Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН)

На правах рукописи

Новиков Вячеслав Сергеевич

Геохимические индикаторы климатических изменений и катастрофических событий в позднеголоценовых отложениях озер Кучерлинское, Нижнее и Среднее Мультинские (Горный Алтай), Пеюнгда (Эвенкия) и Чаша (Камчатка)

1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени кандидата геологоминералогических наук

> Научный руководитель: к.г.-м.н. Дарьин Андрей Викторович

Новосибирск, 2025

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ОЗЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ	.14
1.1 Теоретические основы	.14
1.2 Ленточные глины (варвы)	.17
1.3 Отбор керна донных осадков	.20
1.4 Лабораторная работа с керном	.23
1.4.1 Изготовление твердых препаратов и шлифов	.24
1.4.2 Аналитическая микростратиграфия	.25
1.4.3 Применение электронного микроскопа	.28
1.4.4 Рентгенофазовый анализ	.28
1.4.5 Гранулометрический анализ	.28
1.5 Определение возраста донного осадка (¹³⁷ Cs, ²¹⁰ Pb, ¹⁴ C)	.29
1.6 Методика построения количественных температурных реконструкций	.32
ГЛАВА 2. ОЗЕРО КУЧЕРЛИНСКОЕ, СРЕДНЕЕ И НИЖНИЕ МУЛЬТИНСКИЕ	
(ГОРНЫИ АЛТАИ)	.35
2.1 Физико-географические условия	.35
2.2 Геологическое строение	.39
2.3 Отбор образцов и пробоподготовка	.43
2.4 Методы исследования	.46
2.4.1. Подсчет визуально выделяемых слоев	.46
2.4.2. Изотопные исследования	.47
2.4.3. Сканирующий микроанализ образцов донных осадков	.48
2.5. Результаты	.49
2.5.1. Построение опорного разреза оз. Нижнее Мультинское (MN-02 и MN-03)	.51
2.5.2. Построение возрастной модели	.52
2.5.3 Поиск следов катастрофических событий	.55
2.5.4 Построение температурной реконструкции региона исследования	.58
Выводы 2 главы	.63
ГЛАВА 3. ОЗЕРО ПЕЮНГДА (ЭВЕНКИЯ)	.65
3.1. Физико-географические условия	.65
3.2 Геологическое строение	.66
3.3 Отбор образцов и пробоподготовка	.67
3.5 Методы исследования	.70
3.5.1 Построение возрастной модели	.70
3.5.2 Комплексное исследование аномального слоя 1908-10 гг.	.73
3.5.3 Построение температурной палеореконструкции	.77
Выводы 3 главы	.82

ГЛАВА 4. ОЗЕРО ЧАША
4.1 Геолого-географическая характеристика
4.2 Отбор образцов и пробоподготовка86
4.3 Извержение вулкана Ксудач 1907 года
4.4 Методы исследования90
4.5. Результаты
4.5.1 Оценка скорости современного осадконакопления
4.5.2 Сравнение данных µРФА-СИ с литературными
4.5.3 Построение возрастной модели керна оз. Чаша (0-60 мм)
Выводы 4 главы
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
Список литературы
Приложение 1. Пределы допускаемой погрешности измерений методом µРФА-СИ107
Приложение 2. Параметры распределения естественных (²¹⁰ Pb) и искусственных (¹³⁷ Cs) радионуклидов (Бк/кг) в донных отложениях оз. Нижнее Мультинское (MN-02) и оз. Кучерлинское (Kuch-18-2)
Приложение 3. Содержания элементов (ppm) для верхних 77 мм керна Kuch-2018-2108
Приложение 4. Набор данных среднегодовых температуры110
Приложение 5. Содержания элементов (ppm) для верхних 70 мм керна Реу-22-3112
Приложение 6. Содержания элементов (ppm) для верхних 60 мм керна Chasha-23-А113
Приложение 7. Параметры распределения естественных (²¹⁰ Pb) и искусственных (¹³⁷ Cs) радионуклидов (dpm/g) в донных отложениях оз. Чаша

введение

Актуальность темы исследований.

Изменения, происходящие в озерах на протяжении всего жизненного цикла и регистрируемые в донных осадках, преимущественно связаны с климатическими изменениями (Wehrli et al., 1997). Озерные отложения хранят информацию о прошлой изменчивости температуры, количестве и характере атмосферных поступлений, естественных темпах изменения окружающей среды, антропогенных нарушениях и катастрофических событиях прошлого.

Изучение элементного состава донных отложений способствует пониманию механизмов поступления вещества в донный осадок и способствует формированию детальной модели процессов осадконакопления. Данная модель может применяться с целью выделения климатических индикаторов и построения температурных реконструкций прошлого.

Степень разработанности темы исследования.

Достаточно хорошо исследованная динамика среднегодовых температур воздуха северного полушария за последние 2000 лет, складывается из набора локальных палеореконструкций (Esper et al., 2002; Yang et al., 2002; Mangini et al., 2005; Oppo et al., 2009; Diaz et al., 2011; Graham et al., 2011; Мыглан и др., 2012; Клименко и др., 2014; Ahmed et al., 2014; Neukom et al., 2014; Бабич и др., 2015; Rudaya et al., 2016, 2020, 2021; Stauch, 2016; Lan et al., 2018; и др.), при этом пространственные закономерности остаются недостаточно определенными (Shi, 2012). Многие исследования сосредоточены на климатических изменениях в голоцене в Европе, Северной Америке, Гренландии и Китае (Walker, 1999, Svendsen et al., 2004, Larsen et al., 2006, Jones et al., 2009; Clarke et al., 2020; Kostrova et al., 2021; Lebas et al., 2021; Melles et al., 2022).

В России детальные реконструкции климатических изменений проводились преимущественно для северо-западных территорий (Хотинский, 1977, Величко и Фаустова., 1989, Larsen et al., 2006, Wohlfarth et al., 2007, Суббето, 2009). В последние годы, из-за высокой чувствительности к глобальным изменениям климата, Восточная Сибирь и Дальний Восток стали ключевыми регионом для изучения прошлой изменчивости климата и окружающей среды (Anderson et al., 2002; Müller et al., 2009; 2010; Werner et al., 2010; Nazarova et al., 2011; 2014; Biskaborn et al., 2012; 2016; Pestryakova et al., 2012; Herzschuh et al., 2014; Tarasov et al., 2014; Diekmann et al., 2016; Baumer et al., 2020; Vyse et al., 2020; Бабич и др., 2023). На территории имеется большое количество озер различного генезиса и морфометрии, хранящих в своих отложениях подробную информацию о климате, ландшафтах и гидрологии с момента их первоначального отложения (Zhirkov, 2000; Pestryakova et al., 2012). Удаленное расположение озер подвергает их минимальному антропогенному воздействию, в результате чего эти озера архивами являются надежными ДЛЯ экологических климатических реконструкций (Kumke et al., 2007; Pestryakova et al., 2012; Biskaborn et al., 2021).

Объектами исследований являются донные отложения озер Горного Алтая (Кучерлинское, Нижнее и Среднее Мультинские), Эвенкии (Пеюнгда) и Камчатки (Чаша). Предмет исследования – элементный состав донных отложений.

Цель работы: исследование связи элементного состава позднеголоценовых донных осадков пресноводных континентальных озер с региональными погодно-климатическими условиями, тектоническими и катастрофическими событиями.

В задачи работы входит:

1. Подбор объектов исследования на основании следующих критериев: глубокие пресноводные озера; отсутствие антропогенного воздействия на экосистему озер; размещение в зонах, датируемых тектоническими или катастрофическими событиями; наличие региональных метеостанций с длительными рядами инструментальных метеонаблюдений.

- Выбор методов исследования, исходя из требований: большой набор анализируемых элементов в широком диапазоне концентраций (от г/т до %); высокое пространственное разрешение анализа для получения геохимической информации с годовым временным разрешением (0,1 – 1 мм); недеструктивность образцов исследований.
- 3. Проведение пробоотбора и пробоподготовки, получение аналитических данных.
- 4. Изучение распределения активности изотопов ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb, ¹⁴C. Построение возрастных моделей «глубина керна возраст осадка», пересчет линейных показателей (глубина керна) геохимических данных во временные ряды.
- 5. Поиск климатически коррелированных элементов, построение трансферных функций, устанавливающих связь инструментальных метеоданных с составом датированных слоев донных осадков.
- 6. Поиск элементов индикаторов катастрофических региональных событий, моделирование образования геохимических аномалий.
- Построение климатических реконструкций высокого временного разрешения по геохимическим данным с использованием трансферных функций.

Фактический материал и методы исследований. Основой работы послужил материал, собранный и обработанный автором за период 2018 – 2024 гг. в ходе выполнения научно-исследовательских работ по проектам Лаборатории литогеодинамики осадочных бассейнов Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН № 0122041400214-9, РФФИ № 19-05-50046 и РНФ № 22-17-00185.

