточной Сибири, несмотря на положение в глубине евроазиатского континента, быстро отвечали на глобальные изменения природной среды.

Начало аккумуляции озерных илов в оз. Хикушка ~11700 л.н. соответствует наступлению межледниковых условий голоцена, означая, что локальный ледник к этому времени растаял. Доминирование в отложениях оз. Хикушка глинистой и иловой фракций

указывает на сравнительно невысокую активность гидродинамического режима на протяжении всего процесса седиментации, предполагая его непрерывное функционирование в качестве глубоководного водоема. Постепенное снижение мелких фракций от основания к кровле разреза свидетельствует о постепенном снижении уровня воды в озере. Коротковременные эпизоды привноса в озеро крупной фракции ок. 9000, 8200, 6500, 2000 л.н., скорее всего, соответствуют коротким событиям ливневых атмосферных осадков, отражая высокую чувствительность озерной геосистемы к изменениям климата не только в тысячелетнем, но и в более коротком временном масштабе. Изменения значений MB и ARM в донных отложениях озер могут быть зависимы от региональной вулканической активности, а также характеризовать вариации относительной продуктивности водоемов, резко снижаясь в результате разбавления биогенным кремнеземом содержания в осадках магнитных минералов.

Характер отложений оз. Енгаргинского свидетельствует о доминировании в водоеме в позднеледниковье, раннем и среднем голоцене озерно-аллювиального режима седиментации.

Первые результаты изучения гранулометрических, петромагнитных параметров донных отложений озер Восточного Саяна показали их высокий потенциал для дальнейшей работы с кернами из озер этого региона. Планируемое временное разрешение подобных записей улучшит наше понимание взаимодействия системы климат-гидрологический режим озер и предоставит ценнейшую научную информацию для рационального использования водных ресурсов.

## **5 Тефрохронологическое изучение позднеплейстоцен-голоценовых вулканических извержений в долине р. Жом-Болок (Восточный Саян)**

Жом-Болокское вулканическое поле расположено в одном из главных орографических узлов горной системы Восточного Саяна с альпинотипными чертами рельефа (абс. выс. более 3000 м) и современным оледенением. 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.

Решение проблемы датирования молодых вулканических комплексов Жом-Болока стало возможным на основе изучения природных архивов, хранящих непрерывную историю извержений. Вблизи главного центра вулканических извержений Жом-Болока расположено множество разнообразных по условиям формирования и функционирования озерных морфолитосистем, в т.ч. оз. Каскадное-1 (рисунок 5.1), которое нами и было выбрано в качестве объекта тефрохронологических исследований.

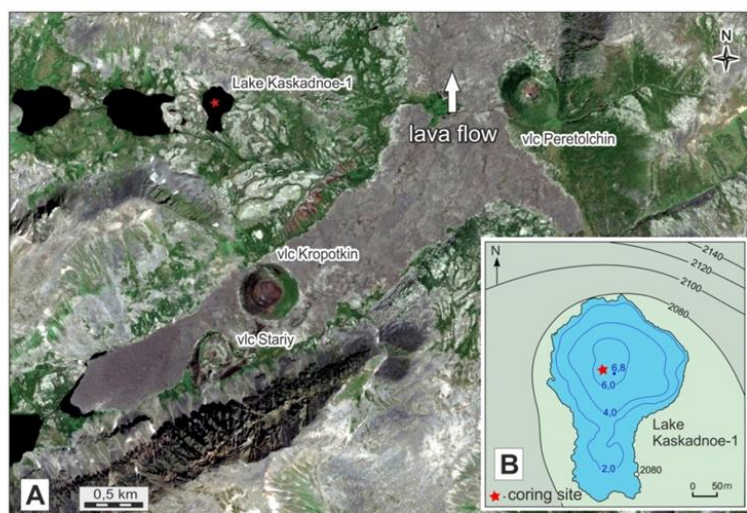


Рисунок 5.1 – Эпицентр долинных излияний лавовых потоков Жом-Болок – верховья пади Хи-Гол (А), с использованием космического снимка Landsat, и батиметрическая схема котловины оз. Каскадное-1 (В)

Буровые работы на оз. Каскадное-1 были предварены детальным исследованием рельефа дна водоема с использованием трехмерного 6-лучевого эхолота Humminbird Matrix 748x3D с целью построения батиметрической схемы. 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 образцов было 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 см<sup>2</sup>, при этом учитывались обломки размером от 10 до 100 мкм.

Исследование силикатных минералов вулканических стекол с целью изучения их состава проведено методом рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа 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 Каскадное-1 позволило выделить две основные литологические единицы (рисунок 5.2). Верхняя часть отложений в интервале 0–144 см представлена осадками постгляциального озера - биогенно-терригенным илом темно-оливкового цвета с присутствием створок диатомовых водорослей. По направлению от кровли к основанию интервала наблюдается значительное снижение концентрации створок диатомовых. Нижняя часть керна (на глубине 144–150 см) представлена плотной алевритистой глиной светло-серого цвета. Это отложения прогляциального (приледникового) водоема.

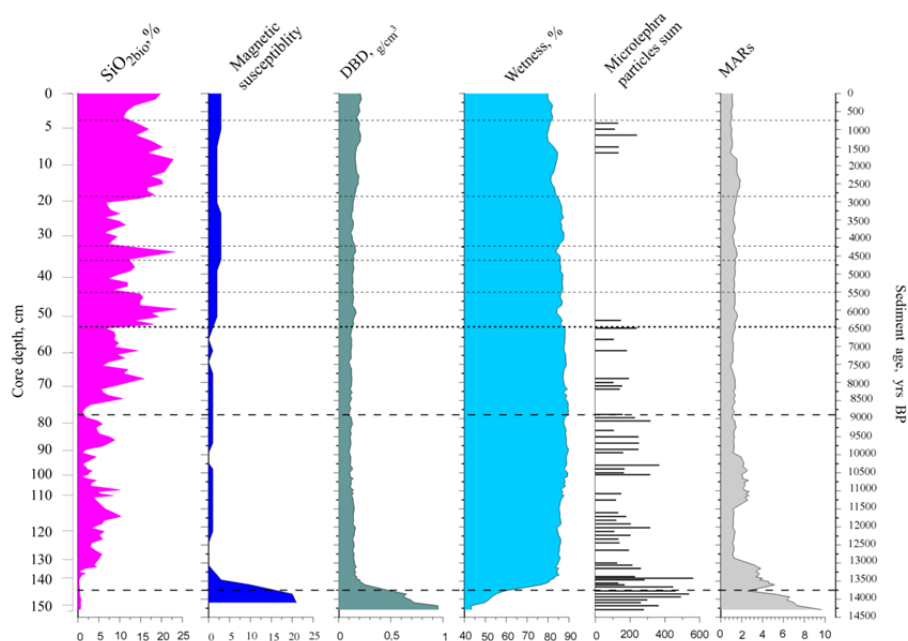


Рисунок 5.2 – Основные свойства отложений оз. Каскадное-1: содержание биогенного кремнезема, магнитная восприимчивость, плотность, влажность, содержание частиц микротепры и график средней скорости осадконакопления

Литология керн и возрастная модель предполагают непрерывную аккумуляцию отложений за последние 14290 лет и отсутствие явлений криотурбации донных отложений, возникающих при полном промерзании водоема.

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 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.

Самая высокая концентрация частиц микротефры содержится в слое алевритистых глин, сформированных 14300–13770 л.н. (Рисунок 5.3), высокие содержания микротефры характерны и для нижних слоев биогенно-терригенных илов (13770-13300 л.н.).

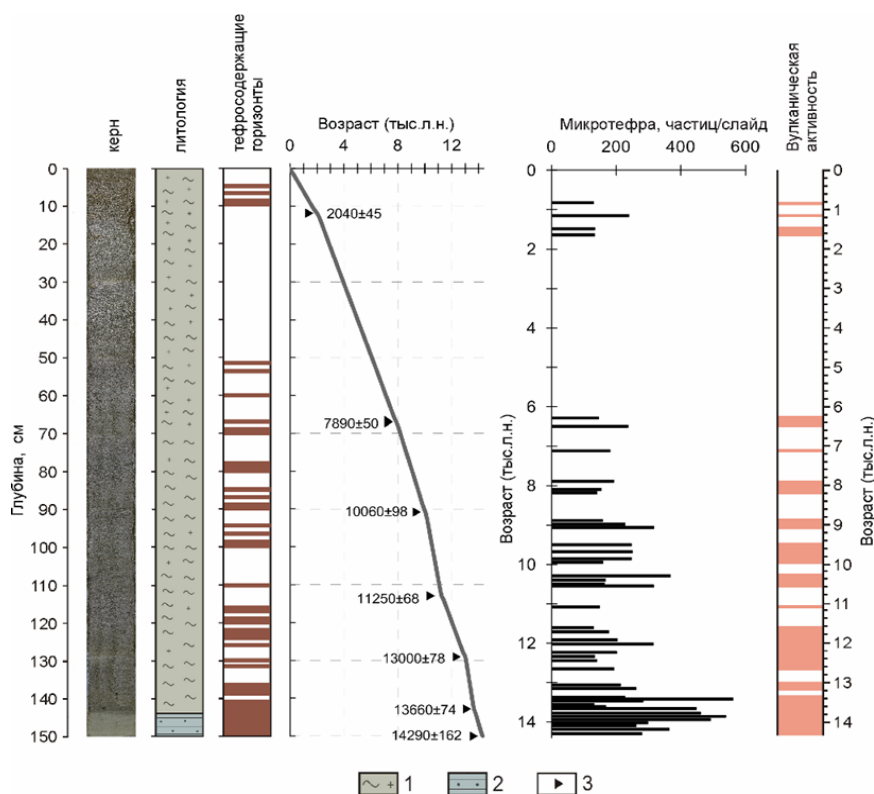


Рисунок – 5.3. Тефростратиграфия отложений оз.Каскадное-1 и хронология вулканической активности в долине р.Жом-Болок. 1 – биогенно-терригенный ил, 2 - алевритовая светло-серая глина, 3 – точки отбора проб на  $C^{14}$  датирование

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.

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. Возрастная модель предполагает, что эта разгрузка произошла не позднее 14300 л.н.

С 13300 л.н. происходит ослабление интенсивности проявления эксплозивной деятельности, что фиксируется поступлением меньшего количества микрочастиц тефры в озерные отложения. Однако извержения все еще продолжаются с небольшими перерывами до 6280 л.н. 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.

## **6 Комплексное изучение опорного разреза верхнего кайнозоя Тологой (Западное Забайкалье)**

Разрез кайнозойских отложений горы Тологой расположен в Иволгинской впадине на левом берегу р. Селенги, к юго-западу от гор. Улан-Удэ. Разрез был открыт и впервые описан семьдесят лет назад, но до сих привлекает внимание исследователей уникальностью своих палеонтологических комплексов и хроно-стратиграфического строения. В настоящее время он позиционируется в качестве одного из ключевых опорных разрезов верхнего кайнозоя юга Восточной Сибири. Среди наземных разрезов Тологой содержит наиболее полную последовательность континентальных отложений от начала позднего плиоцена до голоцена. В течение ряда последних лет нами велись работы



по изучению отложений разреза Тологой с использованием комплекса гранулометрических, биостратиграфических и палеоэкологических, литохимических, петро- и палеомагнитных методов и подходов с целью уточнения и надежного обоснования его хроно-стратиграфии, детализации литолого-фациального строения разреза, а также реконструкции условий и особенностей осадконакопления.

Отложения разреза Тологой четко делятся на три разновозрастных толщи (Тологой 1 – Тологой 3) (рисунок 6.1). Каждая из толщ залегает на подстилающих породах с размывом, а средняя толща отделяется от верхней, кроме того, еще и горизонтом погребенной почвы.

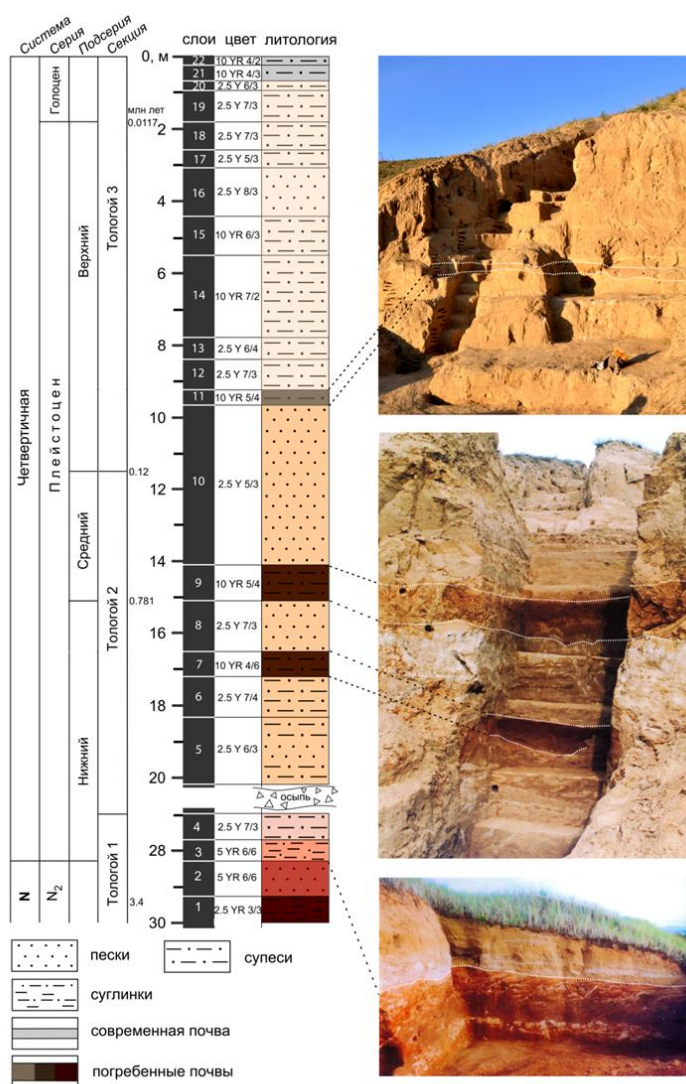


Рисунок 6.1 – Литолого-стратиграфическое строение разреза Тологой. На фотографиях показаны границы погребенных почвенных горизонтов, согласно [42]



Результаты гранулометрического анализа отложений (рисунок 6.2) позволили выделить следующие особенности седиментации в разрезе Тологой:

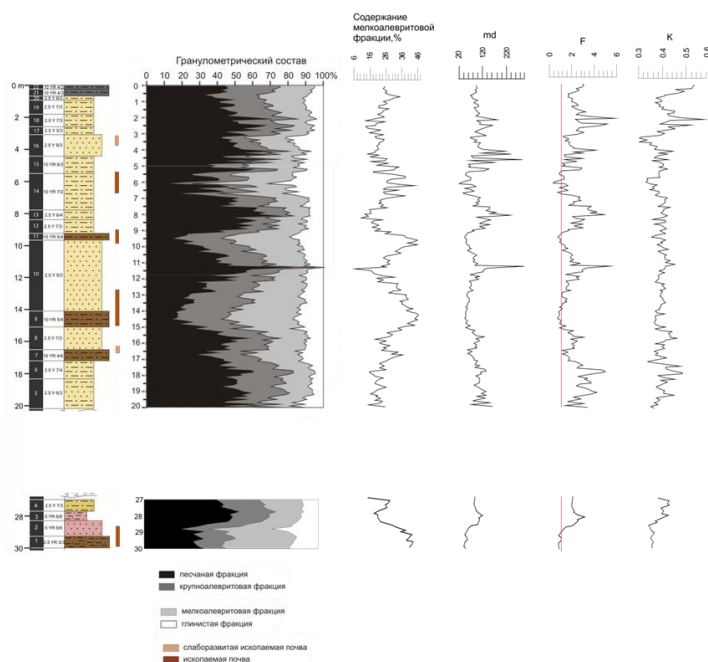


Рисунок 6.2 – Гранулометрический состав отложений разреза Тологой. F - динамический фактор, md – средний размер зерна, К - показатель дисперсности отложений. В литологической колонке коричневым цветом выделены погребенные почвенные горизонты, установленные ранее [42], справа от колонки показана уточненная стратиграфическая позиция ископаемых почв, выделенных в настоящих работах по комплексу гранулометрических и петромагнитных свойств отложений разреза

– циклическое осадконакопление, прослеживаемое по поведению всех фракций, но особенно четко – по изменению содержания песка. В пределах толщ Тологой 2 и Тологой 3 выявлено 4 основных цикла, каждый из которых заканчивается формированием почвенных горизонтов;

– большая часть отложений имеет сложный гранулометрический состав, представленный различными, но часто равными или близкими по количеству, популяциями зерен, основными являются зерна различной песчаной размерности.

В эоловом литопотоке такие фракции, как правило, доставляются путем волочения и сальтации на небольшие (до первых км) расстояния. Второй по объему популяцией можно считать зерна крупноалевритовой размерности, основным способом поступления которых является сальтация. Источником зерен такой размерности может быть область сноса в нескольких километрах (первых десятков км) от участка седиментации. Третью популяцию составляет мелкоалевритовая фракция. Четвертая популяция по размерам

зерен классифицируется как пелитовая (глинистая) фракция. Изменения содержания глинистой фракции отражают влияние нескольких процессов. В палеопочвах ее повышенное содержание связано с постгенетическим преобразованием отложений в периоды педогенеза и криогенеза и, как следствие, с образованием глинистых минералов. По объему пелитовая фракция в ископаемых почвах составляет 4-7 % и, соответственно, является значимым компонентом в ансамбле зерен, составляющих изученные отложения. При делювиальных процессах происходит вынос тонкозернистого материала под действием процессов плоскостного смыва, что приводит к пониженной концентрации пелитовой фракции в делювиальных слоях.

– осадочный материал транспортировался на участок седиментации в основном из ближнего источника. На этапах потеплений и формирования почвенных горизонтов порывы ветра снижались, уменьшалась сила ветрового потока, в этих условиях на первый план выходили дальние и средней дальности источники сноса осадочного материала. В периоды наиболее интенсивных педогенных процессов поступление песчаного материала снижалось (рисунок 6.2), преобладали биохимические постседиментационные преобразования отложений *in situ*;

– отложения толщи Тологой 2 (уровни 20–10 м) формировались в относительно более спокойных ветровых условиях, чем отложения толщи Тологой 3;

– в гранулометрическом составе проявлена специфика осадконакопления, почвообразования с криогенным преобразованием субстрата и делювиального перераспределения материала по склону, выраженная в закономерном изменении гранулометрических параметров. Учитывая гранулометрический состав, генезис отложений толщ Тологой 2 и Тологой 3 можно интерпретировать как делювиальный (или эолово-делювиальный, вторично делювиальный).

Анализ валового химического состава отложений Тологойского разреза показывает, что описываемые породы характеризуются малыми вариациями содержаний петрогенных окислов, за исключением CaO и CO<sub>2</sub>, и микроэлементов (за исключением хрома). Вариабельность петрохимических модулей невысока, что свидетельствует об интенсивном перемешивании и гомогенизации отложений при протекании склоновых процессов. Высокие значения ЩМ и НКМ и пониженные значения ГМ указывают на преобладание в отложениях кварца и полевого шпата на общем фоне низкого содержания глинистых минералов. О значительном количестве полевых шпатов в отложениях свидетельствуют и повышенные (более 0,4) значения НКМ.