В составе полевых отрядов ИГМ СО РАН, а также международных экспедиций совместно с учеными из других организаций России и Китая автором отобрано и проанализировано 8 кернов донных отложений из 5 озер.

Твердые препараты донных осадков готовились в лаборатории литогеодинамики осадочных бассейнов №220 ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева. При обработке исходного материала применялись различные аналитические методы, имеющиеся в ИГМ СО РАН, ИЯФ СО РАН, ЦКП «Геохронология кайнозоя», ИБФ СО РАН (г. Красноярск), НИЦ "Курчатовский институт" (г. Москва), Шанхайский центр синхротронного излучения (Шанхай, Китай), Beta analytics (Майами, США).

Съёмка рентгеновских спектров проводилась на автоматизированном порошковом дифрактометре ДРОН-8 в ИГМ СО РАН. Гранулометрический анализ проведен в Лаборатория геологии кайнозоя ИГМ СО РАН, Методом лазерной дифрактометрии на анализаторе размера частиц Fritsch Analysette 22.

Анализ элементного состава образцов донных осадков проводился с использованием рентгеновского источника синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-4 ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск), Курчатовском комплексе синхротронно-нейтронных исследований (г. Москва, <u>http://kcsni.nrcki.ru/</u>) и Шанхайском синхротронном центре (Шанхай, Китай, http://www.ssrf.ac.cn/).

Радиоуглеродный анализ образцов выполнен в ЦКП «Геохронология кайнозоя», Новосибирск (г. Новосибирск), Университете Ланьчжоу, Китай и в лаборатории «Beta analytics» (Майами, США, <u>https://www.radiocarbon.com/</u>). Распределение активности изотопов ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb сделаны в Институте Геологии и Геофизики Китайской Академии Наук (Пекин, <u>http://www.igg.cas.cn</u>) с использованием германиевого детектора колодезного типа (EGPC 100P-15R) и в Аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск) с использованием полупроводниковой низкофоновой гаммаспектрометрии на коаксиальном Ge-детекторе с низкофоновым криостатом по стандартной методике (аналитик – к.г.-м.н. М.С.Мельгунов).

6

Анализ методом КР-спектроскопии проводился в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Положения, выносимые на защиту:

1. С применением метода микро-РФА на пучках синхротронного излучения установлена достоверная функциональная зависимость элементного состава датированных слоев донных осадков озер из разных климатических зон Сибири – Кучерлинское, Нижнее и Среднее Мультинские (Горный Алтай) и Пеюнгда (Эвенкия) – от среднегодовой температуры приповерхностного воздуха.

2. На основе установленных функциональных зависимостей построены палеотемпературные реконструкции на временном интервале 1400 лет, для которых определены временные рамки известных общемировых периодов потепления и похолодания в донном осадке озер Кучерлинское и Пеюнгда: Похолодание Темного века (500-800 г.н.э.), Средневековый теплый период (800-1300 г.н.э.), Малый ледниковый период (1300-1900 г.н.э.) и Современное потепление (с 1900 г.н.э).

3. В донных отложениях исследуемых озер выявлены горизонты, маркирующие катастрофические события разного генезиса: Великое Монгольское землетрясение 1761 г. (озеро Кучерлинское, Горный Алтай), извержение вулкана Ксудач 1907 г. (озеро Чаша, Камчатка), взрыв Тунгусского космического тела 1908 г. (озеро Пеюнгда, Эвенкия).

Научная новизна. Оригинальность состоит в методологическом подходе к исследованию донных отложений озер и построении температурных реконструкций с высоким разрешением для интервала последних тысячелетий. Изучение элементного состава осадка озер происходит с применением микро-РФА на пучках синхротронного излучения. Данный метод позволяет определять значительный набор элементов с низким пределом обнаружения, и использовать каждый из них для нахождения индикаторов климатических изменений.

В данной работе представлена первая климатическая реконструкция с высоким временным разрешением для района, расположенного в пределах Эвенкийского автономного округа, и охватывающая более 1000 лет. Впервые на образцах донных осадков озер Эвенкии проведен сканирующий элементный анализ методом микро-РФА-СИ.

В рамках настоящей работы построена первая обобщенная температурная реконструкция по результатам исследования донных отложений приледниковых озер Российского Алтая, охватывающая интервал последних тысячелетий. Впервые, на основании изучения элементного состава осадка озера Кучерлинское, построена температурная реконструкция на интервале 1400 лет.

В донных осадках озер Кучерлинское и Пеюнгда выделены следы таких катастрофических событий, как Монгольское землетрясение (1761 г.) и следы падения Тунгусского космического тела (1908 г.), которые ранее не выделялись.

Практическая значимость. Полученные температурные реконструкции для каждого региона исследования отражают общемировые тренды известных периодов потепления и похолодания. Результаты исследования могут использоваться при реконструкции климатических изменений для территорий Центральной Азии (Алтайский край, Тыва, Западная Монголия), Северо-Восточной Сибири и в других близлежащих территориях. Построенная реконструкция, откалиброванная по данным региональных метеонаблюдений, дает возможность подготовки будущих региональных кратко- и среднесрочных погодно-климатических прогнозов.

Достоверность защищаемых научных результатов обеспечена использованием современных методик отбора и пробоподготовки изучаемых образцов, применением комплекса высокочувствительных аналитических методов, основанных на аттестованных методиках измерений. Исследования проведены на статистически значимом количестве образцов. Для верификации результатов выполнено их сравнение с опубликованными литературными

8

данными. Апробация результатов осуществлялась на всероссийских и международных конференциях. По теме исследования опубликовано 5 статей в международных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Апробация результатов и публикации. Материалы работы представлены в 5 статьях, входящих в международные реферативные базы данных ВАК, Web of Science и Scopus, 12 материалах конференций. Результаты исследований представлены в виде устных и стендовых докладов на 9 международных и всероссийских конференциях.

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. **Новиков В.С.**, Дарьин А.В., Бабич В.В., Дарьин Ф.А., Рогозин Д.Ю. Геохимия донных отложений Озера Пеюнгда (Тунгусский природный заповедник) и палеоклиматические реконструкции приарктических территорий Восточной Сибири // Геохимия. 2024. Т. 69 (5). С. 468-476.

2. Darin A.V., **Novikov V.S.**, Babich V.V. et al. Elemental Composition of Tephra in Lake Chasha Bottom Sediments (South Kamchatka) According to Scanning X-Ray Fluorescence Microanalysis with Synchrotron Radiation // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88 (1). P. 85–88.

3. Darin A.V., Rogozin D.Y., **Novikov V.S.** et al. Climatic Changes in the Arctic Regions of Eastern Siberia over the Last Millenium according to the Lithological–Geochemical Data on Bottom Sediments of Peyungda Lake (Krasnoyarsk Krai, Evenkia) // Dokl. Earth Sc. 2024. V. 514 (2). P. 349-353.

4. Дарьин А.В., Чу Г., Санс Ц., Бабич В.В., Калугин И.А., Маркович Т.И., **Новиков В.С.**, Максимов М.А., Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С., Ракшун Я.В., Гогин А.А., Сенин Р.А. Количественная реконструкция годовых температур воздуха Алтайского региона за последние 1400 лет по данным аналитической микростратиграфии ленточных глин оз. Кучерлинское // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85 (1). С. 97-108.

5. Дарьин А.В., Чу Г., Сан Ц., Бабич В.В., Калугин И.А., Маркович Т.И., **Новиков В.С.**, Дарьин Ф.А., Ракшун Я.В. Архив климатических изменений и сейсмических событий в ледниковых глинах озера Кучерлинского (Алтай) // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11 (3). С. 624-631.

Публикации в трудах конференций и сборниках тезисов:

1. **Новиков В.С.**, Дарьин А.В., Максимов М.А. Датировка современных осадков озера Кучерлинское методами варвохронологии // Геология на окраине континента. 2019. С. 31-33.

2. Дарьин А.В., **Новиков В.С**., Чу Г. Варвохронология современных осадков приледникового озера Кучерлинское (Алтай) // Глины и глинистые минералы. Материалы докладов VI Российской Школы по глинистым минералам и IV Российского Совещания по глинам и глинистым минералам. 2019. С. 74-77.

3. Дарьин А.В., Бабич В.В., **Новиков В.**С., Чу Г. Озеро Кучерлинское: варвохронология и геохимические индикаторы изменений климата позднего голоцена // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. № 17. С. 147-152.

4. Новиков В.С. Детальная геохимия донных осадков оз. Кучерлинское (Центральный Горный Алтай) // Проблемы геологии и освоения недр. Труды XXVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященный 90-летию со дня рождения Н.М. Рассказова, 120-летию со дня рождения Л.Л. Халфина, 50-летию научных молодежных конференций имени академика М.А. Усова. Томск. 2022. С. 301-303.

5. Новиков В.С., Дарьин А.В., Бабич В.В., Маркович Т.И., Ракшун Я.В., Дарьин Ф.А., Карачурина С.Е., Рудая Н.А. Геохимические индикаторы климата в донных осадках озера Нижнее Мультинское (по данным сканирующего микро-РФА на пучках синхротронного излучения) // Современные направления развития геохимии. Материалы Всероссийской

конференции (с участием зарубежных ученых), посвящённой 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона. Иркутск, 2022. С. 72-74.

6. Новиков В.С., Дарьин А.В., Бабич В.В., Ракшун Я.В., Дарьин Ф.А., Карачурина С.Е., Рудая Н.А. Возможность построения температурных палеореконструкций по данным аналитической микростратиграфии (РФА-СИ) донных осадков озера Нижнее Мультинское (Алтай) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса от океана к континенту. Материалы научной конференции. 2022. С. 220.

7. Дарьин А.В., **Новиков В.С.** Сканирующий микроанализ годовых слоев в «ленточных глинах» // V Российское Совещание по глинам и глинистым минералам - "Глины". 2022. С. 48-49.

8. Дарьин А.В., **Новиков В.**С., Рогозин Д.Ю. Геохимия донных отложений озера Пеюнгда и палеоклиматические реконструкции приарктических территорий Восточной Сибири // II Лавёровские чтения Арктика: актуальные проблемы и вызовы. Сборник научных материалов Всероссийской конференции с международным участием. Архангельск. 2023. С. 207-210.

9. Новиков В.С., Дарьин А.В., Рудая Н.А. Микроэлементный состав донного осадка озера Нижнее Мультинское (Горный Алтай) как основа палеоклиматических реконструкций // Материалы VI Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (12–15 ноября 2024 г., Институт Карпинского, Санкт-Петербург) / Минприроды России, Роснедра, ФГБУ «Институт Карпинского». СПб.: Изд-во Института Карпинского. 2024.

10. **Новиков В.С.**, Дарьин А.В., Чу Г. Находки следов криптотефры в донных отложениях оз. Чаша (Южная Камчатка) // Геология на окраине континента. III молодежная научная конференция-школа с международным участием, Владивосток, 16–20 сентября 2024 г.: материалы конференции /

ДВГИ ДВО РАН. Владивосток: Издательство Дальневосточного федерального университета. 2024.

11. Новиков В.С., Дарьин А.В., Чу Г. Поиск следов вулканических извержений методом РФА с использованием синхротронного излучения в донном осадке оз. Чаша (Южная Камчатка) // Международная конференция «Синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах (СИ и ЛСЭ-2024)».

12. **Novikov V.S.**, Darin A.V., Rogozin D.Yu., Meidus A.V., Babich V.V., Markovich T.I. Bottom sediments of Lake Peyungda as a natural archive of climatic and catastrophic events in the past // Limnology and Freshwater Biology. 2024. V 4. P. 487-492.

Связь работы С научными программами научно-И исследовательскими темами. Диссертационная работа выполнена в рамках государственного задания № 122041400214-9 «Диагностика и хронология глобальных и локальных событий в летописи континентальных осадочных бассейнов». При частичной финансовой поддержке проектов РНФ 22-17-00185 «Климатические изменения и природные события позднего Голоцена по данным исследования биогеохимических маркеров в озерных отложениях Средней Сибири», РФФИ Микромир № 19-05-50046 (субмикронный РФА-СИ) и при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Соответствие результатов работы научным специальностям. Результаты работы соответствуют пунктам 13, 14 и 20 паспорта научной специальности 1.6.4 «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых».

Личный вклад автора. Автор участвовал при подборе объектов исследования и организации экспедиционных работ, в которых принимал непосредственное участие. Производил отбор кернов донных отложений. Автором проведена дальнейшая пробоподготовка для аналитических методов исследования. Автор самостоятельно изучал материалы с применением микро-РФА-СИ и сканирующего электронного микроскопа. Автор активно участвовал в обработке полученных аналитических данных, интерпретации и сопоставлении новых данных с литературными, подготовке и публикации результатов в научных журналах.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация изложена на 116 страницах и сопровождается 46 иллюстрациями, 6 таблицами и приложением. Список литературы включает 158 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность за руководство и поддержку в ходе подготовки данной работы своему научному руководителю, кандидату геолого-минералогических наук, Андрею Викторовичу Дарьину.

Автор выражает благодарность сотрудникам Лаборатории литогеодинамики осадочных бассейнов ИГМ СО РАН. В особенности к.г.-м.н. Бабичу В.В., к.х.н Маркович Т.И, к.г.-м.н. Ветровой Н.И. Сотрудникам ИЯФ СО РАН к.т.н Дарьину Ф.А. и к.ф.-м.н. Ракшуну Я.В. Сотруднику ИАЭТ СО РАН д.г.н. Рудой Н.А. Сотруднику ИБФ СО РАН д.б.н. Рогозину Д.Ю. Сотрудникам ИГМ СО РАН д.г.-м.н. Зольникову И.Д., к.г.-м.н. Глушковой Н.В. Сотруднику ИВиС ДВО РАН – д.г.-м.н. Пономаревой В.Д.

Автор сердечно благодарит своих родных и близких людей за всестороннюю помощь и моральную поддержку.

ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ОЗЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

1.1 Теоретические основы

Поступление осадочного материала в озеро происходит с территории водосбора. Накопление осадка на протяжении всего цикла существования озера, обеспечивает непрерывную запись изменений окружающей среды. Климат района и геологическое строение водосборной площади совместно контролируют формирование почв и растительного покрова, а также влияют на наличие органического вещества и химический состав воды (рис.1.1). Таким образом, осадок озера представляет собой архив изменений условий среды.



Рисунок 1.1. Формирование озерных отложений: контролирующие факторы и процессы. Рисунок адаптирован из Zolitschka et al., 2015.

Вещество, преобразуемое в донный осадок, может быть двух типов – автохтонное (аутигенное), т.е. образованное в самом озере и аллохтонное (аллотигенное) - перенесенное с площади водосбора. Аллохтонный материал в озера поступает за счет речного переноса, временных потоков, переносом воздушных масс и (в ряде случаев) грунтовыми водами. Автохтонный материал чаще биогенное происхождение, либо возникает в результате неорганического осаждения в водной толще (часто в результате сезонных изменений биологической продуктивности). Как аллохтонный, так и автохтонный материал являются носителем палеоклиматической информации (Bradley, 2015).

В данной работе применяется модель осадконакопления, в которой выделяется 4 основных источниках вещества: терригенный, органический, хемогенный и аэрозольные поступления. Аэрозоли рассматриваются только в контексте определенных событий имеющих единичный характер, влияние хемогенной составляющей считается незначительным ввиду геологическое строения водосборной площади и пресноводного характера исследуемых озер.

Полученную модель можно искусственно сократить до более простой, в которой выделяется два источника поступления вещества в донный осадок озера: терригенный и органический (рис.1.2).



15

Рисунок 1.2. а. Основные компоненты донных отложений. b. Профили распространения Br, Rb в керне Pey-22-3.

Считается, что элементом полностью связанным с органическим веществом (OB) в дисперсной фазе осадка является бром (Harvey, 1980; Guevara et al., 2019). Связь Br с OB на земной поверхности изучалась в работе Myneni, 2012). Авторы обнаружили, (Leri, что неорганический Br преобразуется в органические соединения в лесных почвах, связанных с разложением опавшей листвы, посредством ферментативной активности. Неорганический Br, поглощаемый растущими растениями, преобразуется в органический Br при их разложении, после чего попадает в почву (Leri и Myneni, 2012). Далее, ОВ поступающее с территории водосбора в водоем, содержит органический Br, который циркулирует в озере и затем попадает в осадок.

Рубидий считается одним из индикаторов терригенного поступления в донный осадок озёр (Boës et al., 2011). Rb имеет тенденцию сосуществовать с К в силикатных минералах, таких как калиевый полевой шпат, мусковит, биотит и т.д. в почвах (Jones, 1992), глинах (Perelman, 1965) и гранитах (Heier and Billings 1970). Это сосуществование можно объяснить близостью ионного радиуса Rb к радиусу K (Xu et al., 2010; Koining et al., 2003).

Повышение концентраций таких элементов, как Rb в озерных отложениях могут быть особенно заметны в теплые периоды, когда озеро освобождается от льда и начинается перемешивание осадка в результате поступления материала с водосборной площади с весенним паводком (Minyuk et al., 2007). На рис. 2 показаны профили распространения Br, Rb и их отношения для керна оз. Пеюнгда, которые наглядно отображают изменение поступления вещества. Чем больше в осадок поступает терригенного материала (Rb), тем меньше органики (Br) и наоборот.