Исследованные породы по средней величине ГМ (0,29) могут быть отнесены к гипогидролизатам, т.е. слабо преобразованным процессами выветривания образованиям. НМ отражает течение процессов химического выветривания и вызревания поступающего в области осадконакопления материала. Он тем ниже, чем выше степень химической дифференциации вещества на палеоводосборах [43]. Изученные нами отложения характеризуются крайне низкой степенью химической дифференциации, значения НМ варьируют от 0,17 до 0,26 (значение модуля для слабой степени химической дифференциации считается большим 0,03). Сопоставление значений модулей ЦМ, НМ и КМ показывает, что для отложений разреза свойственно преобладание плагиоклазов, а не калиевых полевых шпатов. Индекс зрелости осадков IСV изменяется от 0,8 до 1,3, что может служить доказательством преобладания в отложениях неглинистых силикатных минералов.

Вариации значений основных литохимических индикаторов палеоклимата СIA, СIW и PIA свидетельствуют о преобладании аридных и субаридных обстановок осадконакопления. Максимальные значения индексов СIW и PIA характерны для горизонтов палеопочв.

Изменение петрохимических модулей и геохимических индексов по разрезу показано на рисунке 6.3. Вариации коэффициента ТМ по разрезу свидетельствуют о накоплении осадков нижней толщи (Тологой 1) в условиях сухого аридного климата, а средней толщи (Тологой 2) – в условиях более холодного и влажного климата с усилением аридизации климата при накоплении осадков верхней части разреза (Тологой 3).

Распределение ТМ по разрезу согласуется с изменением гранулометрического состава пород, во-вторых, согласуется с изменением СIA и IСV (рисунок 6.3). Средние величины химического индекса изменения СIA в изучаемых отложениях составляют 65, варьирует показатель от 49 до 69, что также свидетельствует о незначительной степени изменения пород на палеоводосборах. Изменения СIA и IСV синхронны, увеличение значений СIA при одновременном уменьшении IСV маркирует периоды гумидизации климата.

Значения АМ варьируют от 0,19 до 0,25, что свидетельствует о незначительном фракционировании материала в процессе транспортировки и слабом его преобразовании в процессе выветривания. Распределение петрохимических модулей и индексов по разрезу показывает слабую геохимическую стратификацию. Это может быть результатом проявления процессов постседиментационного преобразования осадков в условиях криогенеза. Преобразование осадка в результате криогенных воздействий определяется в

основном его исходным составом (наличием устойчивых к криогенному выветриванию минералов и наличием активных компонентов: коллоидных форм соединений железа, алюминия и марганца, карбонатов, растворимых солей и др.), а также присутствием органического вещества и природой порового раствора. Глинистые минералы отличаются высокой дисперсностью, большой удельной поверхностью, гидрофильностью, способностью к адсорбции и ионному обмену. Очевидно, что химический состав глинистой фракции дисперсных отложений в общем будет отражать степень криогенных изменений осадка.

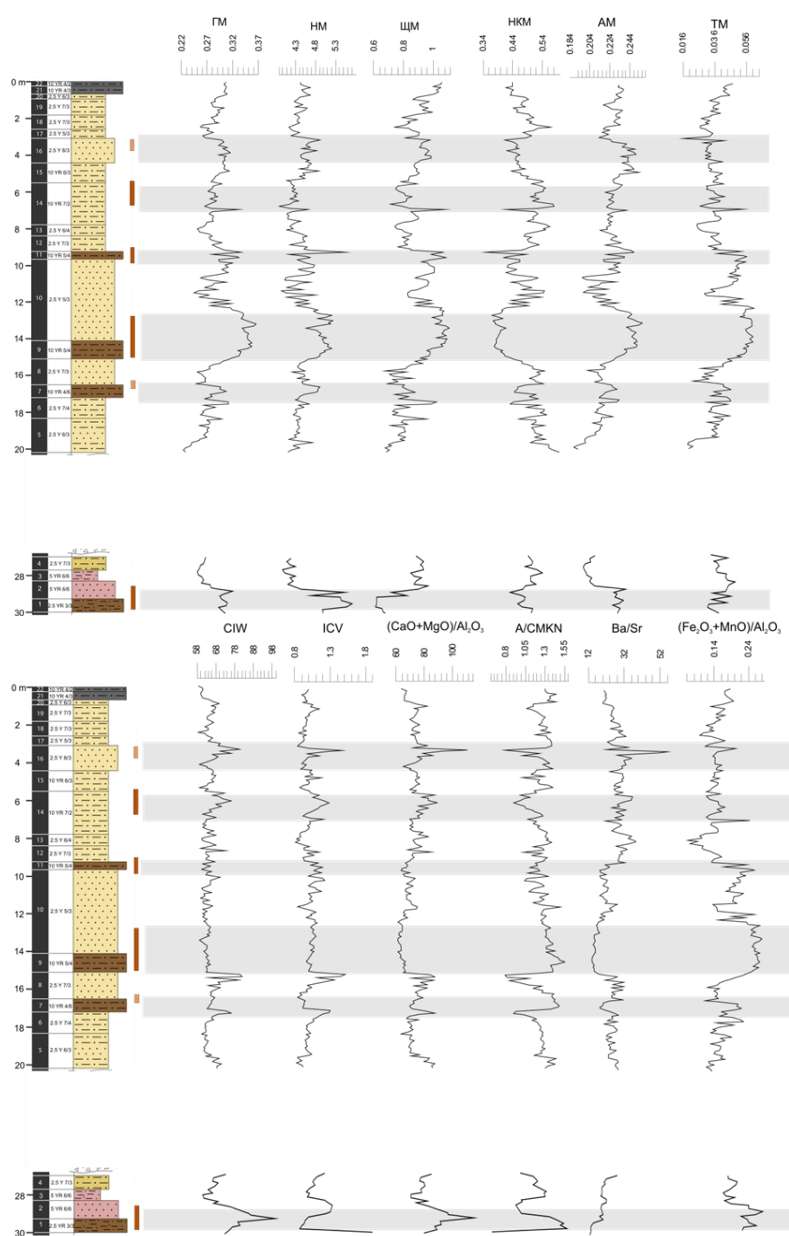


Рисунок 6.3 – Распределение в геохимическом профиле разреза Тологой петрохимических модулей (вверху) и индексов (внизу)

Проведенный анализ палеомагнитных свойств отложений разреза Тологой позволил получить следующие результаты. В процессе размагничивания переменным магнитным полем установлено, что во всех образцах естественная остаточная намагниченность состоит из двух компонентов: низкокоэрцитивного, разрушающегося в полях от 10 до 30 мТл, и высококоэрцитивного, который, как правило, является характеристическим компонентом. Значительная часть направлений LCC компонента группируется вокруг направления современного магнитного поля места отбора и, по-видимому, представляет собой сумму древней и лабораторной вязкой намагниченностей. Направление ChRM имеет как прямую, так и обратную полярность. В зависимости от величины LCC и его соотношения с величиной ChRM различаются и результаты размагничивания. При высоких  $>30$  мА/м значениях NRM наблюдается хорошая сохранность ChRM. Распределение направлений ChRM для верхней и нижней частей разреза по глубине и изменение их угловых параметров представлено на рисунке 6.4. По преобладающему направлению ChRM разрез делится на две части – верхнюю (до глубины 11,1 м), которая имеет преимущественно прямую полярность, и нижнюю (ниже 11,4 м), характеризующуюся, в основном, обратной полярностью.

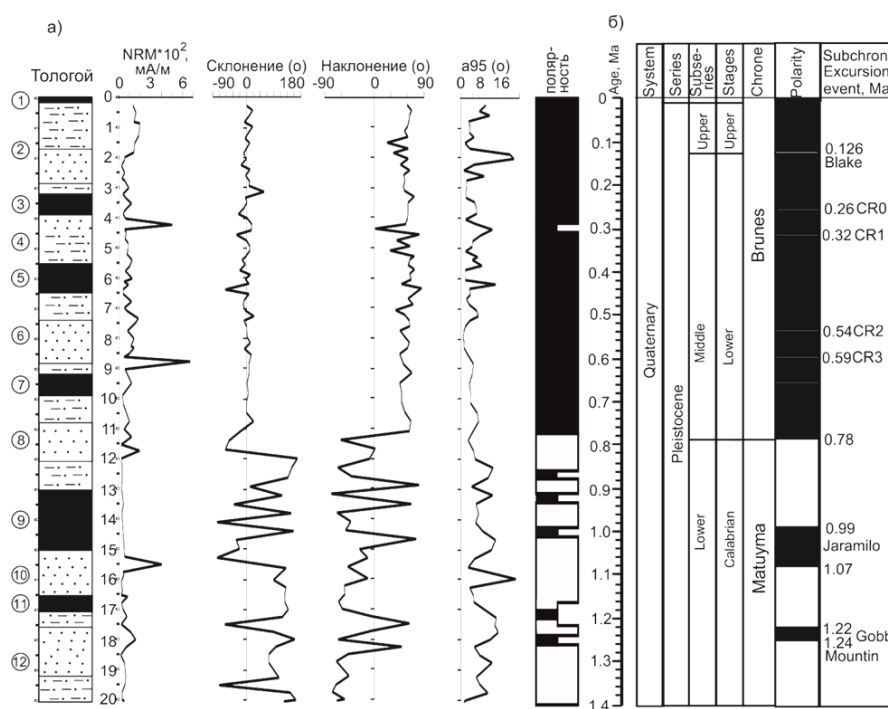


Рисунок 6.4 – Магнитополярная характеристика отложений разреза Тологой (а). В колонке справа черным цветом обозначена положительная полярность, белым – отрицательная.

MAD – максимальный угол отклонения вектора. Международная шкала полярности, согласно [45] (б).

Отложения верхней части формировались в течение хрона прямой полярности (Брюнес), что соответствует среднему и позднему плейстоцену, и нижнюю часть, время образования которой соответствует хрону обратной полярности Матуяма. Такое разделение вступает в противоречие с ранее опубликованными палеомагнитными данными. Согласно [44] граница Матуяма/Брюнес проходит либо по кровле знакопеременной зоны на глубине 12,5 м либо по её подошве на глубине 14,5 м. Однако поскольку подобная знакопеременная зона обнаружена нами в интервале глубин 13–14 м, мы предполагаем, что граница Матуяма/Брюнес попала в неопробованный авторами интервал 11–12 м [44] и была просто пропущена. Поэтому, мы считаем установленное нами положение границы Матуяма/Брюнес на глубине 11,1 м более достоверным, по крайней мере, с точностью  $\pm 10$  см.

Положение границы Матуяма/Брюнес позволяет предложить некоторые возрастные оценки этапов формирования разреза. Интервал с нарушенной магнитной текстурой (глубина 0–2,5 м), на нижней границе которого происходит резкая смена знака корреляции между петромагнитными и гранулометрическими характеристиками, вероятно, соответствует голоцену. По крайней мере, это не противоречит палеонтологическим данным и абсолютным датам [42].

Граница между верхним и средним плейстоценом по палеонтологическим данным проходит на уровне  $\sim 9$  м [42], что соответствует расчленению разреза Тологой по петромагнитным данным и резкой смене знака корреляции между петромагнитными гранулометрическими данными. С другой стороны, граница Матуяма/Брюнес, соответствующая границе нижнего и среднего плейстоцена, находится на глубине 11,1 м, что подразумевает, что отложения среднего плейстоцена в разрезе Тологой существенно редуцированы.

Нижнюю возрастную границу формирования осадков разреза можно оценить на основе сопоставления с соседними регионами. Сходная смена «аляскинского» механизма, характерного для позднего плейстоцена в Средней Сибири (разрез Куртак) [46] на «сибирский» с выраженным педогенным вкладом (разрез Государев Лог) наблюдается непосредственно над границей Матуяма/Брюнес [47]. С другой стороны, наши предыдущие исследования раннеэоплейстоценовых лессово-почвенных отложений в разрезе Тагай на о. Ольхон показали, что здесь магнитные свойства ископаемых почв фиксируют палеоклиматические изменения в соответствии с «китайским» или «педогенным» механизмом [48]. В отложениях нижней части разреза Тологой фиксация палеоклиматического сигнала происходила по «сибирскому» механизму,

предполагающему более суровые климатические условия, и, таким образом, нижняя часть разреза моложе нижней половины калабрия, но древнее границы Матуяма/Брюнес, и таким образом, соответствует верхней половине калабрия. Следовательно, разрез на склоне горы Тологой формировался в течение всего плейстоцена, с четкой границей между верхним-средним и нижним плейстоценом. В верхней части фиксируются многочисленные перерывы осадконакопления. Снизу возраст можно ограничить верхней половиной калабрия (до субхрона Кобб Маунтин), при этом в самой нижней части разреза (16–20 м) также наблюдаются стратиграфические перерывы.

В итоге, нами выполнен синтез полученных ранее и новых результатов петро- и палеомагнитных, литолого-стратиграфических, геохимических и палеонтологических исследований опорного разреза верхнего кайнозоя Тологой (Западное Забайкалье). Ревизионные работы по палеомагнитному анализу позволили пересмотреть положение в разрезе магнитополярной границы Матуяма/Брюнес, уточнить возрастную модель формирования отложений и его общее стратиграфическое расчленение. Выполнена реконструкция факторов, условий и особенностей осадконакопления. Выявлено 4 основных цикла осадконакопления, каждый из которых заканчивается формированием педокомплексов. На этапах потеплений и формирования почвенных горизонтов на первый план выходили дальние и средней дальности источники сноса осадочного материала. В периоды наиболее интенсивных педогенных процессов преобладали биохимические постседиментационные преобразования отложений *in situ*, что находит отражение в изменении их химического состава. Новый комплекс полученных данных позволил детализировать представления о литолого-фациальном строении разреза, а также установить хроно-стратиграфическое положение перерывов в осадконакоплении.

## **7 Изучение компонентного состава газа и изотопного состава углерода метана подводного нефтегазового проявления Горевой утес (оз. Байкал)**

Естественные выходы газа на Байкале широко распространены по всей акватории озера, как в мелководной, так и глубоководной его части [49–51]. Известны также подводные высачивания нефти, которые сосредоточены у юго-восточного побережья Байкала напротив устья рек Стволовая, Большой и Малой Зеленовской. Летом присутствие нефти здесь маркируются нефтяными пленками на поверхности воды, а весной пятнами нефти на льду. Эти нефтепроявления подробно изучены [52–54]. При эхолотировании дна озера в этом районе акустических аномалий в виде газовых “факелов” нами не обнаружено.

В 2005 году в Центральной котловине Байкала (глубина воды порядка 900 м) на поверхности воды были обнаружены многочисленные нефтяные пятна диаметром до 1 м, образующиеся при растекании всплывающих капель нефти. На экране эхолота четко фиксировалась подводная акустическая аномалия высотой до 500 м. Пробы воды, отобранные в области факела, имели высокую концентрацию метана, что доказало его газовую природу. Таким образом, на Байкале впервые обнаружен район, где со дна озера одновременно происходит разгрузка нефти и газа. Новое нефтегазовое проявление получило название “Горевой утес”.

В дальнейшем этот объект был всесторонне исследован, в том числе и с использованием глубоководных обитаемых аппаратов Мир. Получены первые данные по изотопным характеристикам метана [55]. Проведено изучение состава нефти [53], [56] и биоты [57, 58].

В данном отчете обобщены результаты исследования углеводородных газов этого уникального для Байкала района. Работы проводились в содружестве с Егоровым А.В. (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН), Хачикубо (Kitami Institute of Technology) и Хлыстовым О.М. (Лимнологический институт СО РАН).

Установлено, что изучен компонентный состав и изотопный состав углерода УВГ подводного нефтегазового проявления Горевой утес, где одновременно происходит разгрузка нефти и газа.

На основании полученных данных установлено, что метан в осадках этого района Байкала имеет термогенной происхождение. Вместе с тем он имеет низкую примесь  $C_2+$ , что нехарактерно для газа ассоциированного с нефтью. Сделано предположение, что такой газ образуется при дегазации нефти в процессе высачивания на поверхность дна.

Дополнительно к снижению содержания  $C_2+$  приводит ряд вторичных процессов, в первую очередь молекулярное фракционирование при перемещении газа в приповерхностные слои осадка. Определенный вклад в формирование компонентного состава УВГ вносит и анаэробная биodeградация гомологов метана.

В соответствии с планами НИР в 2020 году изучен компонентный состав и изотопные характеристики ( $\delta^{13}C$ ;  $\delta D$ ) метана и его гомологов в некоторых термальных источниках Байкальской рифтовой зоны из термальных источников Котельниковский, Змеиный и Горячинск, расположенных в прибрежной зоне озера Байкал.

Газ в источнике Котельниковский ( $\delta^{13}C-C_1 = -61.5\text{‰}$ ;  $\delta^{13}C-C_2 = -56.6\text{‰}$ ;  $\delta^{13}C-C_3 = -34.6\text{‰}$ ) имеет микробное происхождение, а относительно высокие значения  $\delta D = -230\text{‰}$



позволяют предполагать, что его образование в основном было связано с восстановлением  $\text{CO}_2$ .

В источнике Змеиный зафиксированы аномально высокие значения  $\delta^{13}\text{C}$  (до +11‰) и  $\delta\text{D}$  (до +267‰). В источнике Горячинск значение  $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_1 = -40.2\text{‰}$  можно рассматривать как признак термогенного происхождения метана, но в качестве примеси в газе содержится этан микробного происхождения. Изотопные характеристики газа, зафиксированные в источниках Змеиный и Горячинск, нехарактерны ни для одного из известных генетических типов метана.

Показано, что формирование такого газа связано с фракционированием изотопов углерода и водорода в процессе окисления микробного метана с изотопными характеристиками похожими на метан из источника Котельниковский.

## **8 Исследование значения атмосферного транспорта на формирование количественного и качественного состава органического вещества природного происхождения, стойких органических загрязнителей и хлорорганических пестицидов в Байкальской рифтовой зоне**

В 2016 г. было изучено значение атмосферного транспорта в формировании особенностей состава органического вещества природного и антропогенного происхождения (С, N, P, хлорофилл-а, полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды) в донных отложениях Хубсугула [59–62].

Для этого были рассмотрено распределение ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе, донных отложениях и почвах оз. Хубсугул и Прихубсугулья [59, 60] (рисунок 8.1). Найдены количественные и качественные изменения содержания ПХБ и ХОП в АВ, характеризующие влияние как природных (в 2011–2015 гг. – изменение температур в течении года и среднегодовых температур за исследуемый период времени), так и антропогенных факторов (в 2008–2010 гг. – действие локальных источников и/или атмосферный перенос с территории сопредельных государств). Наблюдается тенденция к увеличению концентраций ГХБ и уменьшению концентрации ГХЦГ и ДДТ в АВ Прихубсугулья. Достоверного изменения уровней суммы ПХБ в 2011–2015 гг. не найдено.

Изменение относительного качественного состава ПХБ и ХОП предполагает различные источники их поступления в АВ Прихубсугулья в период исследования. Повышение концентраций в 2008–2010 гг. предполагает интенсивное поступление ПХБ и ДДТ в АВ Прихубсугулья как в результате действия неизвестных локальных источников, так и влияния атмосферного переноса с сопредельных территорий. Концентрации ПХБ и

ХОП в АВ Прихубсугуля в 2011–2015 гг. можно рассматривать как уровни вне действия возможных локальных источников.

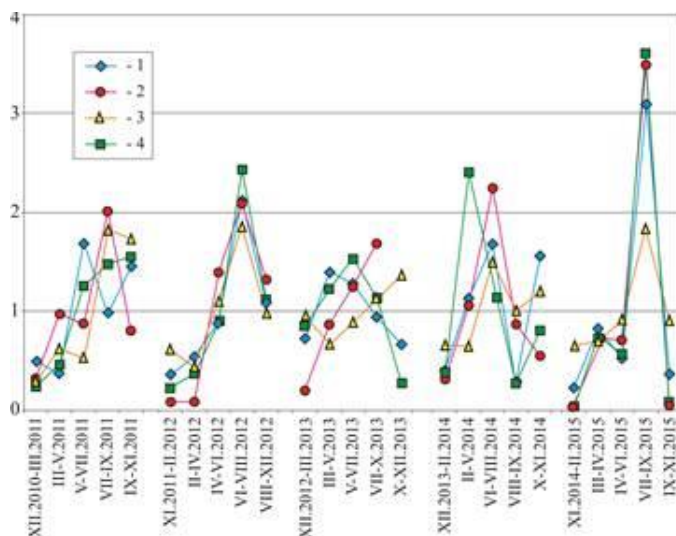


Рисунок 8.1 – Сезонное распределение ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе в северном Прихубсугулье в 2011–2015 гг. (концентрации в каждый период пробоотбора, отнесенные к соответствующей среднегодовой) (1 – сумма ПХБ, 2 –  $\gamma$ -ГХЦГ, 3 – ГХБ, 4 – p,p'-ДДЭ)

Результаты моделирования потоков ПХБ и ХОП в системе АВ – почва на территории стационара в пос. Ханх и его окрестностях показывают преобладание процессов осаждения над процессами испарения.

Влияние атмосферного переноса на содержание ПХБ и ХОП в объектах окружающей среды Прихубсугуля и оз. Хубсугул рассмотрено с использованием факторного анализа. Распределение ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе определяется в разные периоды исследования двумя факторами (I и III). Первый фактор оказывал большее влияние в 2008–2010 и части 2011 года, когда концентрации ПХБ и ДДТ в воздухе были наибольшими, и в отдельные периоды 2014 года, а третий фактор – в периоды наименьших концентраций, которые соответствуют или даже ниже концентраций, найденных в фоновых районах мира. Т.е., третьим фактором, вероятно, является глобальный и региональный атмосферный перенос ПХБ и ХОП. Третий фактор оказывает влияние на содержание ПХБ и ХОП в донных отложениях озера Хубсугул.

На состав ПХБ и ХОП в почвах в черте пос. Ханх оказывает влияние второй фактор, имеющий явно локальный антропогенный характер. Остальные почвы побережья также как и атмосферный воздух в 2008–2010 гг. подвержены влиянию первого фактора, что может быть результатом перераспределения ПХБ и ХОП в системе почва – атмосферный воздух в этот период или активизацией действия дополнительного

источника ПХБ и ДДТ, оказавшего влияние на значительные территории Азии в период исследования в 2008-2010 гг. [63, 64].

Проведено также изучение вклада атмосферного переноса в биогеохимическом круговороте комплекса макрокомпонентов ОВ в оз. Хубсугул. Проведенные исследования пространственного распределения и временной изменчивости химического состава (основных ионов и компонентов трофического статуса) вод озера Хубсугул показали изменения гидрохимических характеристик вод озера Хубсугул, как под воздействием природных явлений (глобальное потепление), так и антропогенных факторов (туризм, перевыпас на пастбищах, атмосферного переноса) (рисунок 8.2).

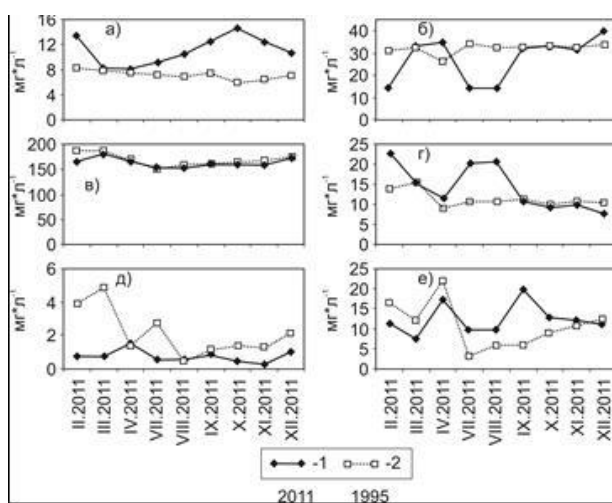


Рисунок 8.2 – Сезонные изменения компонентов ионного состава в оз. Хубсугул (1 – 2011 г., 2 – 1995 г.; а – сульфаты, б – кальций, в – бикарбонаты, г – магний, д – хлориды, е – натрий и калий)

Впервые проведено исследование сезонных изменений взвеси, хлорофилла-а, кремния, органического углерода, минеральных и органических форм азота и фосфора в водах озера. Отмечены два максимума органического вещества и минимума минеральных форм азота и фосфора весной в марте и осенью. Согласно уровню содержания компонентов трофического статуса и величин их отношений, можно сделать вывод, что доминируют разные виды водорослей (рисунок 8.3).

- На основе стехиометрического отношения C:N:P подтверждено, что лимитирующими компонентами в развитии фитопланктона являются и азот, и фосфор.

- Согласно индексу трофического состояния воды озера Хубсугул с января по апрель относятся к олиготрофному типу, в остальное время года – к мезотрофному (рисунок 8.3).

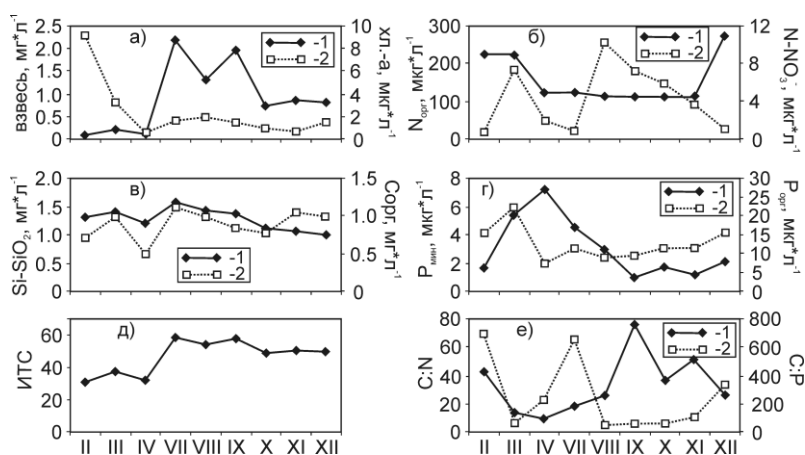


Рисунок 8.3 – Сезонные изменения содержания компонентов трофического статуса в оз. Хубсугул (а: 1 – хлорофилл-а, 2 – взвесь; б: 1 –  $N-NO_3^-$ , 2 –  $N_{орг}$ ; в: 1 –  $C_{орг}$ , 2 –  $Si-SiO_2$ ; г: 1 –  $P_{орг}$ , 2 –  $P_{мин}$ ; д – ИТС; е: 1 – C:P, 2 – C:N)

- Изучены источники, определяющие содержание органического вещества и биогенных элементов, а именно: некоторые породы бассейна озера (фосфориты и базальты), атмосферные осадки (снег), почвы, донные отложения, притоки и их русловые отложения. Факторный анализ показал взаимосвязь формирования элементного состава органического вещества почв, донных отложений и пород, тогда как состав вод озера и притоков испытывают влияние и других факторов, в том числе атмосферного переноса.

В 2017 г. были проведены исследования распределения ОВ природного и антропогенного происхождения в водах, донных отложениях пролива Малое Море (оз. Байкал), его притоках и малых озерах, снеге и почвах материкового побережья пролива и на о. Ольхон.

Установлено, что уровень трофности зал. Мухор соответствует эвтрофному водоему. Остальная часть Малого Моря не может быть отнесена к эвтрофному водоему. Прослеживается влияние притоков и поселков материкового и Ольхонского побережий на состав вод пролива. На основе стехиометрического отношения C, N и P подтверждено, что лимитирующими компонентами в развитии фитопланктона являются и азот, и фосфор. По результатам кластерного анализа состава C, N, P в воде Малого Моря, рек, малых озер и колодцев, донных отложениях и снеговой воде (рисунок 8.4) можно выделить 3 основные группы. К первой группе относятся воды прибрежных станций, испытывающие влияние рек и течений с севера на юг под действием сил Кориолиса. Состав ОВ и биогенных элементов донных отложений формируется под влиянием водного гумуса планктонного происхождения и частично почв и пород побережья. Во второй и третьей группах объединены воды рек, станций центральной части пролива и тяготеющие к о. Ольхон.

Они характеризуются низким содержанием нитратного азота, повышенным содержанием органического азота, низкими величинами отношений C:N, что позволяет сделать вывод о преобладании развития сине-зеленых водорослей.

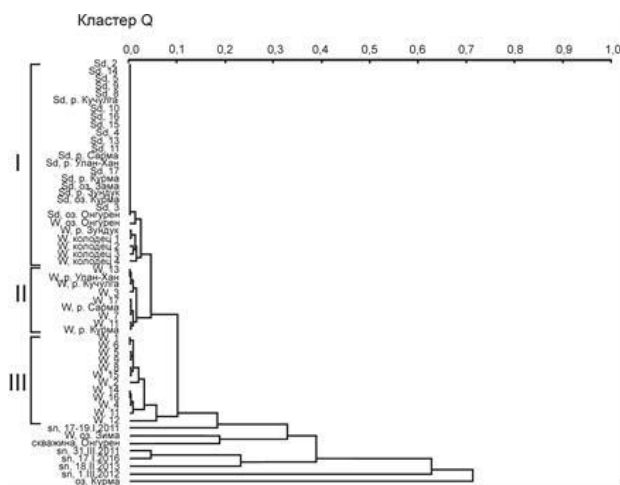


Рисунок 8.4 – Группирование химических анализов вод, донных отложений и снега кластер методом

Кроме того, исследовано содержание ГХБ,  $\alpha$ - и  $\gamma$ -изомеров ГХЦГ,  $\Sigma$ ДДТ и его метаболитов и  $\Sigma$ ПХБ в донных отложениях Малого моря (Sd-15) и (Sd-4). Полученные концентрации пестицидов и ПХБ в донных отложениях мелководной части сравнимы и ниже, найденных в южном Байкале и Иркутском водохранилище (рисунок 8.5).

Концентрации всех исследованных СОЗ в донных отложениях в южной части Малого моря и ДДТ и ПХБ в глубоководной части ниже нормативов, принятых в Канаде [65]. Уровни линдана ( $\gamma$ -ГХЦГ), ДДТ и ДДЭ в донных отложениях северной части пролива выше нормативов, принятых в Канаде, но ниже уровня, при котором вероятно негативное воздействие на биоту. По сравнению с Нормами и критериями оценки донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга [66] концентрации  $\alpha$ -ГХЦГ и сумма ДДТ и его метаболитов в южной части и ГХБ и ПХБ на обеих станциях ниже целевого уровня (класс 0). Концентрации линдана ( $\gamma$ -ГХЦГ) в пробах с обеих станций и  $\alpha$ -ГХЦГ и сумма ДДТ и его метаболитов в поверхностных донных отложениях северной глубоководной части пролива и выше предельного, целевого и проверочного уровней, соответственно, но ниже уровня вмешательства, что соответствует умеренно загрязненным  $\alpha$ -ГХЦГ и  $\gamma$ -ГХЦГ и сильнозагрязненным ДДТ донным отложениям. Превышение концентраций всех исследованных СОЗ в поверхностных донных отложениях глубоководной части Малого моря над уровнями в южной мелководной связано с большей скоростью



показано, что часть почв (группа III), в основном, отобранных на территории поселков и прилегающих к ним землях, испытывает влияние локальных источников.

Источниками СОЗ могут быть СОЗ-содержащие продукты, товары, дрова для печного отопления и др., привезенные из районов, где ранее применялись хлорорганические пестициды. Почвы, отобранные на остальных территориях, снеговые пробы, отдельные пробы атмосферного воздуха, а также донные отложения входят в одну группу I. Т.е., можно предположить, что состав ПХБ в современных поверхностных донных отложениях пролива формируется в результате смыва накопленных ранее ПХБ с поверхности почв побережий, а также при таянии снега. Небольшое влияние атмосферного переноса (группа III) на состав ПХБ в донных отложениях в настоящее время также возможно.

В 2018 году были проведены исследования СОЗ, наиболее важных представителей класса ХОС, включая ПХБ и ХОП, в атмосферном воздухе, снеговом покрове, дождевой воде, хвое и листьях растений, почвах и поровых водах по профилям в горных массивах Южного Прибайкалья от пос. Мишиха до пос. Большое Голоустное. Определены уровни содержания каждого СОЗ для каждого компонента (рисунок 8.7).

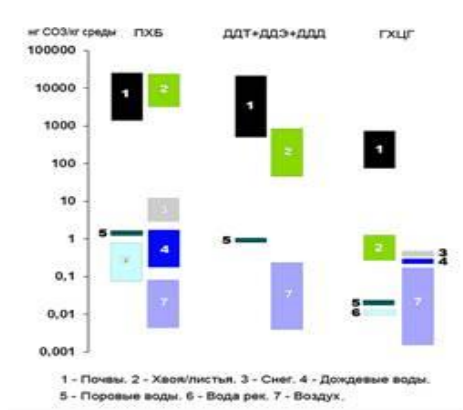


Рисунок 8.7 – Диапазоны концентраций основных групп СОЗ в различных средах горных массивов Южного Прибайкалья

Рассматривая подвижность СОЗ, найдена четкая зависимость между типом среды и физическими свойствами отдельных соединений (рисунок 8.8).

Получено, что существующее распределение ПХБ и ХОП в изученных средах формируется в результате взаимодействия следующих факторов: наличия в регионе источников СОЗ, индивидуальных физико-химических свойств самих СОЗ, доминирующего в районе воздушного переноса, резкого падения температуры

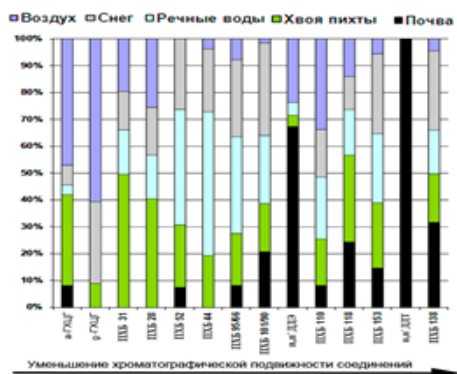


Рисунок 8.8 – Пример распределения некоторых индивидуальных СОЗ в основных средах горной части Южного Прибайкалья в летний период на станции №49 (высота 1167 м)

воздушных масс с набором высоты и избыточной влажностью, на склонах гор южного Байкала. ПХБ и ХОП приносятся с воздушными потоками в горные массивы южного Байкала по двум основными направлениям. Ветры северо-западного направления проходят через ангарскую промышленную зону и вбирают в себя все летучие соединения, поступившие от локальных источников. Проходя над Байкалом, воздушные массы значительно насыщаются влагой. Второе направление представлено западными ветрами, проходящими от Култука и идущими вдоль южного побережья Байкала, так же впитывая в себя влагу и летучие соединения, поступающие в воздух от Байкала и местных источников. Встречая на своем пути хребет Хамар-Дабан, воздушные потоки обоих направлений начинают подниматься вдоль склонов хребта вверх. С высотой происходит охлаждение воздушных масс, выпадение осадков и конденсировавшихся на них летучих веществ, в том числе СОЗ. Имеет место и естественное сухое осаждение СОЗ при понижении температуры.

В 2019 г. изучены сезонная и межгодовая изменчивости содержания ПХБ и ХОП в почвах Прибайкалья. Исследования проводились на основе 25 летнего периода наблюдений и современных работ по изучению СОЗ в почвах центральной зоны Байкальской природной территории, а также ежемесячного отбора проб почв в районах с разной степенью антропогенной нагрузки в Южном Прибайкалье. По результатам исследования было найдено, что концентрация всей суммы ПХБ проб почв (рисунок 8.9) изменялась по годам и в зависимости от района исследования.

Концентрации ПХБ почв г. Усолье-Сибирское – как исторически сложившегося источника с 1997 по 2013 годы – изменились незначительно. Ряд уменьшения 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.

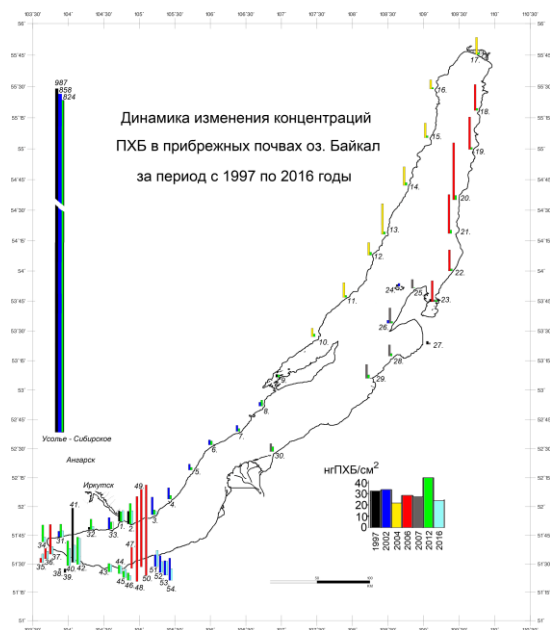


Рисунок 8.9 – Динамика изменения концентраций полихлорированных бифенилов (ПХБ) в прибрежных почвах озера Байкал за период с 1996 по 2016 годы

В настоящее время наблюдается тенденция к снижению концентраций ПХБ в почвах южного Байкала, и 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 8.9). Увеличение концентраций наблюдается с 1997 по 2006 гг. с последующим снижением к 2012 г. без достижения исходного уровня наблюдений 1997 г.

Все пробы почв северного Байкала (точки № 10–23, рисунок 8.9) показали в 2004–2006 гг. повышенные концентрации ПХБ, сравнимые с почвами городов Шелехов, Байкальск, Слюдянка, Улан-Удэ, имеющими концентрации 18–45 нг/см<sup>2</sup>. Максимальные концентрации приходились на разрез мыс Елохин (13) – мыс Кабаний (20), достигая величины в 50 нг/см<sup>2</sup>. В этих же точках отбора проб в 2012 г. 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 меньше, 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 эмиссии. Вероятно, по причине того, что северный Байкал является фоновым районом и, вероятно, до 2002 г. испытывал минимальное антропогенное воздействие, поступившие массы ПХБ не успели проникнуть в глубинные слои почвы и таким образом вынос ПХБ из почв происходил с максимально возможной скоростью после прекращения работы источника. Таким образом, нам теперь известна приблизительная скорость уменьшения 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. Рассматривались только те различия в концентрациях по сезонам года в почвах каждой станции, которые превышали ошибку метода.

В условиях наименьшей исследованной антропогенной нагрузки (степные почвы у пос. Б. Голоустное и лесные почвы у пос. Б. Луг) изменения СОЗ в почвах обусловлены в основном глобальным и региональным атмосферным переносом (рисунок 8.10).