Приледниковые озёра, в которых аккумулируются продукты таяния ледника, служат идеальными ловушками осадков и относятся к важнейшему

источнику палеоклиматической информации. Ледниковый сток формируется преимущественно в период весенне-летнего паводка.

Важным отличием приледниковых озер служит меньшее содержание в осадке органического материала, т.к. донный осадок преимущественно ледникового генезиса состоит из неорганической компоненты – измельчённой породы, образовавшейся на контакте ледника с ложем, тогда как осадок не ледникового происхождения в значительной степени обогащён органикой за счёт транзитного смыва со склонов (рис.1.3). Впервые подобную модель осадконакопления для приледниковых озер описал В. Карлен (Karlen, 1976) при реконструкции колебаний ледника в Финляндии на основе изучения кернов приледникового озера Vuolep Allakasjaure.



Рисунок 1.3. Представление связи горного ледника с удаленным приледниковым озером, являющимся ловушкой для поступающего осадка. Рисунок адаптирован из Bakke and Paasche, 2011.

1.2 Ленточные глины (варвы)

Термин «варвные осадки» (varves) впервые в 1862 г. использовал шведский геолог Де Геер при описании реконструкции отступания ледников на границе плейстоцен-голоцен, он же первым предложил такой геохронологический метод, как варвохронология для подсчета абсолютного возраста ритмичных отложений (De Geer, 1912). В российской литературе используется термин «ленточные глины» лента тонких алевро-глинистых слойков, отложенных в течение года чаще всего в ледниковых озерах в режиме «неподвижной воды». Ленточные глины в основном двуслойны, т. е. включают в себя нижний слой, состоящий из хорошо сортированного песчано-алевритового материала, и более тонкий слой, преимущественно глинистого состава. Слоистость обусловлена неравномерным привносом обломочного материала в разные сезоны года (песчанистые – «летом», глинистые – «зимой»).

Изучение варвных осадков приобрело международный интерес за счет их распространенности в ледниковых озерных обстановках (Whittaker, 1922; Perfiliev, 1929). После того, как в 1949 г. У. Либби изобрел метод радиоуглеродного датирования, ежегодно слоистые озерные отложения стали важны для долгосрочной калибровки радиоуглеродного возраста при проведении дендрохронологических исследований (Wohlfarth et al., 1995; Kitagawa and van der Plicht, 1998; Goslar et al. al., 2000; Hajdas et al., 2000; Ramsey et al., 2012).

Термин «varve», который долгое время применялся при описании приледниковых обстановок, в конце концов был распространен на все ежегодно слоистые отложения не только на континентах (O'Sullivan, 1983; Saarnisto, 1986), но и в морских условиях (Kemp, 1996). Морские седиментологи приняли термин «варв» для описания ежегодно слоистых и неледниковых морских отложений (Seibold, 1958; Calvert, 1966; Olausson and Olsson, 1969) и в 1980-х гг. открыли несколько «ленточных» участков, где морские донные воды обеднены кислородом, что позволяет исключить биотурбацию (Schulz et al., 1996).

История изучения варвных осадков насчитывает более 100 лет. Ключевым преимуществом ленточных глин служит варвохронология возможность для создания непрерывной временной шкалы.

Хронология является ключевым вопросом при палеоклиматических исследованиях озерных отложений. Наличие годовой слоистости позволяет

создать, основанную на подсчете годовых слоев возрастную модель для исследуемых объектов. Подсчёт числа годовых слоев используется в варвохронологии (по аналогии с дендрохронологией). Считается, что "варвная" возрастная модель наиболее точная и имеет преимущество над радиоизотопным (¹⁴C,¹³⁷Cs и ²¹⁰Pb) датированием. Изотопные исследования в данном случае могут использоваться для верификации возрастной модели.

Варвы имеют слоистую структуру с отчетливой привязкой во времени. Наличие временной привязки (верхушка керна - год отбора керна), и возможность обратного отсчета во времени, дает точную и непрерывную хронологию, определяющую возраст для каждого интервала глубины непрерывной записи. Подсчет годичных пар может производится как в автоматическом режиме, с применением специального ПО, обрабатывающего подготовленные препараты или оптические снимки, так и вручную (Jan De Bock, 2012; Zolitschka et al., 2015).

Если хронология варва распространить на современный осадок, то каждому парному слою будет соответствовать календарный год. В случае, когда в годичной стратификации наблюдаются перерывы, то варвохронология является плавающей (Ojala et al., 2012).

Согласно региональным и глобальным обзорам озерных записей (например, Renberg, 1981; O'Sullivan, 1983; Anderson et al., 1985; Saarnisto, 1986; Ojala and Tiljander, 2003; Zolitschka, 2007), средняя погрешность варвохронологии составляет ± 1 -4%.

Следует отметить, что не всегда чередование светлых и тёмных слоёв маркирует годичную стратификацию. В структуре осадка могут сохраняться следы отдельных катастрофических паводков, тектонической, сейсмической и вулканической активности (рис.1.4) (Sabatier et al., 2022; Wilhelm et al., 2022).



Рисунок 1.4. Примеры слоев аномальной мощности в донных осадках озер. а – следы взрыва Тунгусского космического тела 1908 г. в керне оз.Пеюнгда; b – тефра извержения вулкана Ксудач 1907 г. в керне оз.Чаша; с – следы Великого Монгольского землетрясения 1761 г. в керне оз.Кучерлинское.

Варвохнологии могут охватывать значительные временные интервалы. На Полярном Урале на оз. Большое Щучье отобран керн длинной 24 м, охватывающий 24 тысячи лет (Regnéll et al., 2019). Одна из самых продолжительных изученных озерных летописей представлена в донном осадке озера Суйгецу (Япония), хронология которой за последние 10 лет была расширена с 40 до 50 тысяч лет (Schlolaut et al., 2018). Данный факт позволил впервые продлить радиоуглеродную калибровочную кривую на такой срок (Kitagawa, Van Der Plicht, 1997).

1.3 Отбор керна донных осадков

В настоящее время общепринятой является практика проведения батиметрической съемки дна озера с целью определения крутизны склонов озерной котловины, наиболее глубоких участков озера, определения мощности рыхлого осадка и выбора наиболее представительного с точки зрения накопления осадка участка бурения (Bakke et al., 2010 и др).

При изучении озера рекомендуется использовать два и более кернов, отобранных на участке с минимальным уклоном дна и максимальной

удалённостью от дельты/устья впадающего потока; обычно подобный участок находится в наиболее глубокой части озера. Такие участки устойчивы к процессам перемешивания осадка, что является важным критерием для последующих палеоклиматических реконструкций.

На сегодняшний день существует целый ряд приспособлений для бурения и отбора донного осадка. Их можно классифицировать по типам воздействия: вибрационные, поршневые, гравитационные, ящичные, пневматические, камерные. Традиционно используется поршневой бур Ливингстона (Livingstone et al., 1955), для которого применяются надстраиваемые металлические штанги для достижения необходимой глубины. Проникновение в донный осадок происходит вручную за счет силы физического воздействия.

При изучении донных отложений озер, регулярно возникает задача отбора ненарушенной колонки осадочного материала. Особую сложность составляет отбор придонной (верхней) части осадка, представленной слабо консолидированным илистым материалом. Подобный осадок слабо держит структуру — практически сразу растекается и перемешивается при малейшем внешнем воздействии, наклонах и манипуляциях при транспортировки. Тем не менее именно верхняя часть донного осадка представляет особый интерес при палеоклиматических, седиментологических и радиоизотопных исследованиях.

Основные сложности, с которыми можно столкнутся при отборе озерного осадка: 1) сохранность верхней части осадка, 2) загрязнение осадка, 3) недостаточная длина отобранного керна, 4) нарушение сохранности осадка. Для решения задач связанных с построением климатических реконструкций необходимо избегать подобных проблем.

Большинство систем отбора проб донных осадков — бур Гиллера, «Русский бур», бур Несье (Nesje, 1992), грунтовые трубки (Wright, 1967), поршневой бур Ливингстона и его модификации (Власов, 1986) — не позволяют получить сохранность придонной части, расположенной на границе вода-осадок. Для решения такой задачи зачастую прибегают к применению поршневых трубок (Blomqvist, 1991; Davis R. B., Doyle R. W, 1969; Glew et al., 2001; Mackereth, 1969; Wright, 1980), которые опускаются на дно при помощи специального троса или штанг.

Керны донных осадков, представленные в данной работе были получены с плавучей платформы с использованием гравитационного пробоотборника швейцарской конструкции UWITEC (http://www.uwitec.at) с прозрачными трубами пробоотборниками диаметром 60 или 90 мм (рис.1.5). Преимущество данного пробоотборника заключается в высокой степени сохранности слоев, простоте использования, мобильности и низкой стоимости.