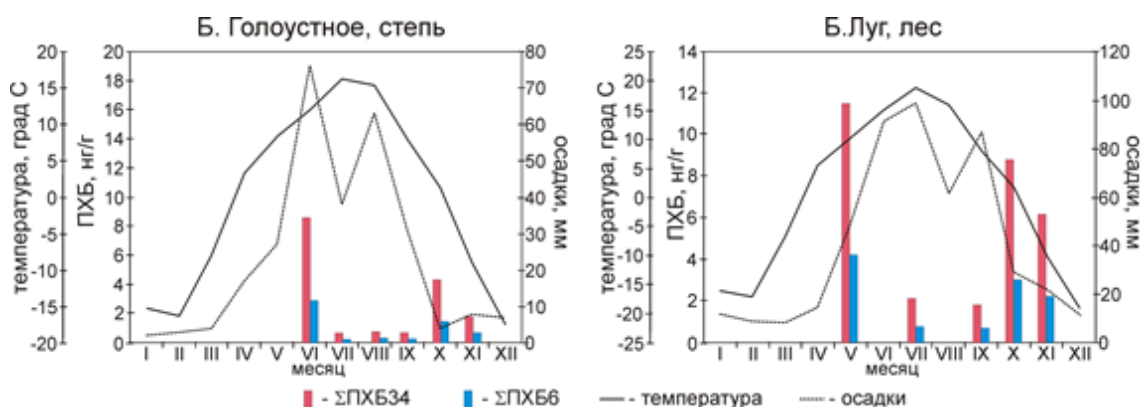


Рисунок 8.10 – Сезонные изменения концентраций ПХБ в степных почвах в районе пос. Б. Голоустное и лесных почвах пос. Б. Луг

Наименьшие 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 степных почвах 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.

Изменяется и соотношение индивидуальных соединений. Например, отношения  $\alpha/\gamma$ -ГХЦГ, ДДТ/ДДЭ и ДДЭ/ДДД в лесных и степных почвах варьировали 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. Доля тетраХБ в сумме всех ПХБ в июле-сентябре составляла 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.

В районах со средней антропогенной нагрузкой (например, рекреационная зона в гор. Иркутске, садоводство в Шелеховском р-не) отмечается также еще одно повышение концентраций промышленных СОЗ (ПХБ, ГХБ) в почвах в июле (рисунок 8.11).

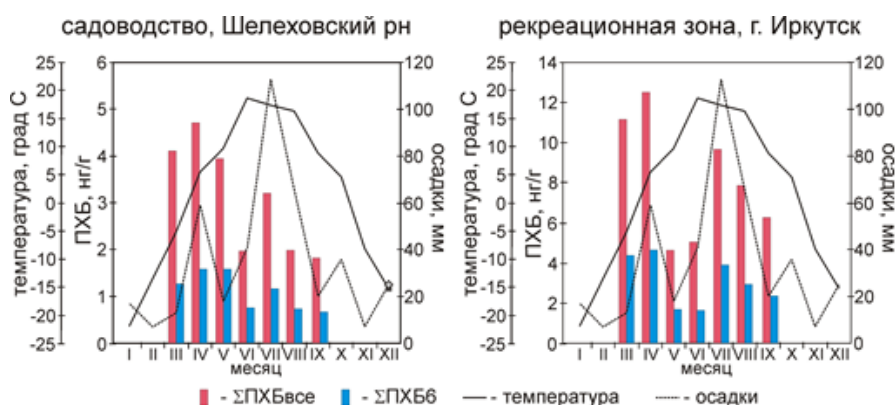


Рисунок 8.11 – Сезонные изменения концентраций ПХБ в почвах садоводства в Шелеховском районе и в рекреационной зоне гор. Иркутска

В почвах в районе со значительной антропогенной нагрузкой (гор. 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 значительного 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.

Согласно планам 2020 г. для исследования были выбраны две станции в рекреационной зоне гор. Иркутска (станция 1) и на некультивируемом участке в садоводстве Шелеховского района (станция 2).

Исследование ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе проводили с использованием метода пассивного пробоотбора [67]. Время постановки каждого пробоотборника составляло в среднем 2 мес. На этих же станциях отбирались пробы снега ежегодно с 2010 г. в конце зимнего периода, а также ежемесячно в двух годовых циклах в период устойчивого снегового покрова. Пробы почвы отбирались в одном годовом цикле ежемесячно в бесснежный период года и дважды в период устойчивого снегового покрова (в январе и накануне интенсивного таяния снега в марте), а также в июле или августе в течении ряда лет. Отбор снега производился на всю толщю снегового покрова с замером площади отбора и глубины залегания снегового покрова. Почвы отбирали методом конверта металлической лопаткой на глубину 5 см.

Пробы снега растаивали при комнатной температуре в металлических емкостях. Пробы почв сушили при комнатной температуре до постоянного веса. Фракция почвы менее 2 мм была использована для дальнейшего анализа.

В пробах были определены 34 конгенера ПХБ и хлорорганические пестициды (гексахлорбензол (ГХБ),  $\alpha$ - и  $\gamma$ -изомеры гексахлорциклогексана (ГХЦГ),  $p,p'$ -дихлордифенилтрихлорэтан ( $p,p'$ -ДДТ) и его метаболиты ( $p,p'$ -дихлордифенилдихлорэтан ( $p,p'$ -ДДД) и  $p,p'$ -дихлордифенилдихлорэтилен ( $p,p'$ -ДДЭ)) методом, опубликованным ранее с использованием газового хроматографа HP 5890 серия II совмещенного с детектором электронного захвата (ДЭЗ) [68, 69].

Концентрации в снеге и почвах были нормализованы на площадь отбора, а содержания в атмосферном воздухе представлены как концентрации СОЗ накопленные в картридже поделенные на количество дней постановки пробоотборника. Таким образом, концентрации СОЗ в атмосферном воздухе представляют содержания в определенный период времени (2 мес.), тогда как в снеговом покрове и почвах – это результат прошлого накопления с изменениями из-за перераспределения в воздушную или водную среду, поступления при таянии снега в почву, мокрого или сухого осаждения.

Концентрации большинства ПХБ и ХОП в атмосферном воздухе, почвах и снеговой воде отобранных на станции 1 были сопоставимы или выше, чем на станции 2, за исключением  $\gamma$ -ГХЦГ,  $p,p'$ -ДДЭ (метаболита  $p,p'$ -ДДТ) и низкохлорированных

конгенов ПХБ (например, ПХБ-28). Что соответствует картине распределения данных соединений в регионе, найденной ранее [59, 68, 69], т.е. накоплению соединений группы ПХБ и ГХБ в урбанизированных и промышленных районах, где расположены их потенциальные источники эмиссий и накоплению ГХЦГ и ДДТ в объектах окружающей среды районов, где наиболее вероятно применение хлорорганических пестицидов в прошлом (на землях сельхозназначения и для борьбы с переносчиками трансмиссивных заболеваний).

В почвах изменчивость концентраций самая низкая (отношение максимальных и минимальных концентраций составляла 2,5–25 на станции 1 и 1,5–12 на станции 2), а в воздухе – самая высокая (2,7–202 и 2,6–170, соответственно) для большинства исследованных СОЗ.

Изменение содержания большинства исследованных СОЗ в атмосферном воздухе в течение года характеризовалось четко выраженной сезонностью с минимумом концентраций в зимние месяцы и повышением содержания СОЗ летом. На станции 2 имеется дополнительный пик СОЗ в октябре-ноябре, связанный вероятно со сжиганием растительных остатков. Исключение составил ГХБ, для которого не отмечено какой-либо сезонной зависимости и содержание в воздухе, вероятно, в большей степени обусловлено эмиссиями постоянной действующих источников.

В почвах наибольшая среди конгенов ПХБ изменчивость уровней накопления отмечена для тетрахлорированных конгенов ПХБ (отношение max/min концентраций – 8–25). Затем идут триХБ (4,5-7,5 раз) и пента- и выше хлорированные ПХБ (2,5–5). Это обусловлено их физико-химическими свойствами. Пента и выше хлорированные ПХБ являются относительно низко подвижными с высоким коэффициентом распределения октанол-воздух ( $IgK_{oa}$  от 8,5 до 10). Такие соединения предпочтительно осаждаются и аккумулируются в средних широтах или ближе к источникам. Они меньше способны испаряться в теплый период года. Тогда как тетра и меньше хлорированные ПХБ более подвижны ( $IgK_{oa}=6-8$ ), меньше осаждаются в холодный сезон года и способны достигать полярных широт, где и аккумулируются.

Изменение уровней накопления СОЗ в снеговом покрове различается на исследованных станциях. Если на станции 2 в Шелеховском районе происходит постепенное увеличение уровней накопления с декабря до марта, то на станции в гор. Иркутске они повышаются в первой половине зимы, а в феврале начинается их снижение с минимумом в марте.

Сезонное перераспределение СОЗ в системе атмосферный воздух – атмосферные осадки – почва можно представить следующим образом (рисунок 8.12):

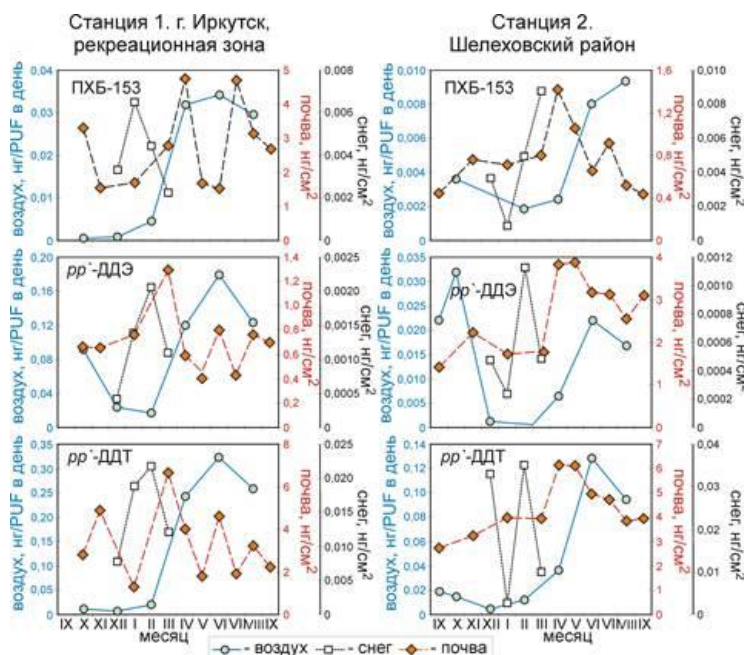


Рисунок 8.12 – Сезонное распределение ПХБ и ХОП в системе атмосферный воздух – атмосферные осадки – почва на станциях Южного Прибайкалья

1. с наступлением минусовых среднесуточных температур и формированием устойчивого снегового покрова в ноябре–декабре концентрации СОЗ в атмосферном воздухе и уровни накопления в почве достигают наименьших величин и на таком уровне сохраняются до февраля. В этот период происходят значительные изменения в содержании СОЗ в снеговом покрове, причем эти изменения зависят от степени антропогенной нагрузки. Уровни накопления СОЗ в снеговом покрове или постепенно увеличиваются с декабря до марта (на станции 2 в Шелеховском районе), или увеличение уровней накопления происходит в первые месяцы, а в феврале начинается их снижение с минимумом в марте (на станции 1 в гор. Иркутске). Это может быть результатом двух факторов: (1) большее количество взвешенных веществ в атмосферном воздухе и, соответственно, в снеговом покрове, на станции 1, чем на станции 2, способствует большему вымыванию адсорбированных на частицах СОЗ в начале зимы в городе; (2) интенсивное снеготаяние на станции 1 начинается раньше примерно на одну неделю, чем на станции 2, что приводит к частичной миграции СОЗ в почву с талыми водами и/или испарением в воздух.

2. весной при повышении температур воздуха начинаются процессы снеготаяния. Большая часть CO<sub>2</sub>, содержащаяся в снеге в адсорбированном состоянии на твердых частицах и кристаллах снега, поступает с талыми водами в почву. Некоторая часть CO<sub>2</sub> переходит в водный раствор и поступает с водяными парами – в атмосферный воздух. Это приводит к повышению концентраций CO<sub>2</sub> в атмосферном воздухе в марте–апреле и почвах в апреле–мае.

3. в начале лета (май–июнь–начало июля) на территории юга Иркутской области обычно устанавливается сухая и жаркая погода. Иссущение почв способствует испарению CO<sub>2</sub> из поверхностного слоя почв, а также диффузии CO<sub>2</sub> в газовой или жидкой фазах из более глубоких слоев, что приводит к постепенному снижению уровней накопления CO<sub>2</sub> в почве. С другой стороны, концентрации CO<sub>2</sub> в атмосферном воздухе достигают наибольших величин к середине лета.

4. увеличение количества атмосферных осадков в июле-августе приводит к мокрому осаждению CO<sub>2</sub> на почву и увеличению уровней накопления CO<sub>2</sub> в почвах. Однако, благодаря сочетанию дождей с высокими температурами атмосферного воздуха, это повышение носит относительно кратковременный характер. Этот второй пик повышения уровней накопления CO<sub>2</sub> в почвах из-за эффекта мокрого осаждения в районе с повышенной антропогенной нагрузкой может быть сравним с первым, образовавшимся после снеготаяния, или ниже первого в районе с меньшей антропогенной нагрузкой. Это может быть также связано с разной пылевой нагрузкой на изученных станциях, что подтверждается тем, что для низкохлорированных ПХБ, которые находятся в растворенном состоянии в воздухе, второй пик не наблюдается, а для более высокохлорированных конгенов ПХБ адсорбированных на взвешенных частицах воздуха он достаточно хорошо выражен. Однако, снижение концентраций CO<sub>2</sub> в атмосферном воздухе незначительно в этот период, что возможно за счет усиления ветровой активности летом и атмосферного переноса из районов с повышенной нагрузкой CO<sub>2</sub> (например, с территории промплощадки «Усольехимпрома» в гор. Усолье-Сибирское).

5. осенью уровни накопления CO<sub>2</sub> в почвах сравнимы с величинами в зимний и межпиковый периоды. Концентрации CO<sub>2</sub> в атмосферном воздухе также постепенно снижаются к зиме.

На основании многолетних рядов наблюдения CO<sub>2</sub> в атмосферном воздухе, снеге и почве рассмотрены также следующие сценарии взаимосвязей:

- 1) уровни накопления в снеговом покрове каждый месяц в течении зимы и концентрации в воздухе за предыдущие 2 месяца;
- 2) уровни накопления в снеговом покрове в конце зимнего сезона и средние концентрации в воздухе за предыдущие 6 месяцев;
- 3) уровни накопления в снеговом покрове в конце зимнего сезона и средние концентрации в воздухе за предыдущий год;
- 4) уровни накопления в почве каждый месяц в течении бесснежного периода и концентрации в воздухе за предыдущие 2 месяца.

Для ХОП на обеих станциях получена слабая корреляционная связь между содержанием СОЗ в атмосферном воздухе и уровней накопления в снеговом покрове отобранных ежемесячно (1 сценарий). Средняя и сильная положительная корреляция получена для уровней накопления  $\alpha$ -ГХЦГ, рр'-ДДЭ и рр'-ДДТ в снеговом покрове в конце зимнего сезона и содержания этих соединений в атмосферном воздухе за предыдущий зимний период или за год (2 и 3 сценарии). Причем на станции 1 коэффициенты корреляции для 3 сценария выше, чем на станции 2, т.е. в урбанизированных районах по содержанию в снеге в конце зимы можно судить о содержании в атмосферном воздухе за предыдущий как зимний период, так и год. Тогда как на станции 2 основная часть ХОП в атмосферный воздух поступает в летний период в результате как возможного использования ХОП в садоводстве, атмосферного транспорта с сопредельных территорий, так и за счет испарения из почв.

На станции 2 сильная положительная корреляция получена для гекса- и гептахлорированных конгенов и гомологов ПХБ между уровнями накопления в снеге и содержанием в атмосферном воздухе при ежемесячном отборе зимой (1 сценарий). При рассмотрении периода исследования ПХБ в атмосферном воздухе до нескольких зимних месяцев количество конгенов и гомологов с сильной положительной связью увеличивается (2 сценарий). Однако, слабые связи выявлены при рассмотрении средних годовых концентраций ПХБ в атмосферном воздухе (3 сценарий).

На станции 1 при ежемесячном отборе снега зимой обнаружены слабые связи (сценарий 1). С другой стороны сильная положительная корреляция найдена для среднего за зимний период и среднегодового содержания практически всех конгенов и от три- до гептахлорированных гомологов ПХБ в атмосферном воздухе и уровней накопления этих ПХБ в снеговом покрове в конце зимнего периода (сценарии 2 и 3).

Результаты исследования взаимосвязей по сценарию 4 показывают как слабые, так и сильные положительные и отрицательные взаимосвязи для разных групп соединений на



обеих станциях. Необходимо продолжение исследований в данном направлении с изменением условий эксперимента (более частый отбор проб почв и атмосферного воздуха, а также отбор проб по горизонтам почвы и определение содержания СОЗ во фракциях почвенного органического вещества), что планируется в дальнейшем.

Таким образом, отмеченные в проведенном исследовании изменения содержания большинства исследованных СОЗ в атмосферном воздухе, снеговом покрове и почвах в течении года обусловлены метеорологическими факторами (температурный режим – испарение летом и осаждение зимой, вымывающим действием жидких и твердых атмосферных осадков), глобальным и региональным атмосферным переносом, а также локальными постоянно (промышленные источники, автомобильный транспорт, ТЭЦ и т.д.) или периодически (печное отопление зимой, сельское хозяйство, пожары, костры и т.д.) действующими источниками.

В урбанизированных районах по содержанию в снеге в конце зимы можно судить о содержании ПХБ, ГХЦГ и ДДТ в атмосферном воздухе за предыдущий как зимний период, так и год. И это также предполагает единый в течении всего года источник эмиссий в данном районе. Тогда как на станции 2 помимо влияния источника атмосферных эмиссии, существенную роль играют дополнительное поступление в атмосферный воздух при испарении из почв в бесснежный период года и, возможно, локальные сезонные источники (бесконтрольное использование ХОП в садоводстве, сжигание отходов в печах и т.п.).

## **9 Геохимические и изотопно-геохимические записи отложений озера Байкал как индикаторы природной среды в позднем кайнозое**

В 2017 году проведена оценка потенциальных источников сноса терригенного вещества на подводные перемычки оз. Байкал в необайкальскую стадию (~4–0,01 млн. лет). Выполнены литохимические реконструкции с использованием макро- и микроэлементного состава осадков донных отложений по разрезам BDP-98 (Академический хребет), BDP-99 (Посольская банка, Селенгино-Бугульдейская перемычка). При этом учитывались как изменения климатической стадийности в интервале 2,8–0,01 млн. лет, так и смена геохронологических эпох – плиоцен/плейстоцен (граница – 2,588 млн. лет).

Для реконструкции областей питания палеоводосбора и, соответственно, потенциальных источников сноса вещества использовались ряд общепринятых диаграмм.

Тройная диаграмма в координатах  $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{K}_2\text{O}$  [70] экспонирует составы отложений Академического хребта оз. Байкал в поле источников сноса кислого состава, преимущественно гранитов, гранодиоритов и дацитов. В отложениях скважины BDP-99 состав осадков располагается исключительно в поле гранитных источников питания, тем самым свидетельствуя о преимущественно гранитной природе для осадочных пород района (рисунок 9.1).