Рисунок 1.5. Работа с гравитационным пробоотборником UWITEC на озере Пеюнгда. Керн, полученный на озере Пеюнгда с помощью гравитационного пробоотборника UWITEC. Фото автора.

В подобных системах трубку изготавливают из оргстекла или других прозрачных полимеров. Трубка выполняет функцию пробоотборника, который под воздействием сверху внедряется в толщу донного осадка, при этом поршень неподвижно зафиксирован над осадком. За счет разреженного давления водонасыщенный осадок удерживается в трубке под поршнем. Иным вариантом пробоотбора является заморозка осадочного материала в трубке, после чего происходит распиловка замороженного керна на образцы (Strong, 1976). Другой модификацией такой системы служит гелификация осадка с применеием химических реагентов, к которым относится, например, сорбитол (сорбит), способствующий загустению водонасыщенного осадка (Glew et al., 2001).

Похожей на поршневую систему является технология HON-Kajak corer (Renberg, 1991) и Kajak-corer (Brinkhurst et al., 1969; Kajak et al., 1965). При отборе керна вместо поршня используется специализированный замок-клапан, который контролируется с поверхности тросом.

Весьма эффективно задачу отбора слабоконсолидированного ила решает методика шоковой заморозки осадка при помощи хладагентов: сухой лед (CO₂) или жидкий азот (Kulbe et al., 2003; Lotter et al., 1997; Renberg, Hansson, 1993, 2010; Renberg, 1981). Зачастую одновременно с сухим льдом используется катализатор — метанол или этанол (Renberg, Hansson, 1993). В подобных системах осадочный материал намораживается на металлический пробоотборник — стержень, пластину или клин (зависит от задачи). Пробоотборник погружается в ил, после чего в течение 20–30 минут охлаждается изнутри хладагентом.

Наиболее простым и распространенным способом решения различных проблем, возникающих в процессе пробоотбора, служит репликация нескольких кернов, отобранных в разных участках озера.

1.4 Лабораторная работа с керном

В лабораторных условиях проводится вскрытие кернов вдоль оси отбора, описание и фотографирование поверхности.

1.4.1 Изготовление твердых препаратов и шлифов

Твердые препараты донных осадков готовились по методикам, предложенным в работах (Lamoureux S.F., 1994; М. Tiljander et al., 2002; Boes X., Fagel N., 2005). Образец влажного керна подвергается шоковой заморозке в жидком азоте. При этом не происходит образования крупных кристаллов льда, которые могут повредить исходную структуру осадка, разрушить тонкие годовые слои. Затем из образцов методом лиофильной (сублимационной) сушки при температуре жидкого азота и давлении 3-10 мбар полностью удаляется влага. После чего образец, сохранивший исходную структуру, пропитывается смесью эпоксидной смолы, отвердителя и ацетона. Полимеризация происходит в сушильном шкафу при 60°C в течении 3-4 суток.

Из твердого препарата готовятся пластинки для микро_РФАсканирования толщиной 2 мм с плоскопараллельными полированными поверхностями и оптические шлифы. Шлифы изготавливались в опытнопроизводственном участке пробоподготовки ИГМ СО РАН и затем, вручную, доводились полировкой на стекле с алмазными порошками №5, 3, 0. Качество шлифов контролировалось визуально, просмотром под бинокулярном.

При этом шлиф полностью соответствует поверхности анализируемой пластинки, что позволяет в дальнейшем проводить прямое сопоставление геохимических данных с визуальными наблюдениями (рис.1.6.).



Рисунок 1.6. А) - фрагмент твердого препарата, пропитанный смесью эпоксидной смолы; b) плоскопараллельная пластинка толщиной 2 мм и c) оптический шлиф (внизу), соответствующий анализируемой поверхности, изготовлены из твердого препарата донного осадка.

1.4.2 Аналитическая микростратиграфия.

Использование синхротронного излучения для рентгенофлуоресцентного анализа (микро-РФА-СИ) донных осадков имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами. Первые предложения по использованию СИ в качестве чрезвычайно яркого источника рентгеновского излучения для исследований появились в 1970-х годах: первые эксперименты с СИ были проведены еще в 1973 г. (Кулипанов, Скринский, 1977). Применение сканирующего микроанализа геологических образцов начались в конце 1980-х годов (Baryshev et al., 1989; Daryin et al., 1991) и продолжены в серии работ, посвященных изучению донных отложений озер в последующие годы.

В последние два десятилетия использование синхротронного излучения для аналитического исследования геохимического состава озерных отложений получило широкое применение (Goldberg et al., 2001; Elisa Sirito de Vives et al., 2007; Alexandrin et al., 2023). Это привело к созданию нового направления в рентгеноспектральном анализе – микроанализу (micro-XRF). В сравнении с микрозондом, применение рентгеновского излучения не требует сложных вакуумных систем, что значительно упрощает процесс подготовки образца и проведения аналитических измерений (Дарьин и др., 2013).

В отличие от метода рентгенофлуоресцентного анализа с рентгеновской трубкой (XRF), метод РФА-СИ позволяет понизить предел обнаружения в 100 раз и определять значительно большее количество элементов. Уникальные характеристики РФА-СИ связаны с непрерывным спектром и низкой угловой естественной расходимостью синхротронного излучения, его поляризованностью и высокой яркостью (Кулипанов и Скринский, 1977). В настоящее время метод специально адаптирован для задач палеоклиматологии, а также разработаны и аттестованы методики подготовки и исследования кернов донных отложений (Дарьин и др., 2013; Дарьин и Ракшун, 2013). В последние годы стал популярным вариант метода с использованием фокусирующей рентгеновской оптики – поликапиллярных линз (Darin et al., 2014; Сороколетов и др., 2015). Этот подход позволяет достичь пространственного разрешения анализа до 10 мкм, что способствует детальным исследованиям отдельных годовых слоев в донных отложениях (Дарьин и др., 2015).

В ИЯФ СО РАН на ВЭПП-3 (электрон-позитронный накопитель) первые экспериментальные исследования по сканирующему микроанализу проводились в 1989–1995 гг. (Baryshev et al., 1989; Darin et al., 1991; Dolbnya et al., 1995) и продолжены в 2000-х в серии работ по сканированию озерных донных осадков (Zolotarev et al., 2001; Darin et al., 2005).

Для реализации этого направления было создано специальное устройство, обеспечивающее сканирующее требуемые параметры эксперимента: определение более 20 микроэлементов с пределом обнаружения ~1-5 г/т в кернах донных отложений, пространственное разрешение 100 мкм по одной координате при энергии возбуждения 15–30 кэВ (Приложение 1). Полученная экспериментальная установка позволяет получать палеоклиматические реконструкции с годовым, а в ряде случаев и сезонным временным разрешением, при длине временных рядов в несколько тысяч лет (Калугин и др., 2009; Бабич и др., 2023).

Методики аналитической микростратиграфии донных осадков с применением сканирующего РФА на пучках синхротронного излучения (микро-РФА-СИ) в последние десятилетия были развиты коллективом лаборатории 220 ИГМ СО РАН и подробно изложены в ряде публикаций (Дарьин и др., 2013).

Для анализа использовались 2-мм плоскопараллельные образцы (пластинки) с пришлифованной поверхностью, приготовленные из твердых препаратов донных осадков. При этом, как было показано выше, пластинки для микро-РФА и для оптических шлифов были вырезаны из одного блока и имели одинаковые последовательности годовых слоев. Это давало возможность дополнительного контроля за точностью привязки данных микро-РФА к датированным слоям донных осадков.

Измерение содержаний микроэлементов вдоль оси отбора керна проводилось при энергиях возбуждения 18 и 24 кэВ. Шаг сканирования 0.1, 0.2 или 0.5 мм. Время измерения в точке составляло от 5 до 25 с. Всего были получены данные о распределении 24 породообразующих и следовых элементов: K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pb, Th, U. Также регистрировалось отношение упруго- /неупругорассеянного на образце излучения (Coh/Incoh), как показателя рентгеновской плотности исходного керна. Таким образом, в каждой точке сканирования регистрировался набор из 25-ти геохимических индикаторов (мульти-прокси), отражающих изменение состава донных осадков озера во времени.

Аналитические исследования проводились сотрудниками ИГМ СО РАН и ИЯФ СО РАН. В данной работе представлены результаты аналитических измерений, полученные в Сибирском центре синхротронных и терагерцовых исследований (ИЯФ СО РАН, Новосибирск, https://ssrc.biouml.org/#!), Курчатовском комплексе синхротронно-нейтронных исследований (КИСИ- Курчатов, Москва, http://kcsni.nrcki.ru/) и Шанхайском синхротронном центре (SSRF, http://www.ssrf.ac.cn/) в 2019-24 гг.