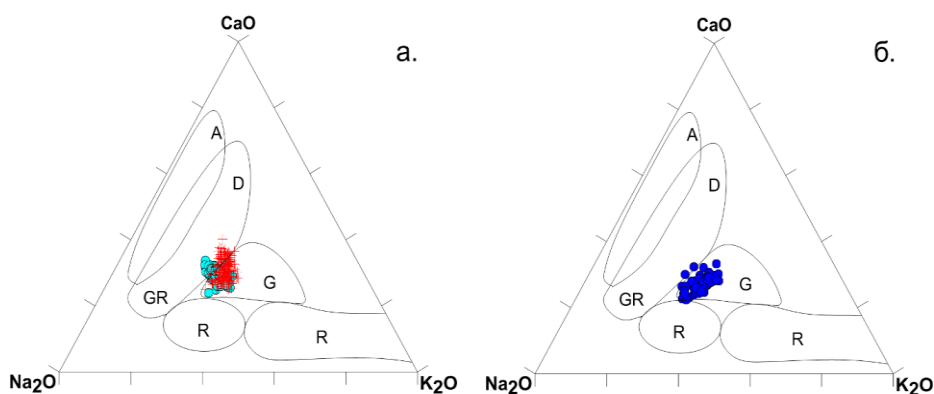


Рисунок 9.1 – Диаграмма [70] для отложений разрезов: а – BDP – 98 (разделение для границы плиоцен/плейстоцен); б – BDP – 99. Условные обозначения: А – андезиты; D – дациты; GR – гранодиориты; G – граниты; R – рециклированные осадки

Разделение составов отложений по возрастному критерию (рисунок 9.1a) не приводит к изменению основных источников поступления терригенного материала, свидетельствуя о незначительной роли происходивших в это время климатических и тектонических событий в формировании источников материала.

При нормировании составов отложений на средние составы пород обрамления водоема удалось установить ряд источников кластического материала для отложений его водосборной площади и донных осадков. Для подобных реконструкций использованы следующие составы пород: метаморфические комплексы пород – шарыжалгайский метаморфический комплекс; ольхонский комплекс, слюдянский комплекс, святоносский комплекс. Граниты: саянский комплекс, приморский комплекс. Мигматит-граниты – шарыжалгайский комплекс. Герцинские гранитоиды Забайкалья.

При нормировании среднего состава пород осадочной толщи Академического хребта BDP – 98 на средний состав пород комплексов Забайкальского фланга (рисунок 9.2), выявилась генетическая близость составов отложений к породам монцонит-сиенитовой шошонитовой интрузивной серии, нижнеселенгинского комплекса и известково-щелочным кварцевым монцонитам чивыркуйского комплекса.

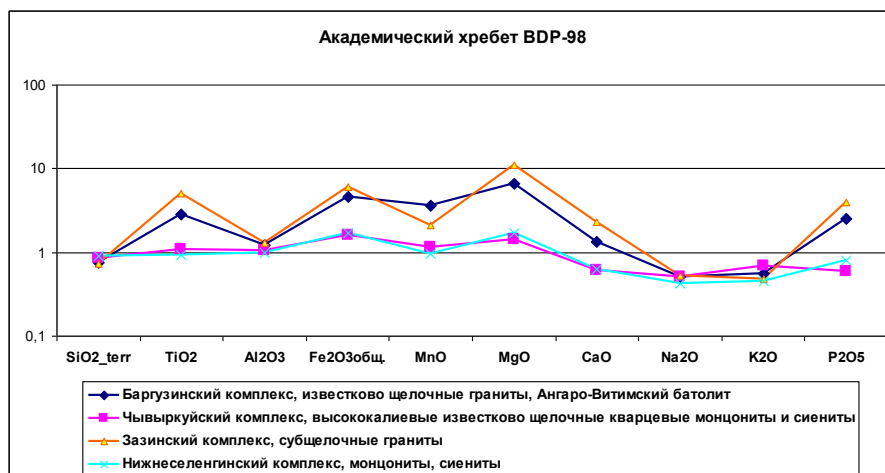


Рисунок 9.2 – Диаграмма нормирования петрогенных элементов среднего состава донных осадков Академического хребта (разрез BDP-98) на средний состав гранитоидов Забайкалья

Составы пород осадочной толщи разреза BDP-99 реагируют аналогичным образом (рисунок 9.3). Использование микроэлементного состава для комплексной оценки источников поступления кластического материала в оба разреза подтвердили вывод по макрокомпонентам (рисунки 9.4, 9.5).

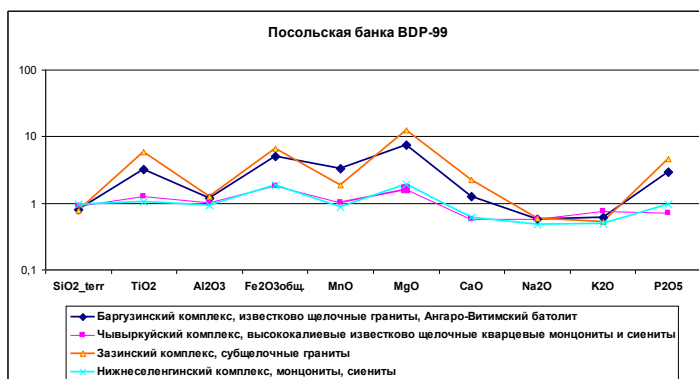


Рисунок 9.3 – Диаграмма нормирования петрогенных элементов среднего состава донных осадков Селенгино-Бугульдейской перемычки на средний состав гранитоидов Забайкалья

Таким образом, очевидным является доминирующее поступление продуктов разрушения нижнеселенгинского и чивыркуйского комплексов кварцевых монцонитов и сиенитов, источников преимущественно среднего состава.

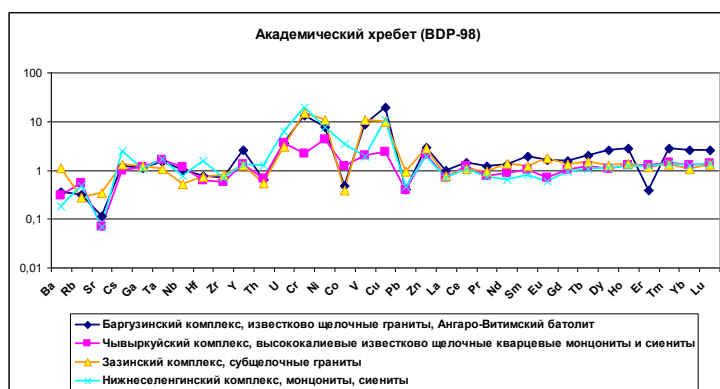


Рисунок 9.4 – Диаграмма нормирования микроэлементов среднего состава донных осадков Академического хребта (разрез BDP-98) на средний состав гранитоидов Забайкалья

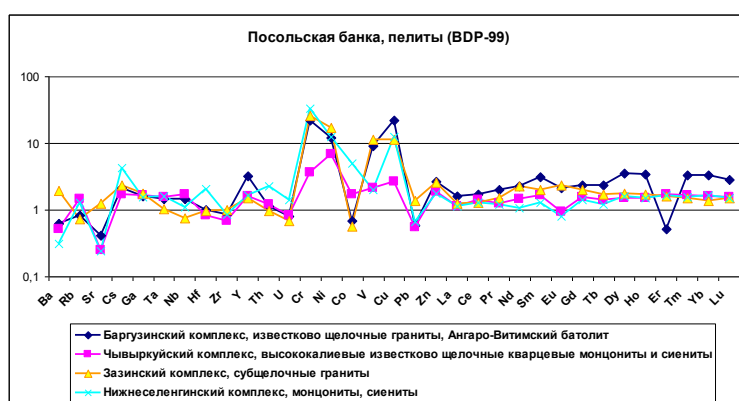


Рисунок 9.5 – Диаграмма нормирования микроэлементов среднего состава донных осадков Селенгино-Бугульдейской перемычки (разрез BDP-99) на средний состав гранитоидов Забайкалья

При разделении составов осадков по критерию ледниковье/межледниковье для отложений Академического хребта (рисунки 9.6, 9.7) показано, что характер источников от изменения климата не менялся. С другой стороны, также является вероятным взаимопроникновение (смещение) разновозрастных продуктов выветривания при поступлении в конечный бассейн седиментации – оз. Байкал.

Для сравнения составов отложений байкальских скважин между собой использованы кларки верхней континентальной коры [71]. Для нормирования петрохимического состава использован валовый состав по разрезам BDP-98 и BDP-99, для микроэлементного состава по разрезу BDP-99 использован состав пелитовой фракции (менее 20 мкм); для BDP-98 - валовый состав (рисунки 9.8, 9.9). Из анализа спайдердиаграмм становится очевидной близость составов отложений подводных перемычек Байкала друг другу. При этом хорошо проявляется известная ранее урановая

аномалия [72]. Источником поступления урана является крупнозернистая фракция, что видно из нисходящего тренда в пелитовой фракции отложений разреза BDP-99.

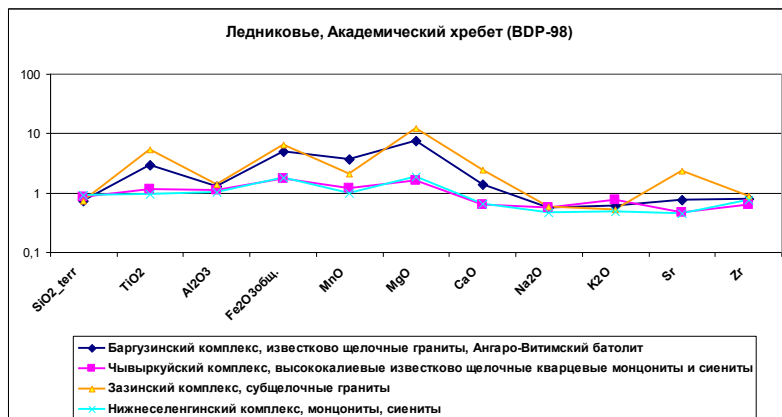


Рисунок 9.6 – Диаграмма нормирования среднего состава петрогенных элементов ледниковых интервалов донных осадков Академического хребта (разрез BDP-98) на средний состав гранитоидов Забайкалья

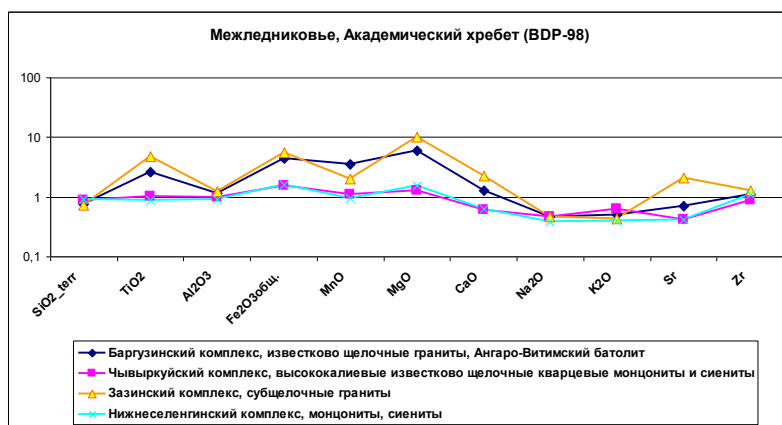


Рисунок 9.7 – Диаграмма нормирования среднего состава петрогенных элементов межледниковых интервалов донных осадков Академического хребта (разрез BDP-98) на средний состав гранитоидов Забайкалья

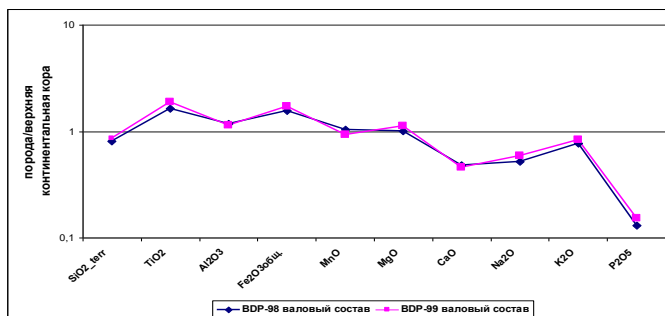
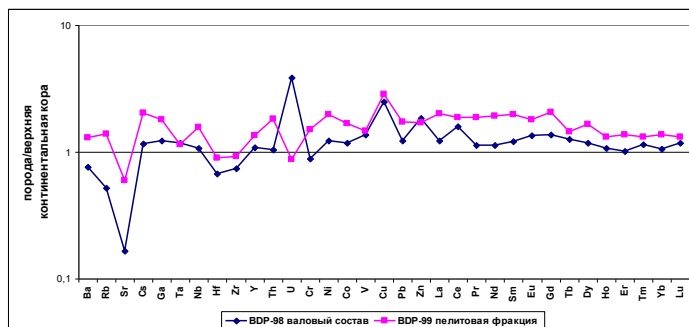


Рисунок 9.8 – Тренд нормализованных [71] содержаний петрогенных элементов для отложений Академического хребта и Селенгино – Бугульдейской перемычки



Рисунки 9.9 – Тренд нормализованных [71] содержаний микроэлементов для отложений Академического хребта и Селенгино-Бугульдейской перемычки

Таким образом, составы отложений подводных перемычек Байкала несут в себе информацию о преимущественно гранитных источниках сноса.

При определении источников сноса терригенного вещества на подводные перемычки Байкала следует учитывать усреднение составов отложений при выщелачивании на водосборной площади, поскольку подводные поднятия аккумулируют преимущественно тонкую переработанную фракцию, поступающую из водной толщи по отношению к краевым частям Байкальской впадины и её котловинам.

Элементный состав отложений обоих разрезов демонстрирует чрезвычайную близость друг другу, при этом основные источники поступления терригенного вещества остаются неизменными в интервале 4–0,01 млн. лет назад.

Изучение классификационных характеристик материала осадков и процессы выветривания на водосборной площади. Продолжение детальных лито-геохимических исследований осадочных разрезов подводного Академического хребта в 2018 году позволило установить время тектонической активизации Байкальского региона и выявить связь регионального тектоногенеза с коллизионными процессами в Азии в позднем плиоцене-плейстоцене. Наличие хорошей возрастной основы и детальной биостратиграфической модели для квартера Байкальского региона позволило связать тектоническую активизацию с региональными климатическими изменениями и реконструировать условия выветривания на водосборной площади оз. Байкал.

На рисунке 9.10 представлены элементы детальной геохимической модели для донных осадков озера Байкал в возрастном интервале 4–0,01 млн. лет. Модель учитывает пиковые значения каждой климатической стадии верхнего плиоцена – плейстоцена фиксируемые по концентрациям биогенного кремнезема ( $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ ) и основана на глубоководном разрезе BDP-98 пробуренном на подводном Академическом хребте.

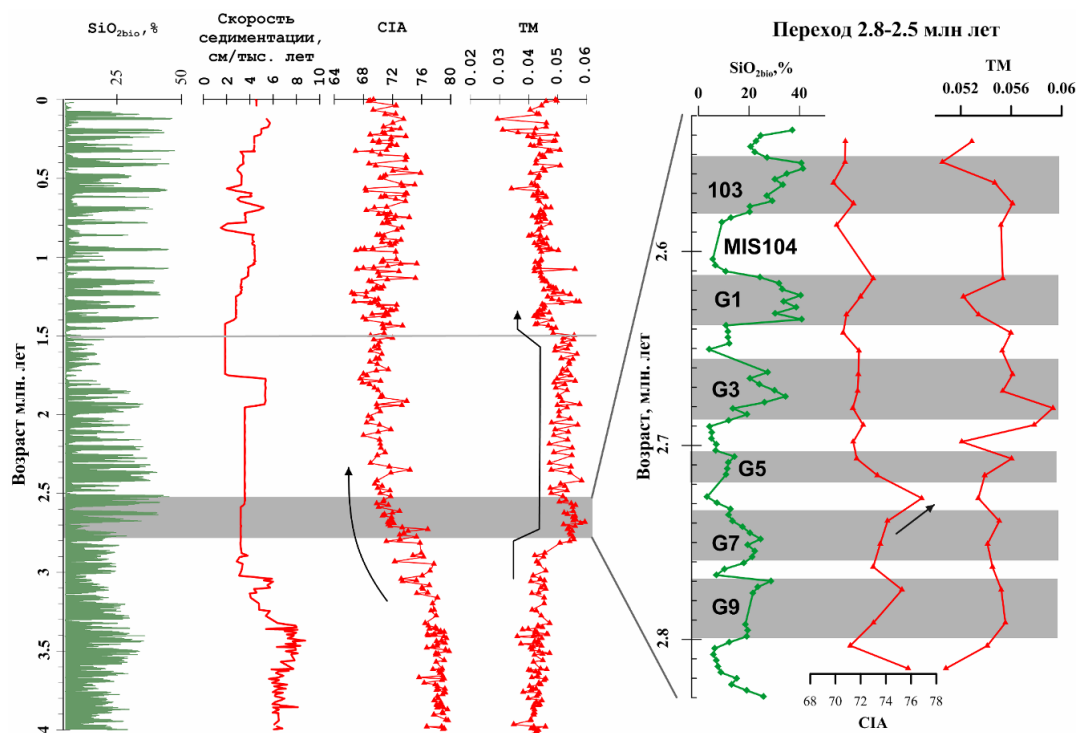


Рисунок 9.10 – Поведение модуля ТМ и индекса выветривания CIA для осадочной толщи оз. Байкал за последние 4 млн. лет (Академический хребет, скважина BDP-98). На правом графике показано поведение этих же индексов при переходе от плиоцена к квартеру (2,8–2,5 млн. лет назад) в сравнении с биогенным кремнеземом ( $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ ) и морскими изотопными стадиями MIS, G. Стрелкой справа выделен эпизод изменения климатических и тектонических условий (CIA), стрелки слева маркирую интервалы изменения при переходе от плиоцена к квартеру.

Изменение индекса выветривания CIA ( $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\cdot 100$ ) в ледниковую стадию G6 (2,73 млн. лет назад) свидетельствует о начале масштабного похолодания в Байкальской горной области и поступлении фракций осадка являющихся продуктами деструкции верхних горизонтов коры выветривания на водосборной площади. На примере титанового модуля (ТМ,  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ), а также других компонентов модели установлено – глубокий сдвиг в сторону увеличения тренда ТМ в интервале 2,8–1,5 млн. лет свидетельствует о поступлении титансодержащих грубозернистых фракций осадков и отображает расчленение Приморского и Байкальского хребтов в это время. Активный тектонический процесс полностью согласуется по времени с «дооформлением» горных систем Азии (Тянь-Шань, Тибет) и свидетельствует о взаимодействии местных и удаленных геодинамических механизмов.

Затем были оценены черты сходства и различия в условиях осадконакопления подводных поднятий Академический хребет (скважина BDP-98) и Селенгино-Бугульдейской перемычка (скважина BDP-99) по петрохимическим данным. Определены классификационные характеристики осадочных отложений, проведена реконструкция условий выветривания на водосборной площади в интервал 4–0,01 млн. лет назад.