1.4.3 Применение электронного микроскопа

Полированные шлифы толщиной 2 мм помещали на алюминиевую подставку с проводящей углеродной лентой и покрывали углеродным слоем (20 нм) с помощью высоковакуумной установки Q150T ES (Quorum Ltd).

Изучение морфологии и элементного состава образцов происходило с применением сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) оборудованном системой микроанализа INCA Energy 450+ и волновым спектрометром INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd) в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) (автором при содействии аналитиков Хлестова М.В., Карманова Н.С.). Анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе электронного пучка 1.5 нА. Время набора спектров на образцах —20 с (MIRA) (Лаврентьев и др., 2015).

1.4.4 Рентгенофазовый анализ

Съёмка рентгеновских спектров проводилась в ИГМ СО РАН на автоматизированном порошковом дифрактометре ДРОН-8 (производство НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург, в 2021г.), излучение СиК_α, детектор многоканальный Mythen 2R1D. Дифракционные картины были отсканированы в вращением в интервале 2θ от 3° до 65° с шагом 0,1°, время сканирования в точке – 5 с, щель на первичном пучке 0,5 мм. Аналитик – Мирошниченко Л.В.

1.4.5 Гранулометрический анализ

Гранулометрический анализ проведен в Лаборатория геологии кайнозоя ИГМ СО РАН, Новосибирск. Гранулометрический состав измерялся на лазерном анализаторе размера частиц Fritsch Analysette A22 с включением ультразвука и использованием оптической модели Фраунгофера. Диапазон измерений 0 - 2000 мкм. Статистические параметры образца рассчитывались в программном пакете GRADISTAT v.9.1 (Blott, Pye, 2001). Пробоподготовка проводилась по методике описанной в (Konert, Vandenbergh, 1997).

1.5 Определение возраста донного осадка (¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb, ¹⁴C)

Определение возраста донного осадка на всю глубину опробования керна и последующая оценка скоростей осадконакопления – является важным этапом при изучении озерных отложений. Понимание возраста осадка дает возможность проводить пересчет линейной глубины керна в возрастную, т.е. позволяет соотнести каждому горизонту возрастной модели определенный временной интервал.

При определении скорости осадконакопления современных осадочных толщ и для подтверждения наличия годовой слоистости, применяется распределение активности изотопов ¹³⁷Cs и ²¹⁰Pb.

Искусственный изотоп 137 Cs маркирует в донных осадках начало крупномасштабных атомных испытаний, проводившиеся, в основном, в Северном полушарии в период с 1945 по 1963 гг. Эти ядерные испытания привели к образованию искусственных короткоживущих радионуклидов (137 Cs, 90 Sr, 241 Am, 239 Pu, 240 Pu) (Banerji et al., 2022).

Попадая в атмосферу, ¹³⁷Cs циркулировал и распространялся по всему миру. Выпадение ¹³⁷Cs тесно связано с интенсивностью и характером местных осадков (Longmore, 1982). Чрезвычайно высокие концентрации ¹³⁷Cs наблюдались в атмосфере в (Новая Земля, Царь-бомба 30 октября 1961 г) 1963–1964 гг. (Robbins and Eddington, 1975) (рис.1.7.). В дополнение к этому можно отнести случаи аварийного выброса и рассеяния ¹³⁷Cs в атмосферу, связанные с авариями на атомных электростанциях - Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986 года) и АЭС «Фукусима-дайити» 11 марта 2011 года (Anspaugh et al., 1988; Koizumi et al., 2012).

Датирование по ²¹⁰Pb является эффективным геохронологическим инструментом палеоэкологических реконструкций, охватывающих последние

два столетия. В конце XX в. было установлено, что концентрация ²¹⁰Pb в атмосфере регулируется различными источниками, путями атмосферной циркуляции и механизмами осаждения (Preiss et al., 1996). ²¹⁰Pb представляет собой встречающийся в природе радионуклид, который образуется как продукт распада ²³⁸U. ²¹⁰Pb в конечном итоге распадается с коротким периодом полураспада 22,3 года (Appleby, Oldfield, 1978). Предполагается постоянное атмосферное поступление изотопа свинца и постоянная скорость осадконакопления.



Рисунок 1.7. а. Мощность испытаний ядерного оружия в атмосфере и под землей. b. Исторические выпадения ¹³⁷Cs для Северного и Южного полушарий, где пик наблюдается в 1963 г. (UNSCEAR, 2000).

Антропогенно-индуцированный ¹³⁷Cs в сочетании с ²¹⁰Pb дают важную информацию в оценке хронологии осадочного разреза. Недавнее межлабораторное сравнение датировок по ²¹⁰Pb показало, что одновременное использование ¹³⁷Cs с возрастной моделью по ²¹⁰Pb привело к достоверным данным о возрасте, как минимум, за последние 60 лет (Barsanti et al., 2020).

Наряду с ¹³⁷Cs и ²¹⁰Pb при датировании донных осадков одним из наиболее применяемых методов определения абсолютного возраста озерных отложений является метод радиоуглеродного датирования. На сегодняшний

день, известно несколько методов определения возраста органического материала с применением ¹⁴С. Одновременно с классическими сцинтилляционным и газовым методами для озерных толщ все чаще применяется современный, сверхчувствительный метод изотопного анализа вещества - метод ускорительной масс-спектрометрии (УМС или AMS-датировка) (Hedges and Gowlett, 1986).

Одним из основных преимуществ метода служит минимальное количество анализируемого вещества – 0,001 грамм. При определении возраста озерных отложений методом AMS используется углеродсодержащая составляющая осадка – макроскопические органические остатки или, в случае низкой органической составляющей, применяется массовый образец осадка. Благодаря использованию масс-спектрометра учёные могут изучать образцы, размер которых в тысячу раз меньше тех, которые анализировались традиционным методом подсчёта излучения частиц, чья масса составляла от 1 до 10 г. Таким образом, стало возможно установить дату для образца, содержащего менее 1 мг углерода.

Обычно при определения возраста происходит отбор проб осадка из срединной и базальной части керна. Как правило. отбор проб для датирования происходит на участках, отличающихся определенными стратиграфическими особенностями и маркирующими изменения условий осадкообразования. Возрастная модель строится при помощи линейной функции, которая учитывает стандартные ошибки при датировании осадка.

Построение возрастной модели «глубина керна-возраст осадка»

Построение возрастной шкалы может происходить как «вручную», так и с использованием специализированных программных сред для построения моделей осадконакопления на основе изотопных датировок.

При построение возрастной модели для верхней части керна, перекрывающей последние 100-150 лет, используются результаты подсчета визуально выделяемых годовых слоев и данные распределения активности

31

¹³⁷Сs и ²¹⁰Pb. Построение возрастной модели на большую глубину опробования зачастую сопровождается применением специальных программ.

Существуют различные программные среды для построения возрастных моделей осадконакопления на основе радиоуглеродных датировок. Одним из наиболее прогрессивных решений является алгоритм Bacon (Billor et al., 2000; Blaauw and Christen, 2011), написанный для программной среды R (R Development core team, 2005). Данный метод применялся в рамках настоящей работы при построении возрастной модели донного осадка оз. Нижнее Мультинское (рис.2.13).

1.6 Методика построения количественных температурных реконструкций

Выявление вариаций климата последних тысячелетий необходимо для понимания пространственно-временных закономерностей климатических изменений, понимания внутренней и внешней динамики климатической системы, определения воздействия антропогенных и естественных факторов, влияющих на изменение климата (Ammann et al., 2007; Büntgen et al., 2016).

наблюдения Систематические инструментальные климатических изменений проводятся относительно недавно и охватывают короткий временной интервал, редко превышающий 100—150 лет. Одним из основных источников информации для решения задач климатологии являются реконструкции климата прошлого, имеющие отклик на изменение климатических параметров — особенности роста кораллов, аккумуляция ледников, скорость прироста древесины, вариации элементного состава донных осадков озер и т.д. Однако не все эти параметры позволяют строить количественные реконструкции климатических изменений с высоким временным разрешением на длительном временном интервале.

Анализ подобных реконструкций показывает, что большинство их них позволяет оценить масштаб изменений климата в порядковой шкале, оперируя категориями «холодно — тепло», «холоднее — теплее». Другая часть

реконструкций, которая позволяет оценивать климатические события в абсолютных величинах, т.е. генерировать количественные климатические хронологии, обладает рядом особенностей и ограничений. Например, реконструкции, построенные по дендрологическим данным, позволяют строить температурные реконструкции с годовым разрешением, однако отображают изменение летних, а не годовых температур и, зачастую, охватывают сравнительно короткий временной интервал. Реконструкции, основанные на палинологических архивах, отличаются низкими временными разрешениями (несколько десятков лет), вследствие чего климатические изменения имеющие меньший временной диапазон, не всегда выявляются, и чаще результаты подобных реконструкций сводятся к установлению направленности климатических тенденций без их количественной оценки.

Отдельного внимания заслуживают климатические реконструкции, основанные на изучении элементного состава донных осадков природных озерных водоемов с применением рентгенофлюоресцентного анализа на пучках синхротронного излучения, которое позволяет получать информацию с высоким разрешением и на ее основе проводить реконструкцию годовых температур на значительном временном интервале (Дарьин и др., 2013).

Процесс построения количественных температурных реконструкций включает несколько этапов. Сначала осуществляется выбор метеостанции, расположенной в непосредственной близости к исследуемому озеру для получения актуальных метеоданных, включая данные о температуре и осадках за необходимый период. Далее производится сбор данных элементного состава донного осадка полученного с применением метода микро-РФА-СИ привязанных к возрастной модели «глубина керна-возраст осадка». Важным этапом является оценка качества полученных геохимических данных, которая включает выявление и исключение слоев, представляющих следы отдельных катастрофических событий прошлого.

Следующий шаг представляет поиск индикаторных элементов, которые наиболее ярко отражают изменения температур, что способствует созданию

33

уравнения множественной регрессии, связывающей геохимические данные с реконструируемой температурой. Как правило, набор температурных данных для большинства метеостанций не превышает период последних 100-150 лет. Диапазон, на котором происходит сравнение полученной реконструкции и инструментальных данных, называется интервалом обучения. В случае установления высокой корреляции между изменением температуры и геохимических характеристик донного осадка в пределах интервала обучения, полученная трансферная функция может быть использована для построения температурной палеореконстркции на всю глубину опробования керна.

Математическая обработка геохимических и метеоданных проводилась с применением методов корреляционного и регрессионного анализов (Бабич и др., 2015). Алгоритмом «Каскад», подробно описанным в работе (Бабич, 1980), позволяющим осуществить поиск оптимальных уравнений регрессии с одновременной минимизацией характеристических признаков.

ГЛАВА 2. ОЗЕРО КУЧЕРЛИНСКОЕ, СРЕДНЕЕ И НИЖНИЕ МУЛЬТИНСКИЕ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

2.1 Физико-географические условия

Озеро Кучерлинское, Малое и Среднее Мультинское располагаются на территории Усть-Коксинского района Республики Алтай, в южной части Горного Алтая на северном макросклоне Катунского хребта.

Основные черты современного климата Алтая, северного крыла Центрально-Азиатского обусловлены горного пояса, его внутриконтинентальным положением, поступлением основного объема осадков с запада, со стороны Атлантического океана, и воздействием Монгольского антициклона. Говоря о климате территории исследования, стоит отметить, что в пределах Горного Алтая с северо-запада на юго-восток наблюдается уменьшение количества выпадающих осадков. Южной и юговосточной частям Горного Алтая свойственно господство аридного климата, и в Чуйской впадине выпадает не более 200 мм/год. Однако на эту территорию приходится около 75 % от общей площади современного оледенения Горного Алтая (910 км²) (Русанов, 1961; Ревякин и др., 1979).

Ключевую роль в распределении современных ледников играет абсолютная высота хребтов, а точнее – увеличение влажности с высотой, результатом чего служит тот факт, что Катунский хребет (2800—4500 м) является одним из крупнейших центров оледенения Алтая. Высота снеговой линии на склонах Катунского хребта составляет порядка 2600 м (Нарожный, Осипов, 1999). С вершины и склонов высочайшей точки Алтая - г. Белухи (4506 м) спускается несколько крупных долинных ледников, одним из которых является ледник Мюштуайры (Кучерлинский). Исследования в сопредельном Северо-Чуйском хребте показали, что в голоцене долинные ледники в этой части Горного Алтая увеличивались во временные интервалы,
в среднем длившиеся около 600-700 лет – около 4900-4200 л.н. (аккемская стадия), около 2400-1700 л.н. (историческая стадия) и в XIII-XIX вв. (малая ледниковая эпоха, или стадия актру) и деградировали до современных размеров (Агатова и др., 2012).

Озеро Кучерлинское

Кучерлинское озеро расположено в верховьях долины р. Кучерлы (Кочурлы) в гребневой части Катунского хребта на территории природного парка "Белуха" и имеет ледниковое питание. Основной объем воды поступает с ледника Мюштуайры, одного из крупнейших ледников массива г. Белухи (рис.2.1). Так же стоит отметить, что озеро подпружено моренами, которые сформировались в одну из стадий наступания ледника в голоцене либо в конце позднего плейстоцена.

Всего в долине этой реки насчитывается 44 озера, сосредоточенных в основном в верховьях ее левых притоков. Озера преимущественно имеют ледниковое происхождение, и подпружены конечно-моренными грядами (Карпунин, 1998). Кучерлинское озеро находится на высоте 1790 м над уровнем моря. Длина озера составляет 5 км, ширина – 1км, максимальная глубина доходит до 45 м. Общая площадь 421 га. Кучерлинское озеро расположено в котловине, которую с запада и востока обрамляют вершины высотой от 2700 до 4200 м, а с юга и севера - морены различных этапов отступания ледника Мюштуайры.



Рисунок 2.1. Космоснимок района озера Кучерлинское.

Озеро является проточным; в него впадает р. Кучерла, а также три небольших ручья, которые стекают с западного и восточного склонов котловины. Вытекает из озера одна река - Кучерла.

Озеро Нижнее и Среднее Мультинские

Памятник природы «Мультинские озёра» представляют собой каскад из трех горных озер (Верхнее, Среднее и Нижние). Район исследования располагается в среднегорной части Центрального Алтая, на северо-западном окончании Катунского хребта, в верхней части долины р. Мульта (правый приток р. Катунь) (рис.2.2).



Рисунок 2.2. Космоснимок района расположения Мультинских озёр. Крестиком показаны места отбора керна. Данные батиметрии оз. Нижнее и Среднее Мультинские получены из (Фролова и др., 2011).

Озеро Среднее Мультинское расположено на высоте 1740 м над уровнем моря между двумя хребтами с осыпными склонами крутизной около 20%. Перед впадением в озеро р. Мульта сильно меандрирует и разделяется на рукава, образуя широкую заболоченную дельту.

Его длина 2550 м, максимальная ширина 750 м, средняя глубина 14 м. Берега озера крутые (8-10°) с абсолютными высотами 2500 м (рис.2.3). К озеру спускаются многочисленные осыпи (некоторые задернованы) размеры обломков достигают 1 м в поперечнике.



Рисунок 2.3. Панорама основного водосбора озер Нижнее и Среднее Мультинское. 2020 г. Фото автора.

Самое северное озеро в каскаде – Нижнее Мультинское. Крутизна склонов озерной котловины составляет 15-20°. Склоны покрыты густым лесом, так же наблюдаются каменные осыпи. Берега озера ровные, наблюдаются небольшие заливы на восточном берегу. Днище котловины практически плоское.

Площадь зеркала оз. Нижнее Мультинское 1,7 км² (линейные размеры 2 470 × 900 м), средняя глубина 21,5 м, водосборная площадь 77 км². Воды озера пресные, слабощелочные. Климатические условия резко континентальные, среднегодовая температура от -2,0 °C до -6,4 °C, среднегодовое количество осадков 628–746 мм.

С юга озеро ограничено валунно-глыбовой перемычкой между Нижним и Средним Мультинскими. Высота Шумов составляет 40 м, длина 150 м. Размеры глыб скальных пород достигают 10-12 м.

2.2 Геологическое строение

Кучерлинское и Мультинские озера

В пределах водосборных бассейнов Кучерлинского озера, Среднего и Нижних Мультинских на поверхность выходят отложения венда – нижнего кембрия и верхнего кембрия – нижнего ордовика (рис.2.4). Венд – нижнекембрийские породы представлены нерасчлененными аккемской и кучерлинской свитами (V- ε_{1ak+kc}). Эти свиты развиты в виде узкой полосы широтного простирания и выполняют осевую часть Катунского хребта. Аккемская свита сложена ритмичнослоистыми зеленовато-серыми, полимиктовыми, полевошпатово-кварцевыми мелкосреднезернистыми в разной мере известковистыми песчаниками и алевролитами. Основание аккемской свиты не вскрыто, верхняя граница с кучерлинской свитой согласная и проводится по появлению в разрезе кремнистых сланцев и лиловых алевролитов. Мощность данной свиты составляет не более 200 м. Кучерлинская свита представляет собой мощную флишоидную толщу, сложенную зеленовато-, лиловато-серыми песчаниками, алевропесчаниками, алевролитами, редко яшмами, также встречаются фрагменты толеитовых базальтов, которые по составу близки к средним типам N-MORB.