На классификационной диаграмме Херрона в координатах  $\log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$  –  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  осадки Академического хребта классифицируются в поле глинистых сланцев (рисунок 9.11). Эта характеристика, не смотря на отсутствие литификации, близка к первоначальному структурно-текстурному описанию отложений, данному при литолого-стратиграфической документации изученных разрезов.

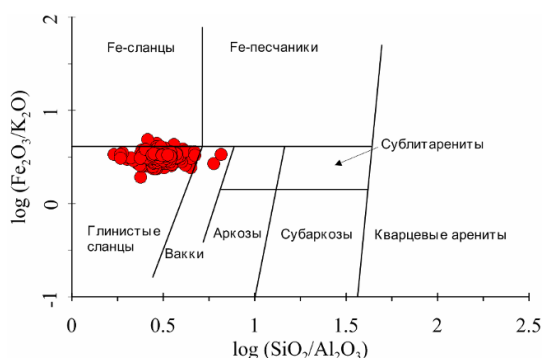


Рисунок 9.11 – Классификационная диаграмма [73] для осадочного разреза BDP-98 (Академический хребет)

Незначительным отличием осадочных разностей пород Академического хребта от пород Селенгино-Бугульдейской перемычки (рисунок 9.12) является относительно более железистый их состав, определяющий единичные фигуративные точки в поле железистых сланцев. Здесь нужно учитывать, что накопление железа и марганца связано не только с

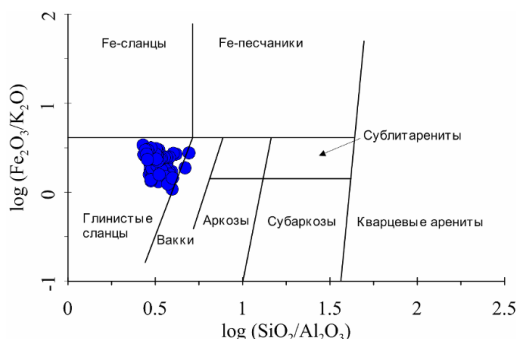


Рисунок 9.12 – Классификационная диаграмма [73] для осадочного разреза BDP-99 (Селенгино-Бугульдейская перемычка)



их концентрациями в осадке, но и в поровых водах. Процесс аккумуляции этих элементов контролируется окислительно-восстановительными (редокс) условиями. Немаловажную роль в этом процессе занимает скорость осадконакопления и размерность частиц осадка, поскольку от этого зависит мощность окислительного слоя. Чем выше скорость осадконакопления, тем, как правило, крупнее тонкая фракция осадка и тем, соответственно, тоньше окислительная зона. Именно поэтому концентрации, в частности, железа в осадках Академического хребта, где низкие скорости осадконакопления, выше, чем в осадках Селенгино-Бугульдейской перемычки.

На диаграмме Я.Ю. Юдовича, примененной для разграничения глинистых пород, донные отложения Академического хребта в диапазоне до 4 млн. лет локализуются в центре поля существенно гидрослюдистых осадков и одновременно затрагивают верхние границы поля существенно монтмориллонитовых глинистых отложений. Подобное поведение подтверждается данными по дифракционному анализу тонких фракций донных отложений Байкала.

На рисунке 9.13а составы отложений скважины BDP-98 разделены по возрастному критерию где интервал 4–2,8 млн. лет характеризует спокойную седиментационную обстановку в относительно теплом и влажном климате плиоцена, а интервал 2,8–0,01 млн. лет – период климатических и тектонических изменений. Поведение составов отложений подтверждается ранее проведенными исследованиями, не выявившими закономерностей в концентрациях глинистых минералов в осадках Байкала как индикаторов изменения климата в регионе. Однако необходимо учитывать и влияние позднекайнозойского тектогенеза при формировании осадочной толщи на увеличение поступления титана в интервале 2,8–1,5 млн. лет и моложе 0,3 млн. лет (рисунок 9.10).

Для сравнения с осадками Академического хребта приведена аналогичная диаграмма для Селенгино-Бугульдейской перемычки (скважина BDP-99) (рисунок 9.13б). В среднем объемы каолинита имеют сходные характеристики на Академическом хребте и на Селенгино-Бугульдейской перемычке. Здесь нужно учитывать, что в Байкале реконструирован рост содержания каолинита в ледниковых интервалах по сравнению с межледниковыми, что является нетипичным, т.к. каолинит ведет себя как обломочный минерал, и, по-видимому, является продуктом выветривания мусковита в палеоводосборе. Также стоит учесть отсутствие детальных данных по дифракционному анализу и ИК-спектроскопии глин на всю мощность пробуренных разрезов.

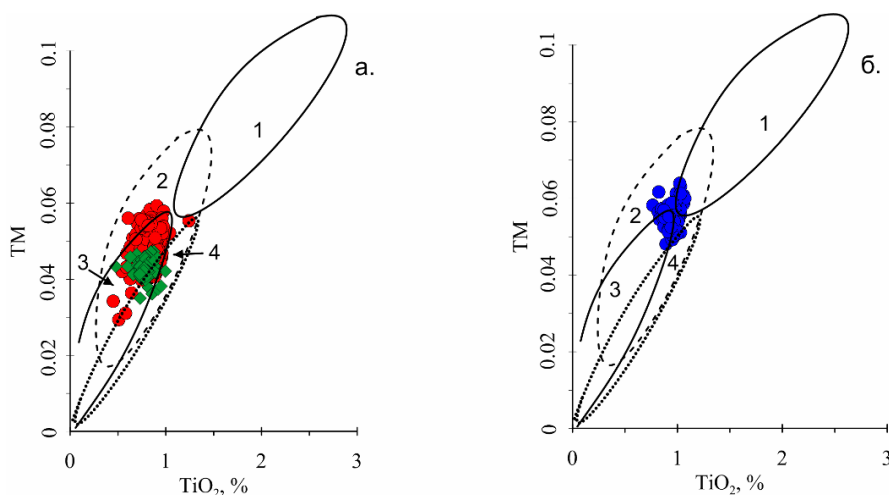


Рисунок 9.13 – Диаграммы в координатах ТМ –  $TiO_2$  [74] для осадочных разрезов ВDP-98, 99. Условные обозначения: **а.** – Академический хребет, разделение по возрастному критерию, ромбы – 4–2,8 млн. лет; кружки – 2,8–0,01 млн. лет; **б.** – отложения Селенгино-Бугульдейской перемычки; поля – цифрами: 1 – каолинитовых глин; 2 – существенно гидрослюдистых глин; 3 – существенно монтмориллонитовых глин; 4 – низко модульных каолинитовых глин – продуктов катагенетических преобразований монтмориллонитового или каолинитового субстрата

Геохимические реконструкции демонстрируют большее присутствие каолинитовых разностей осадков в разрезе скважины ВDP-99 в средне- и верхнеплейстоценовых пачках по отношению к скважине ВDP-98.

Эффективным методом разграничения составов отложений является модульная диаграмма в координатах  $FeO+Fe_2O_3+MgO/SiO_2 - (Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$  (ФМ-НКМ). Донные отложения Академического хребта на такой диаграмме экспонируются преимущественно в 3 поля (рисунок 9.14).

Поле 2 – породы с преобладанием монтмориллонита и подчиненным количеством каолинита и гидрослюда; поле 4 – глинистые породы преимущественно гидрослюдистого состава, имеющие значительную примесь тонкозернистых обломков полевых шпатов; поле 5 – глинистые породы, состоящие из трехкомпонентной системы хлорит-монтмориллонит-гидрослюда. При этом осадки плиоцена локализуются преимущественно в поле 2. Плейстоценовые разности локализуются на стыке двух полей – 4 и 5, принципиальным отличием которых является отсутствие связи с корами выветривания осадочных отложений, сконцентрированных в поле 5, в то время как отложения, экспонированные в поле 4, характерны для аридных кор выветривания.

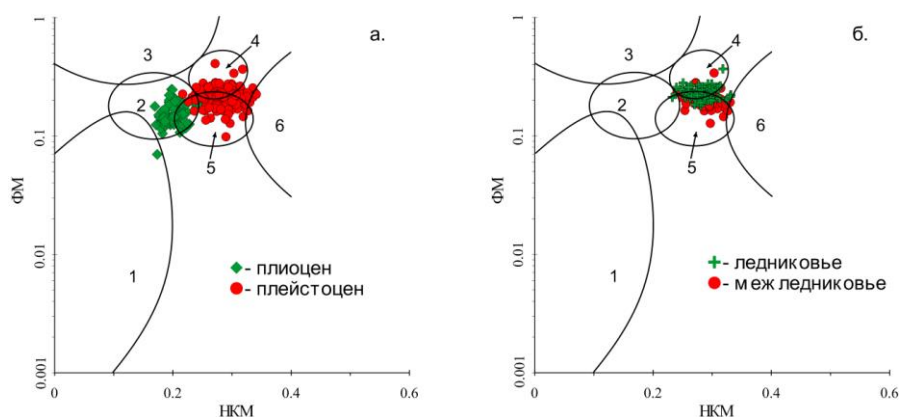


Рисунок 9.14 – Диаграммы в координатах ФМ-НКМ [74] для разреза ВDP-98. Условные обозначения: **а.** – разделение по возрастному критерию, ромбы – 4–2,8 млн. лет; кружки – 2,8–0,01 млн. лет; **б.** – разделение по критерию ледниковье/межледниковье в интервале 1,5–0,01 млн. лет; поля цифрами: 1 – глинистые породы с доминированием каолинита; 2 – породы с преобладанием монтмориллонита и подчиненным количеством каолинита и гидрослюда; 3 – глинистые породы с доминантой хлорита (Fe-слюда в виде примеси); 4 – глинистая порода гидрослюдистого состава со значительной примесью тонкозернистых полевых шпатов; 5 – глинистая порода трехкомпонентного состава (хлорит + монтмориллонит + гидрослюда); 6 – гидрослюдистые глинистые породы с примесью тонкодисперсного полевого шпата

Анализ данной диаграммы позволил сделать ряд выводов о генезисе отложений, поступающих с палеоводосбора в бассейн седиментации. Поскольку при разделении по возрастному критерию значительная часть плиоценовых разностей попадает в поле 2, очевидным является вывод о более сильной химической переработке отложений в относительно теплых условиях плиоцена. В плейстоцене реконструируется поступление менее выветренных разностей осадков, затронутых химическим процессом выветривания весьма слабо. При попытке разделить с помощью аналогичной диаграммы донные отложения по климатическому критерию в интервале возрастов 2,8–0,01 млн. лет (рисунок 9.15б), показательным является смешение составов отложений.

Для сравнения с отложениями Академического хребта приведена диаграмма для осадков скважины ВDP-99 (Посольская банка) (рисунок 9.15).

Как и одновозрастные осадки Академического хребта, существенная часть верхнеплейстоценовых осадков разреза экспонируется в 2 поля: 4 и 5 – хлорит-монтмориллонит-гидрослюдистого состава и преимущественно гидрослюдистого с примесью тонкозернистых полевых шпатов соответственно, однако третья часть фигуративных точек экспонируется в поле 6 – гидрослюдистых глинистых пород с тонкодисперсной примесью полевых шпатов. При разграничении глинистых отложений подобным способом выявляется отличие плейстоценовых осадков южной оконечности

Селенгино-Бугульдейской перемычки от осадков Академического хребта, заключающееся в большом поступлении обломков полевых шпатов как тонкозернистой, так и тонкодисперсной размерности из-за близкого расположения дельты р. Селенги, оказывающей существенное влияние на формирование осадочной толщи.

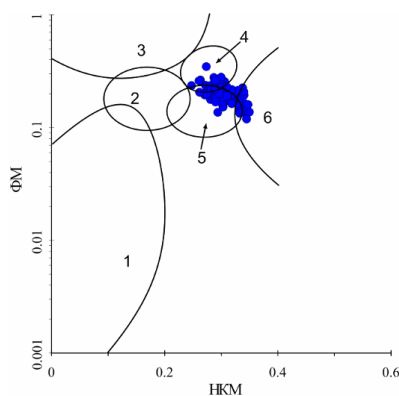


Рисунок 9.15 – Диаграмма в координатах ФМ-НКМ [74] для разреза ВDP-99. Условные обозначения цифрами для полей как на рисунке 9.15

На основании вышеизложенного можно предположить, что в ледниковые периоды доминировала эоловая транспортировка материала, водный сток при этом имел подчиненное положение, поскольку летние периоды были короче, чем в межледниковые. В межледниковые периоды доминировал перенос материала водным стоком.

Для разграничения парагенетических ассоциаций осадочных пород континентального генезиса, сформированных в условиях аридного и гумидного климата, показательным является применение тройной диаграммы в координатах  $Al_2O_3 - (Fe_2O_3 + FeO) - (CaO + MgO + K_2O + Na_2O)$ .

В плиоцен-плейстоценовых отложениях с Академического хребта фигуративные точки распределяются преимущественно в поле, отвечающем гумидному климату (рисунок 9.16). Интересен тот факт, что попытки разделения исходных данных как по возрастным параметрам (плиоцен/плейстоцен) (рисунок 9.16), так и по климатическим (ледниковье/межледниковье) (рисунок 9.17), не являются необходимым условием для разграничения аридных и гумидных разностей донных отложений подобным способом. В оба климатических поля попадают обогащенные и обедненные биогенным кремнеземом ( $SiO_{2bio.}$ ) разности пород. Так же не выявляется принципиальная зависимость климатических свойств изученных отложений от возраста пород.

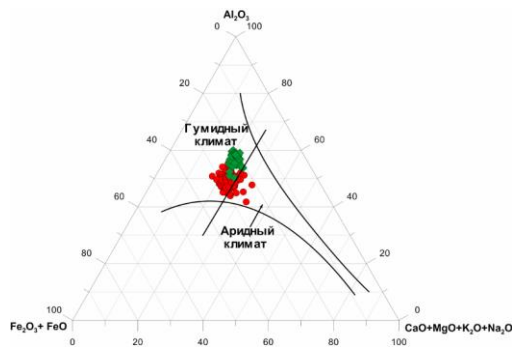


Рисунок 9.16 – Диаграмма Ерофеева-Цеховского. Скважина BDP-98, разделение петрогенных характеристик отложений по возрастному критерию, ромбы – 4–2,8 млн. лет назад; кружки – 2,8–0,01 млн. лет назад

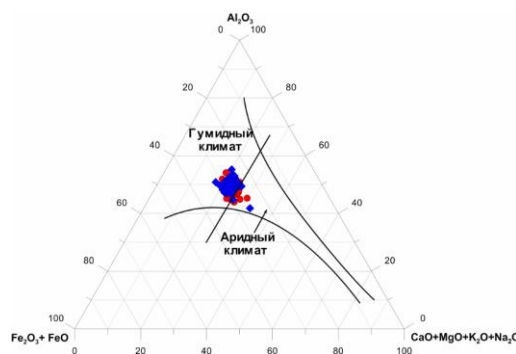


Рисунок 9.17 – Диаграмма Ерофеева-Цеховского. Скважина BDP-98, разделение петрогенных характеристик ледниковья/межледниковья в интервале до 1,5 млн. лет, ромбы – ледниковые периоды; кружки – межледниковые периоды

На рисунке 9.18 представлены породы Селенгино-Бугульдейской перемычки (скважина BDP-99) древнее 1,2 млн. лет назад. Результат примечателен разделением фигуративных точек разреза пропорционально в оба поля. Применение тройной диаграммы выветривания в координатах  $(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O}$  позволило выявить тенденцию направленности выветривания отложений водосборной площади, являющихся источником терригенного материала для донных осадков озера Байкал.

В донных отложениях оз. Байкал тренд выветривания, рассчитанный для описываемых морфоструктур в интервалы разного возраста и климатических обстановок, отображает основную фазу по потере  $\text{K}_2\text{O}$  и смещения фигуративных точек в направлении угла  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . В целом, процесс разложения исходных пород данной диаграммы основан на динамике разрушения калиевого полевого шпата, плагиоклаза и железо-магниевого силикатов.

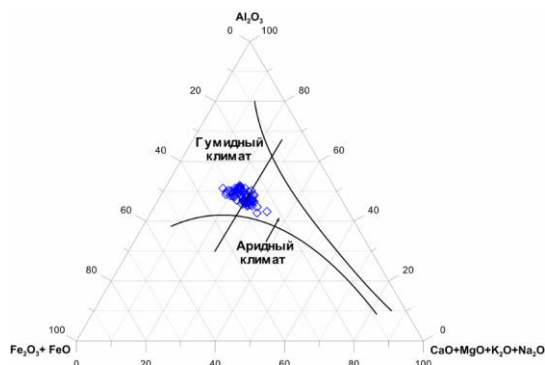


Рисунок 9.18 – Диаграмма Ерофеева-Цеховского. Скважина BDP-99  
 ◊ – различные типы отложений разреза в интервале до 1 млн. лет назад

При разделении составов отложений Академического хребта по возрастному критерию (рисунок 9.19), где границей раздела отложений выбран интервал 2,588 млн. лет назад, соответствующий границе плиоцена и плейстоцена, фигуративные точки, относящиеся к «теплым» и «холодным» интервалам, проявляют тенденцию к разделению. Это связано с тем, что более древние осадки плиоцена демонстрируют большую степень разложения относительно более молодых осадков плейстоцена.

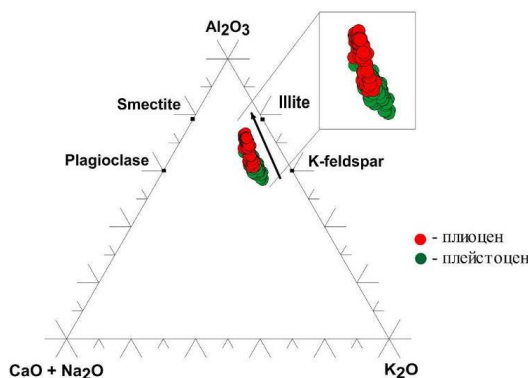


Рисунок 9.19 – Диаграмма направленности выветривания для отложений разреза BDP-98 (Академический хребет). Осадки разделены по возрастному критерию – плиоцен/плейстоцен. Стрелкой указано направление выветривания

Для выявления условий выветривания на водосборной площади при поступлении терригенной фракции в отложения Академического хребта и поиска корреляционных связей приведен тренд выветривания, характеризующий осадки Селенгино-Бугульдейской перемычки (скважина BDP-99) (рисунок 9.20). Поскольку разделить осадки данного разреза по климатическому фактору не представляется возможным из-за отсутствия

детальной записи  $\text{SiO}_{2\text{био}}$ , на диаграмме приведен весь массив данных в возрастном диапазоне древнее 1,2 млн. лет назад.

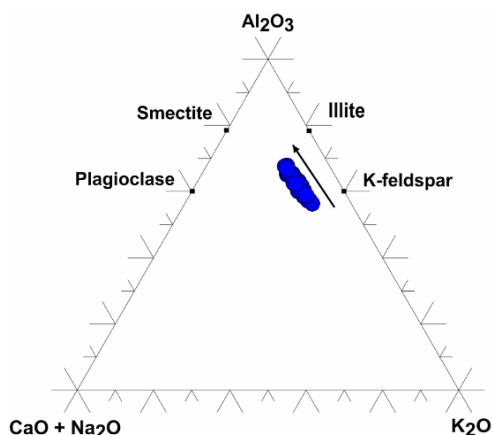


Рисунок 9.20 – Диаграмма направленности выветривания для отложений разреза BDP-99 (Селенгино-Бугульдейская перемычка). Стрелкой указано направление выветривания

Расположение тренда и длина его простираения в схожих с осадками Академического хребта координатах свидетельствует о чрезвычайной близости составов продуктов выветривания на обеих перемычках Байкала.

Микроэлементные характеристики плиоцен – плейстоценовых осадков озера Байкал по данным глубоководного бурения. Необайкальская стадия развития отличается ростом интенсивности горообразования и переходом от красноцветной формации к современному этапу – ледниковым отложениям [75]. Смена источников сноса 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 в оз. Байкал в 2019 году определены микроэлементные характеристики в интервале перехода от плиоцена к плейстоцену. При группировке трендов Be, Ga, Pb, Sn, Ti, Cr, Zn и  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  в донных отложениях озера Байкал выявляется их значительная антикорреляция (рисунок 9.21). Это свидетельствует об эффекте разбавления концентраций микроэлементов автохтонной биогенной компонентой. Выделяемые в байкальской осадочной летописи потепления и похолодания соответствуют морским изотопным стадиям.

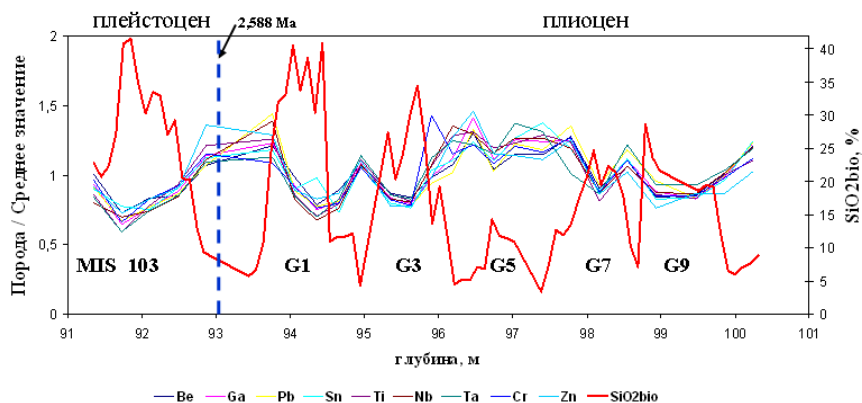


Рисунок 9.21 – Переход плиоцен – плейстоцен, группировка трендов ряда микроэлементов с учетом корреляции по  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  и морским изотопным стадиям MIS, G [76], (стадии, соответствующие потеплениям, пронумерованы)

Аналогичная тенденция выявляется по всей группе редкоземельных элементов (рисунок 9.22). Таким образом, с одной стороны, обнаруживается возможность разделения составов отложений и определения элементных характеристик автохтонной компоненты, с другой стороны наблюдается контаминация терригенного сигнала, фиксирующего динамику разрушения комплексов обрамления водоема.

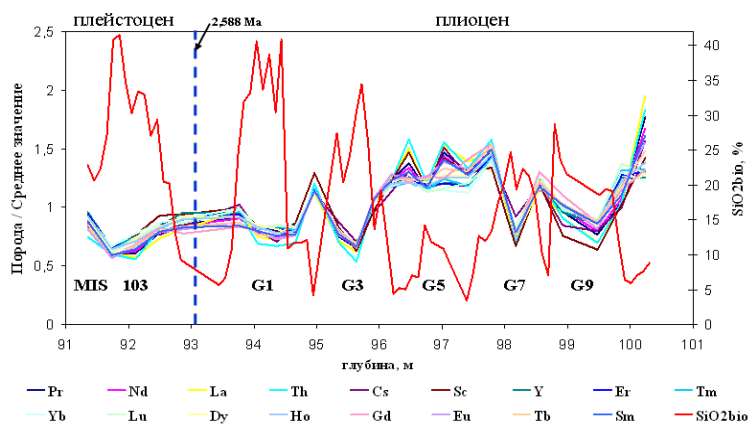


Рисунок 9.22 – Переход плиоцен – плейстоцен, группировка трендов РЗЭ с учетом корреляции модели по биогенному кремнезему ( $\text{SiO}_{2\text{био}}$ ) и морских изотопных стадий MIS [76, 77] (стадии соответствующие потеплениям пронумерованы)

При нормировании плиоцен-плейстоценовых осадков на кларки верхней континентальной коры [71], (рисунок 9.23) выявляется отличие отложений плиоцена от



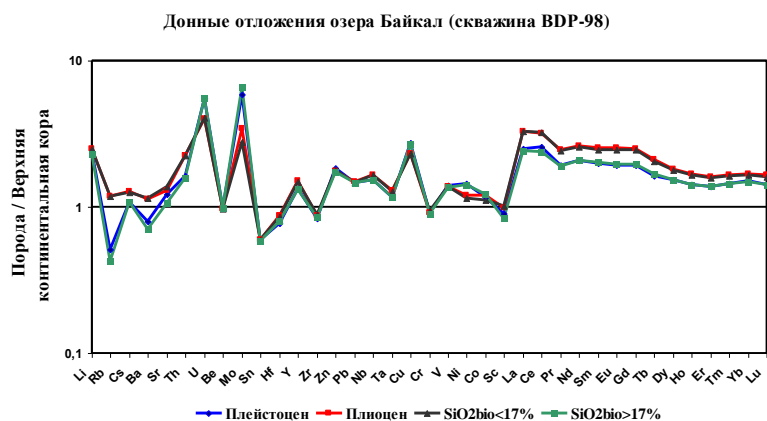


Рисунок 9.23 – Нормирование микроэлементного состава плиоцен – плейстоценовых осадков озера Байкал (скважина BDP-98) на кларки верхней континентальной коры по [71]

отложений плейстоцена. Плиоценовые разности осадков имеют 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 в позднем плиоцене - плейстоцене и активных тектонических движениях, выветривание коры выветривания в значительной мере сократилось. Таким образом, можно подтвердить выводы, полученные при определении изотопных характеристик стронция [78]. Так, изотопный состав Sr древнее 2,5 млн. лет, близок к таковому в корях выветривания и согласуется с утверждением о более активном химическом выветривании в плиоцене. В то же время изменение величин  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в осадках плейстоцена объясняется с позиций смешения вещества двух источников. Первый из них – коры выветривания, развивающиеся по гранитоидам и кислым кристаллосланцам. Второй – продукты разрушения основных пород, а также палеозойских карбонатных пород окружения водоема. При этом происходит значительное перемешивание продуктов химической и физической эрозии при переносе в водоем при похолодании климата.

При вынесении фигуративных точек на треугольные диаграммы La-Th-Sc, Th-Hf-Co [79], (рисунок 9.24) видно преобладание кислых магматических пород в источниках сноса (обеднение составов отложений Co и Sc). Плотное расположение фигуративных точек плиоценовых и плейстоценовых осадков свидетельствует о неизменности материнских источников сноса для всего интервала. Отсутствие резких различий для фигуративных точек плиоцен – плейстоценовых разностей, обогащенных и обедненных

SiO<sub>2</sub>био, также свидетельствует о нивелировании эффекта разбавления автохтонной биогенной компонентой при подобных построениях.

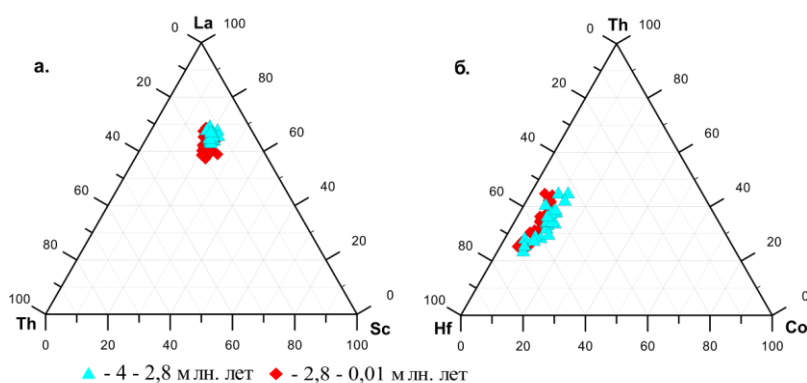


Рисунок 9.24 – Положение фигуративных точек плиоцен – плейстоценовых разностей осадков озера Байкал на диаграммах: **а.** La-Th-Sc, **б.** Th-Hf-Co (скважина BDP-98)

Для оценки основных источников поступления материала плиоцен – плейстоценовые разности осадков озера были вынесены на дискриминационную диаграмму [80] (рисунок 9.25). Фигуративные точки при этом располагаются в 2-х полях: изверженных пород основного состава и изверженных пород среднего состава.

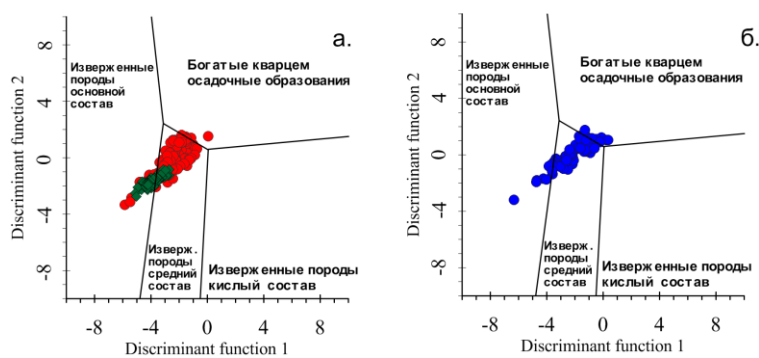


Рисунок 9.25 – Дискриминационная диаграмма [80] для осадков: **а.** – BDP-98 (ромбы – 4–2,8 млн. лет, кружки 2,8–0,01 млн. лет); **б.** – BDP-99

Примечательным является отсутствие распределения фигуративных точек в поле кислых источников сноса независимо от условий седиментации как для Академического хребта (рисунок 9.25а.), так и для Селенгино-Бугульдейской перемычки (рисунок 9.25б.).

Среди комплексов герцинских гранитоидов Забайкалья наиболее выделяются породы чивыркуйского и нижнеселенгинского комплексов монцонитов и сиенитов,

частично локализованных как в береговой зоне восточного побережья Байкала, так и в долине рек Баргузин и Селенга. То есть, имело место поступление пород среднего или близкого к среднему составу в осадки озера. С другой стороны, необходимо учитывать, что несмотря на локализацию в водосборном бассейне 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 из отложений, сформированных 4–2,8 млн. лет назад и имеющих более основной состав, и отражающих спокойную седиментационную обстановку плиоцена. Так как подводные поднятия, такие как Академический хребет, отражают поступление преимущественно тонких фракций из водной толщи, очевидным становится вывод о максимальной аккумуляции в горизонтах разреза BDP-98 продуктов химического выветривания среди большинства подводных морфоструктур озера.

В 2020 году были продолжены изотопно-геохимические исследования отложений глубоководных байкальских скважин. Ранее, при изучении изотопной систематики  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в разрезе BDP-98 получены характеристики для диатомового ила и ледниковой глины. На рисунке 9.26 показано распределение изотопов стронция в осадках Академического хребта моложе 7,2 млн. лет. Вариации изотопного состава стронция по разрезу подтверждают ранее выдвинутые выводы и вносят ряд новых моментов в оценку тектонических условий седиментации. Очевидное смещение изотопного состава стронция в обоих типах отложений с возрастом свыше 5 млн. лет демонстрирует значительное смещение терригенной и биогенной составляющей осадка в результате влияния авандельты реки Палеобаргузин на формирование отложений Академического хребта. На кривой распределения изотопного состава стронция для терригенных отложений зафиксировано два пика – 2,8 млн. лет и 250 тыс. лет.

Поскольку максимальные значения отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  как для ледниковых глин, так и диатомового ила согласуются с началом активного тектогенеза в Байкальской горной области 2,8–2,5 млн. лет назад и откликаются на возможный тектогенез в интервале 300–250 тыс. лет, согласуясь при этом с титановым модулем (ТМ), очевидным является подтверждение индикативных свойств величины  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  для выявления орогенного фактора позднего кайнозоя Байкальской рифтовой зоны.

Для оценки изотопных характеристик тонких фракций для пород Селенгино-Бугульдейской перемычки изучено распределение изотопов Sr и Nd в скважине BDP-99.

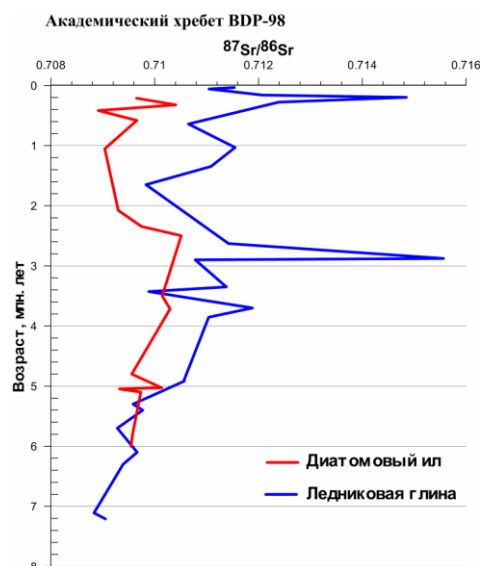


Рисунок 9.26 – Изотопное отношение стронция  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в донных отложениях Академического хребта (BDP-98) для 2-х типов осадка

На рисунке 9.27 представлено положение фигуративных точек для разрезов BDP-98 и -99 при изотопном картировании различных обстановок выветривания северного

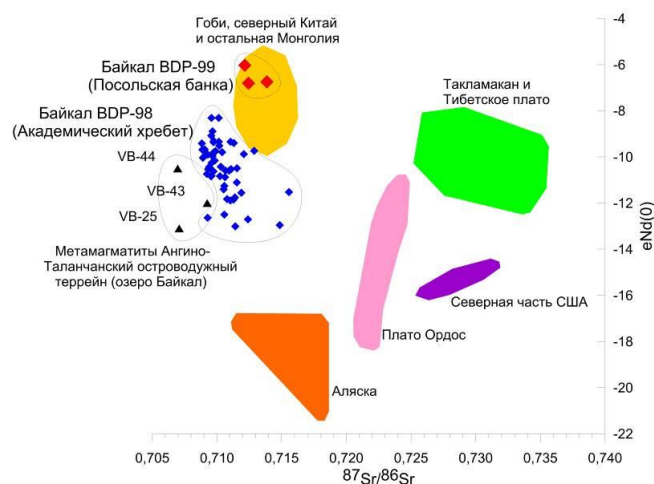


Рисунок 9.27 – Изотопное отношение стронция  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  /  $e\text{Nd}$  для донных отложений озера Байкал (BDP-98, 99) и некоторых пород обрамления (синтез литературных данных)

полушария. Для сравнительных характеристик приведены изотопные характеристики пород Ангино-Таланчанского островодужного террейна [81]. Отличительной особенностью изотопных меток донных отложений является их стремление к различным материнским источникам. Если для осадков Академического хребта характерна близость к породам обрамления водоема, то для осадков Селенгино-

Бугульдейской перемычки характерно поступление терригенной компоненты из дальних источников вещества, продуктов выветривания Монголии. Подобная картина очевидна и контролируется стоком р. Селенги имеющей весьма обширный водосборный бассейн.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате реализации плана научно-исследовательских работ 2017–2020 года

- разработана палеоэкологическая модель эволюции Ивано-Арахлейского заказника за последние 15 тыс. лет, указывающая на возможность резкой реорганизации наземных экосистем региона в ответ на глобальное потепление;

- впервые расшифрована геохимическая эволюция бассейна оз. Хикушка (Окинское плато) за последние 14 тысяч лет;

- впервые с вековым разрешением реконструирована история климата, ландшафтов, пожарных явлений в бассейне оз. Ильчир что служит основой понимания и планирования мер рационального использования его водных ресурсов;

- впервые подтверждено обнаружение экскурсов Гётеборг и Моно Лейк в записи озёрных отложений оз. Баунт;

- на основе изучения макро- и микроэлементного состава донных отложений оз. Байкал (керны ВDP-93 и ВDP-98) установлены источники осадочного материала в озеро за последние 5 млн. лет в зависимости от условий природной среды и климата;

- первые результаты исследования изотопного состава атмосферных осадков Байкальского региона позволили определить основные траектории движения воздушных масс, приносящих осадки в регион в течение года, что станет основой реконструкций и моделирования траекторий движения влагонесущих масс в прошлом для понимания современного состояния регионального атмосферного переноса;

- полученная первая, наиболее полная на сегодняшний день запись вулканической активности в долине р. Жом-Болок. Она 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  $^{14}\text{C}$  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;

- установлено, что изменения содержания большинства исследованных СОЗ в атмосферном воздухе, снеговом покрове и почвах Байкальского региона в течении года обусловлены метеорологическими факторами, глобальным и региональным атмосферным

переносом, а также локальными постоянно или периодически действующими источниками;

– показано что в урбанизированных районах по содержанию в снеге в конце зимы можно судить о содержании ПХБ, ГХЦГ и ДДТ в атмосферном воздухе за предыдущий как зимний период, так и год;

– установлено, что метан в осадках нефтегазового проявления Горевой утес (оз. Байкал) имеет термогенное происхождение;

Таким образом, все задачи проекта выполнены полностью. Полученные результаты являются новыми и вносят существенный вклад в понимание эволюция экосистем Внутренней Азии в позднем кайнозое, закономерностей их длительного функционирования, а также причин, вызывающих разномасштабные по времени и амплитуде проявления сдвигов в состоянии экосистем. Научный уровень выполненной научно-исследовательской работы по проекту соответствует мировому уровню аналогичных исследований.

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

Результаты имеют очевидную научную новизну, заключающуюся в фундаментальном увеличении суммы наших знаний о понимании ранних этапов заселения региона в периоды резких и коротких климатических изменений переходного периода от последнего оледенения к современному межледниковому периоду.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Reshetova S.A., Bezrukova E.V., Panizzo V., Henderson A., Ptitsyn A.B., Daryin A.V., Kalugin I A. Vegetation of Central Transbaikalia in the Late Glacial Period and Holocene // *Geography and Natural Resources*.– 2013.– Vol. 34.– No. 2.– p. 172–178.
- 2 Ивано-Арахлейский заказник: природно-ресурсный потенциал территории / Отв. ред. В.П. Горлачев – Чита: Поиск. 2002.– 232 с.
- 3 Grimm E.C., TGVView. Illinois State Museum, Research and Collections Center – Springfield, 2004.
- 4 North Greenland Ice Core Project Members. High resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the Last Interglacial Period // *Nature*.– 2004.– Vol. 431.– p. 147–151.
- 5 Demske D., Heumann G., Granoszewski W., Nita M., Mamakowa K., Tarasov P., Oberhänsli H. Late glacial and Holocene vegetation and regional climate variability evidenced in high-resolution pollen records from Lake Baikal // *Global and Planetary Change*.– 2005.– Vol. 46.- p. 255–279.
- 6 Tarasov P., Bezrukova E., Krivonogov S. Late Glacial and Holocene changes in vegetation cover and climate in southern Siberia derived from a 15 kyr long pollen record from Lake Kotokel // *Climata of the Past*.– 2009.– Vol. 5.– p. 285–295.
- 7 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.– Vol. 64.– p. 3515–3523.
- 8 Bush A.B.G. CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O and orbitally driven climate variability over central Asia through the Holocene // *Quaternary International*.– 2005.– Vol. 136.– p. 15–23.
- 9 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.– No. 4.– p. 47–57.
- 10 Berger A., Loutre, M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // *Quaternary Science Reviews*.– 1991.– No. 10.– p. 297–317.
- 11 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.– Vol. 470.– p. 26–37.
- 12 New M., Lister D., Hulme M., Makin I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas // *Climate Research*.– 2002.– Vol. 21.– p. 1–25.
- 13 Bondarenko N.A., Sheveleva N.G., Domyшева V.M. Structure of plankton communities in Ilchir, an alpine lake in eastern Siberia // *Limnology*.– 2002.– No 3.– p. 127–133.
- 14 Macdonald G.M. Conifer Stomata // Smol J.P., Birks H.J.B., Last W.M., Bradley R.S., Alverson K. (eds). *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments / Dordrecht: Springer. Developments in Paleoenvironmental Research*.– 2002.– Vol. 3. [https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1\\_3](https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1_3).
- 15 Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения Азиатской России – Новосибирск: Гео. 2002.– 705 с.
- 16 Traverse A. *Paleopalynology / Dordrecht: Springer. 2007.– 813 p. ISBN 9781402056093.*
- 17 Klemm J., Herzsuh U., Pisaric M.F.J., Telford R.J., Heim B., Pestryakova L.A. A pollen-climate transfer function from the tundra and taiga vegetation in Arctic Siberia and its applicability to a Holocene record // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*.– 2013.– p. 702–713.
- 18 Seppä H, Birks H.J.B, Odland A., Poska A., Veski S. A modern pollen–climate calibration set from northern Europe: Developing and testing a tool for palaeoclimatological reconstructions // *Journal of Biogeography*.– 2004.– 31.– p. 251–267.
- 19 Walker M., Gibbard Ph., Head M.J., Berkelhammer M., Björck S., Cheng H., Cwynar L.C., Fisher D., Gkinis V., Long A., Lowe J., Newnham R., Rasmussen S.O., Weiss H. Formal Subdivision of the Holocene Series/Epoch: A Summary // *Journal Geological Society of India*.– 2019.– Vol. 93.– p. 135–141.
- 20 Molinari Ch., Carcaillet Ch., Bradshaw R.H.W., Hannon G.E., Lehsten V. Fire-vegetation interactions during the last 11,000 years in boreal and cold temperate forests of Fennoscandia // *Quaternary Science Reviews*.– 2020.– Vol. 241.– DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106408

- 21 Leng, M.J., Barker, P.A. A review of the oxygen isotope composition of lacustrine diatom silica for palaeoclimate reconstruction // *Earth-Science Reviews.*– 2006.– Vol. 75.– p. 5–27.
- 22 Chaplignin B., Meyer H., Bryan A., Snyder J., Kemnitz H. Assessment of purification and contamination correction methods for analysing the oxygen isotope composition from biogenic silica // *Chemical Geology.*– 2012.– Vol. 300–301.– p. 185–199.
- 23 Павлова Л.А., Ткаченко Л.Л., Горегляд А.В., Кузьмин М.И. Особенности изучения элементного состава (неорганических компонентов) створок диатомовых водорослей методом РСМА // *Методы и объекты химического анализа.*– 2014.– т. 9.– № 2.– с. 65–72.
- 24 Chaplignin B., Meyer H., Friedrichsen H., Marent A., Sohns E., Hubberten H.-W. A high-performance, safer and semi-automated approach for the  $\delta^{18}\text{O}$  analysis of diatom silica and new methods for removing exchangeable oxygen // *Rapid Communications in Mass Spectrometry.*– 2010.– Vol. 24.– p. 2655–2664.
- 25 Leng M.J., Sloane H.J. Combined oxygen and silicon isotope analysis of biogenic silica // *Journal of Quaternary Science.*– 2008.– Vol. 23.– p. 313–319.
- 26 Meyer, H., Schönicke, L., Wand, U., Hubberten, H.-W., Friedrichsen, H. Isotope studies of hydrogen and oxygen in ground ice – experiences with the equilibration technique // *Isotopes in Environmental and Health Studies.*– 2000.– Vol. 36.– p. 133–149.
- 27 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.
- 28 Solomina O.N., Bradley R.S., Hodgson D.A., Ivy-Ochs S., Jomelli V., Mackintosh A.N., Nesje A, Owen L.A., Wanner H., Wiles G.C., Young N.E. Holocene glacier fluctuations // *Quaternary Science Reviews.*– 2015.– Vol. 111.– p. 9–34.
- 29 Щетников А.А. Проблемы морфотектогенеза озерных котловин (на примере Байкальской рифтовой зоны) // *Тихоокеанская геология.*– 2007.– т. 26.– №2.– с. 18–29.
- 30 Shchetnikov A.A. Morphotectonics of the Tunka rift and its bordering mountains in the Baikal rift system, Russia // *Geomorphology.*– 2016.– Vol. 273.– p. 258–268.

- 31 Холбоева С.А. Особенности флоры и типологическое разнообразие луговых степей Тункинской котловины // Исследования флоры и растительности Забайкалья: Матер. регион. науч. конф / Улан-Удэ: Изд-во БГУ.– 1998.– с. 67–68.
- 32 Allen J.R.L. and Thornley D.M. Laser granulometry of Holocene estuarine silts: effects of hydrogen peroxide treatment // *Holocene*. – 2004. – 14(2).– p. 290–295.
- 33 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.
- 34 Mikutta R., Kleber M., Kaiser K., 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.120–135.– doi:10.2136/sssaj2005.0120.
- 35 Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk R.C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP // *Radiocarbon*.– 2013.– Vol. 55.– N 4.– p. 1869–1887.
- 36 Yuan D.X., Cheng H., Edwards R.L., Dykoski C.A., Kelly M.J., Zhang M.L., Qing J.M., Lin Y.S., Wang Y.J., Wu J.Y., Dorale J.A., An Z.S., Cai Y.J. Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian monsoon // *Science*.– 2004.– Vol. 304.– p. 575–578.
- 37 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 W.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.– Vol. 106.– p. 14–28.
- 38 Tarasov P., Bezrukova E., Karabanov E., Nakagawa T., Wagner M., Kulagina N., Letunova P., Abzaeva A., Granoszewski W., Riedel F. Vegetation and climate

- dynamics during the Holocene and Eemian interglacials derived from Lake Baikal pollen records // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*.– 2007.– Vol. 252.– p. 440–457.
- 39 Безрукова Е.В., Щетников А.А., Кузьмин М.И., Шарова О.Г., Кулагина Н.В., Летунова П.П., Иванов Е.В., Крайнов М.А., Кербер Е.В., Филинов И.А., Левина О.В. Первые данные об изменении природной среды и климата Жомболокского вулканического района (Восточный Саян) в среднем-позднем голоцене // *Доклады Академии Наук*.– 2016.– т. 468.– №3.– с. 323–327.
- 40 Agatova A.R., Nazarov A.N., Nepor R.K., Rodnight H. Holocene glacier fluctuations and climate changes in the southeastern part of the Russian Altai (South Siberia) based on a radiocarbon chronology // *Quaternary Science Reviews*.– 2012.– Vol. 43.– p. 74–93.
- 41 Briner J.P., McKay N.P., Axford Y., Bennike O., Bradley R.S., de Vernal A., Fisher D., Francus P., Fréchette B., Gajewski K., Jennings A., Kaufman D.S., Millerl G., Rouston C., Wagner B. Holocene climate change in Arctic Canada and Greenland // *Quaternary Science Reviews*.– 2016.– Vol. 147.– p. 340–364.
- 42 Алексеева Н.В. Эволюция природной среды Западного Забайкалья в позднем кайнозое (по данным фауны мелких млекопитающих) / Ред. А.В. Додонов. Москва.– 2005.– 141 с.
- 43 Акульшина Е.П. Эволюция физико-химических условий осадкообразования в рифее и фанерозе // *Среда и жизнь в геологическом прошлом*.– Новосибирск: Наука.– 1990.– с. 17–26.
- 44 Гнибиденко З.Н., Ербаева М.А., Пospelова Г.А. Палеомагнетизм и биостратиграфия некоторых отложений верхнего кайнозоя Западного Забайкалья // *Палеомагнетизм мезозоя и кайнозоя Сибири и Дальнего Востока*.– Новосибирск: ИГиГ СО РАН.– 1976.– с. 75–95.
- 45 Pilans B., Gibbard P. The Quaternary Period // *The Geological Time Scale*.– 2012.– Ch. 30.– p. 979–1010.– <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00030-5>.
- 46 Chlachula J., Evans M.E., Rutter N.W. A magnetic investigation of a Late Quaternary loess/palaesol record in Siberia // *Geophysical Journal International*.– 1998.– Vol. 132.– p. 128–132.

- 47 Казанский А.Ю., Рященко Т.Г., Матасова Г.Г., Акулова В.В. Петромагнетизм субаэральных отложений Прибайкалья // Геофизический журнал.– 2006.– т. 28.– № 5.– с. 1035–1047.
- 48 Матасова Г.Г., Казанский А.Ю., Щетников А.А., Филинов И.А. Корреляция петромагнитных и гранулометрических параметров четвертичных отложений разреза Тагай (о.Ольхон, оз. Байкал) // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. Санкт-Петербургский государственный университет: Филигрань.– 2016.– с. 103–110.
- 49 Гранин Н.Г., Гранина Л.З. Газовые гидраты и выходы газов на Байкале // Геология и геофизика. – 2002. – № 7. – с. 629–637.
- 50 Исаев В.П., Коновалова Н.Г., Михеев П.В. Природные газы Байкала // Геология и геофизика. – 2002. – № 7. – с. 638–643.
- 51 Granin N.G., Makarov M.M., Kucher K.M., Gnatovsky R.Y. Gas seeps in Lake Baikal-detection, distribution, and implications for water column mixing // Geo-Marine Letters. – 2010. – Vol. 30.– № 3-4.– p. 399–409.
- 52 Конторович А.Э., Дробот Д.И., Преснова Р.Н. Геохимия нафтидов и проблема генезиса байкальской нефти // Советская геология.– 1989 – № 2.– с. 21–29.
- 53 Конторович А.Э., Каширцев В.А., Москвин В.И., Бурштейн Л.М., Земская Т.И., Костырева Е.А., Калмычков Г.В., Хлыстов О.М. Нефтегазоносность отложений озера Байкал // Геология и геофизика.– 2007.– № 12.– с. 1346–1356.
- 54 Каширцев В.А., Конторович А.Э., Москвин В.И., Данилова В.П., Меленевский В.Н. Терпаны нефтей озера Байкал // Нефтехимия.– 2006.– № 4.– с. 243–250.
- 55 Калмычков Г.В., Егоров А.В., Кузьмин М.И., Хлыстов О.М. Генетические типы метана озера Байкал // Доклады Академии наук.– 2006.– № 5 (411).– с. 672–675.
- 56 Хлыстов О.М., Горшков А.Г., Егоров А.В., Земская Т.И., Гранин Н.Г., Калмычков Г.В., Воробьева С.С., Павлова О.Н., Якуп М.А., Макаров М.М., Москвин В.И., Грачев М.А. Нефть в озере мирового наследия // Доклады Академии наук.– 2007.– № 5 (414).– с. 656–659.
- 57 Хлыстов О.М., Земская Т.И., Ситникова Т.Я., Механикова И.В., Кайгородова И.А., Горшков А.Г., Тимошкин О.А., Шубенкова О.В., Черницына С.М., Ломакина А.В., Лихошвай А.В., Сагалевич А.М., Москвин В.И., Пересыпкин

- В.И., Беляев Н. А., Слипенчук М.В., Тулохонов А.К., Грачев М.А. Донные битумные постройки и населяющая их биота по данным обследования озера Байкал с глубоководных обитаемых аппаратов “Мир” // Доклады Академии наук.– 2009.– № 5 (428).– с. 682–685.
- 58 Ломакина А.В., Погодаева Т.В., Морозов И.В., Земская Т.И. Микробные сообщества зоны разгрузки газонефтедержащих флюидов ультрапресного озера Байкал // Микробиология.– 2014.– № 3.– с. 355–365.
- 59 Мамонтова Е.А., Тарасова Е.Н., Мамонтов А.А., Горегляд А.В., Ткаченко Л.Л. Изменение концентраций полихлорированных бифенилов и хлорорганических пестицидов в атмосферном воздухе Северного Прихубсугулья в 2008-2015 // Всероссийской конференции по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум): сб. научн. трудов.– СПб: ООО изд-во Лемо.– 2016.– с. 254–258
- 60 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.
- 61 Тарасова Е.Н., Мамонтова Е.А., Мамонтов А.А., Горегляд А.В., Цыпукова С.С., Ткаченко Л.Л. Распределение и временная изменчивость химического состава вод озера Хубсугул (Монголия) // Всероссийской конференции по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум: сб. научн. трудов.– СПб: ООО изд-во Лемо.– 2016.– с. 399–405.
- 62 Тарасова Е.Н., Мамонтова Е.А., Мамонтов А.А., Горегляд А.В., Цыпукова С.С., Ткаченко Л.Л. Пространственное распределение и временная изменчивость химического состава вод озера Хубсугул (Монголия) // Экологическая химия.– 2017.– Т. 26.– № 2.– с. 87–100.
- 63 Мамонтова Е.А., Тарасова Е.Н., Мамонтов А.А., Кузьмин М.И., Борисов Б.З., Бульбан А.П., Юрченко С.Г., Лепская Е.В., Левшина С.И., Трегубов О.Д. Стойкие органические загрязнители в атмосферном воздухе некоторых территорий Сибири и Дальнего Востока России // География и природные ресурсы.– 2012.– №4.– с. 40–47.
- 64 Hogarth J.N., Seike N., Kobara Y., Habib A., Nam J.-J., Lee J.-S., Li Q., Liu X., Li J., Zhang G., Masunaga S. Passive air monitoring of PCBs and PCNs across East

- Asia: A comprehensive congener evaluation for source characterization // *Chemosphere*.– 2012.– Vol. 86.– p. 718–726.
- 65 CCME. Canadian environmental quality guidelines. PN 1299. Canadian Council of Ministers of the Environment. Winnipeg.– 1999.– ISBN 1\_896997\_34\_1.  
[http://www.ccme.ca/publications/ceqg\\_rcqe.html](http://www.ccme.ca/publications/ceqg_rcqe.html)
- 66 Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга (региональный норматив).– СПб.– 1996.– 19 с.
- 67 Мамонтова Е.А., Тарасова Е.Н., Мамонтов А.А., Кузьмин М.И., Борисов Б.З., Бульбан А.П., Юрченко С.Г., Лепская Е.В., Левшина С.И., Трегубов О.Д. Стойкие органические загрязнители в атмосферном воздухе некоторых территорий Сибири и Дальнего Востока России // *География и природные ресурсы*.– 2012.– № 4.– с. 40–47.
- 68 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.
- 69 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.
- 70 Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones // *Journal of Geology*.– 1983.– Vol. 91., № 6.– p. 611–627.
- 71 McLennan S.M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*.– 2001.– Vol. 2.,– №. 4.
- 72 Гавшин В.М., Бобров В.А., Богданов Ю.А. Урановые аномалии в глубоководных отложениях озера Байкал // *Доклады РАН*.– 1994.– Т. 334.– №. 3.– с. 356–359.
- 73 Herron M.M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // *Journal of Sedimentary Petrology*.– 1988.– Vol. 58.– з. 820–829.
- 74 Юдович Я.Э. Региональная геохимия осадочных толщ.– Л.: Наука, 1981.– с. 276.
- 75 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.

- 76 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.– Vol. 205.– №. 1–2.– p.126-136.
- 77 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.
- 78 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.
- 79 Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее возраст и эволюция.– М. : Мир.– 1988.– 371 с.
- 80 Roser V.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.
- 81 Макрыгина В.А., Сандимиров И.В., Сандимирова Г.П., Пахольченко Ю.А., Котов А.Б., Ковач В.П., Травин А.В. Nd Sr систематика метамагматических пород ангинской и таланчанской толщ средней части озера Байкал // *Геохимия*.– 2010.– №10.– с. 1040–1048.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Список публикаций 2020 г. по теме исследований

#### *Статьи*

- 1 Hachikubo A., Minami H., Yamashita S., Khabuev A., Krylov A., Kalmychkov G., Poort J., De Batist M., Chenskiy A., Manakov A., Khlystov O. Characteristics of hydrate bound gas retrieved at the Kedr mud volcano (southern Lake Baikal) // Scientific Reports.– 2020.– №10.– article № 14747.– p. 1-2. DOI: 10.1038/s41598-020-71410-2
- 2 Harding P., Bezrukova E.V., Kostrova S.S., Lacey J.H., Leng M.J., Meyer H., Pavlova L.A., Shchetnikov A., Shtenberg M.V., Tarasov P.E., Mackay A.W. Hydrological (in)stability in Southern Siberia during the Younger Dryas and early Holocene // Global and Planetary Change.– 2020.– Vol. 195.– article № 103333.
- 3 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.– 2020.– Vol. 34.– p. 51–67.
- 4 Cao X., Tian F., Andreev A., Anderson P.M., Lozhkin A.V., Bezrukova E., Ni J., Rudaya N., Stobbe A., Wiczorek M., Herzsuh U. A taxonomically harmonized and temporally standardized fossil pollen dataset from Siberia covering the last 40 ka // Earth System Science Data.– 2020.– Vol. 12.– №1.– p. 119–135. DOI: 10.5194/essd-2019-7.
- 5 Chubarov V., Amosova A., Finkelshtein A. X-ray fluorescence determination of major elements in ferromanganese nodules // X-ray spectrometry.– 2020.– Vol. 49.– №5.– p. 615–621. DOI: 10.1002/xrs.3162.
- 6 Mamontova E.A., Tarasova E.N., Mamontov A.A. Freshwater seal as a source of direct and indirect increased human exposure to persistent organic pollutants in a background area // Science of the Total Environment.– 2020.– Vol. 715, Номер статьи: 136922. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136922/
- 7 Солотчин П.А., Солотчина Э.П., Безрукова Е.В., Жданова А.Н. Климатические сигналы в позднечетвертичных донных осадках озера Баунт (Северное Забайкалье) // Геология и геофизика.– 2020.– №10.– с.1397–1408. DOI: 10.15372/GiG2020117
- 8 Иванова В.В., Ербаева М.А., Щетников А.А., Казанский А.Ю., Матасова Г.Г., Алексеева Н.В., Филинов И.А., Кузьмин М.И. Опорный разрез Тологой

(верхний кайнозой, Забайкалье): реконструкция условий и особенностей осадконакопления // Геология и геофизика.– 2020.– №12, с. DOI: 10.15372/GiG2020141

*Монографии*

- 1 30 лет программе «Байкал-бурение» / Отв. ред.: М.И. Кузьмин, Е.В. Безрукова; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т геохимии им. А.П. Виноградова.– Новосибирск: Академическое изд-во «Гео».– 2020.– с. 258-277.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2017-2020 г.г. в соответствии с государственным заданием

индикатор	Ед. измерения	Всего
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	единиц	<b>26</b>
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	единиц	<b>24</b>
Количество монографий (глав в монографиях)	единиц	<b>3</b>
Количество публикаций в сборниках конференций	единиц	<b>6</b>
Число тезисов в конференциях	единиц	<b>28</b>