Рисунок 2.4. Фрагмент геологической карты М-45 масштаб 1:1000000 (Шокальский, 2006). Условные обозначения: 1 - рахмановский и кубадринский комплексы; 2 - горноалтайская

серия; 3 - аккемская и кучерлинская свиты объединенные; 4 - мигматиты; 5 – контактовые роговики.

Отложения горноалтайской серии (Є₂-О_{1gr}) имеют значительно более широкое распространение. Горноалтайская серия представлена мощной флишоидной толщей, которая сложена ритмично переслаивающимися зеленосерыми и лилово-серыми песчаниками, алевролитами, глинистыми сланцами, местами гравелитами и конгломератами. Так же стоит отметить, что свита имеет две подсерии по относительной крупности обломочного материала и преобладающей окраске пород – нижнюю и верхнюю. Отложения горноалтайской серии сильно дислоцированы и сжаты в линейные, местами изоклинальные наклонные, опрокинутых, складки. Характерна до многопорядковая разномасштабная ритмичность, где мощные неритмичные пачки чередуются с пачками с микроритмичным (до 60–100 м) строением.

Более грубое чередование наблюдается в нижних частях серии. Ритмы начинаются с полимиктовых или кварц-полевошпатовых мелкозернистых песчаников и алевропесчаников, которые кверху сменяются алевролитами и глинисто-кремнистыми сланцами. Мощность горноалтайской серии составляет около 2000–2500 м. По находкам органических остатков и положению в разрезе нижняя граница определяется майским веком среднего кембрия, тогда как верхняя возрастная граница серии – диахронная.

Отложения венда – нижнего кембрия и верхнего кембрия – нижнего ордовика интрудированы гранитоидами Рахмановского гранодиоритгранитового комплекса (үб, үD₂r). Для пород рахмановского комплекса характерен гранитовый состав при резкой количественной подчиненности более меланократовых и более лейкократовых разновидностей, что позволяет обосновать его принадлежность к гранитовой формации (Федак и др., 2011).

Севеверный макросклон Катунского хребта граничит с такой крупной структурной единицей, как Уймонская межгорная впадина, которая является одним из самых представительных элементов отрицательных тектонических структур и третьей по величине (400 км²) среди внутригорных впадин Горного

Алтая. С севера данная впадина ограничена Теректинским хребетом (2200-2900 м) (рис.2.5).



Рисунок 2.5. Расположение Уймонской впадины относительно Катунского хребта (Русанов и др., 2017).

В 2014 году геологами АО «Горно-Алтайская экспедиция» была пробурена скв. №1, которая позволила вскрыть разрез неоген-четвертичных Уймонской отложений внутригорной Результаты впадины. палеонтологического исследования керна этой скважины показали, что Уймонская впадина существовала уже в миоцене, и, возможно, ее заложение могло произойти в палеогене. Происходящая резкая смена фациального состава отложений с начала четвертичного периода в Уймонской впадине говорит о резкой активизации в пределах Горного Алтая неотектонических горообразовательных процессов, приведших К формированию его современного облика (Русанов и др., 2017).

Отложения впадины представлены (снизу-вверх) средне миоценовой средне плиоценовой озерной туерыкской свитой, позднеплиоценовой эоплейстоценовой озерно-аллювиальной бекенской свитой, а также эоплейстоценовой - ранне неоплейстоценовой аллювиально-пролювиальной башкаусской свитой, среднеплейстоценовыми ледниковыми, флювиогляциальными и аллювиальными образованиями, верхнеплейстоценовыми озерно-ледниковыми отложениями. Наиболее полный разрез кайнозойских отложений представлен в Чуйской впадине, где стратиграфически ниже туерыкской свиты установлены угленосные толщи кошагачской свиты, а самое основание кайнозойского разреза представлено карачумской свитой (Федак и др., 2011).

В среднем и позднем плейстоцене Катунский хребет подвергался началу голоцена позднеплейстоценовое оледенению, оледенение К значительно деградировало, чем свидетельствуют 0 датированные радиоуглеродным методом находки древесины в гребневой части хребта (Назаров и др., 2012). В долине Кучерлы присутвуют голоценовые моренные отложения, связанные со стадиями наступания ледников в неогляциале. Морены, оставленные ледником Мюштуайры в одну из стадий его наступания послужили дамбой для Кучерлинского озера.

2.3 Отбор образцов и пробоподготовка

Керн донных осадков озера Кучерлинское был извлечен с помощью ударной трубки со льда в марте 2018 г. Длина керна, взятого из самой глубокой части озера на глубине 45 метров, составила 115 см. Особое внимание обращалось на сохранность верха керна и ненарушенность границы водаосадок (рис.2.6).



Рисунок 2.6. Отбор керна донных отложений оз. Кучерлинское (Куч_2018-2).

Отбор керна донных отложений оз. Нижнее Мультинское MN-02 (410 мм), MN-03 (50.010610 N, 085.831320 E; 1,52 м, глубина отбора (г.о.) 22 м) и Среднее Мультинское MS-01 (50.011600 N, 085.831580 E; 0,25 м, г.о. 17 м) происходил в июле 2020 г. из самой глубокой точки озера с использованием ударного пробоотборника "Uwitec Piston corer".

В обоих случаях, после отбора трубка с керном была плотно запечатана и оставлена в вертикальном положении в теплом помещении на 24 часа. Далее вода удалялась из верхней части керна, и верх герметично закрывался с помощью пробки из флористической губки и плотного пенопласта, с целью предотвращения перемешивание слоев осадка в процессе перевозки. Керн был упакован в теплоизоляционный материал для предотвращения перемерзания и доставлен в вертикальном положении в лабораторию Института геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск. Выполненные действия обеспечили максимальную защиту верхней части керна от повреждений.

В лабораторных условиях проведено вскрытие кернов вдоль оси отбора, описание и фотографирование поверхности. Половину керна разрезали на дискретные образцы с интервалом 10 мм, а вторую половину использовали для создания твердых препаратов, пропитанных эпоксидной смолой.

Пробы, отобранные с интервалом в 1 см, взвешивались сразу после нарезки керна. Затем осуществлялась сублимационная сушка, после которой проводилось повторное взвешивание, что дало возможность определить влажность осадка. Высушенные пробы использовались для дальнейших физико-химических исследований, включая изотопное датирование.

Из трех 170-ти мм образцов донного осадка оз. Курчерлинское было изготовлено 9 шлифов (рис.2.7) перекрывающих разные интервалы глубин (табл.2.1).

Таблица. 2.1. Интервалы глубин керна Куч-2018-2, для которых изготовлены оптические шлифы.

Интервалы глубин, мм	Номер шлифов
0-170	Кч-1, Кч-2, Кч-3
480-650	Кч-10, Кч-11, Кч-12

44

940-1110	Кч-19, Кч-20, Кч-21



Рисунок 2.7. Шлифы донных осадков оз. Кучерлинское (керн – Куч_2018-2).

Донный осадок оз. Кучерлинское и оз. Нижнее и Среднее Мультинское представляет собой полосчатую ледниковую глину белого цвета с буроватопрослоями, слабо желтоватыми обогащенными органикой. В ходе органолептического анализа установлено, что алевритовые частицы не об обнаруживаются тактильно, что свидетельствует ИХ пелиталевропелитовой размерности и отсутствии выраженной текстуры, доступной для восприятия на ощупь. Состав осадков соответствует кварц-полевой шпатхлорит-гидрослюдистым глинам (табл. 2.2).

2.4 Методы исследования

2.4.1. Подсчет визуально выделяемых слоев

Просмотр шлифов керна Куч 2018-2 выполнялся с помощью оптического микроскопа и высокоразрешающего сканера. Для получения сканов высокого разрешения, шлифы обрабатывались в глицерине, чем объясняется их характерный зеленый оттенок. Изображения, полученные с использованием лазерного сканера Plustek Optic Film с разрешением 7300 dpi, затем обрабатывались в графическом редакторе и компоновались в единое изображение, демонстрирующее чередование темных и светлых слоев. Темные слои соответствуют зимнему периоду, а светлые — летнему. Зимние слои имеют темный цвет благодаря содержанию органического вещества, в то время как летние слои окрашены в белый цвет из-за преобладания перетертого обломочного материала. Таким образом, комбинация этих соседствующих слоев образует слой-пару, представляющую годичный ритм (рис.2.8).



Рисунок 2.8. Пример подсчета визуально выделяемых слоев (пара темный-светлый) на скане шлифа Кч-1. Начало слоя маркируется красной точкой.

Т.к. годичный ритм начинается с весенне-летнего (белого) слоя, то точка ставится на темный слой, у которого граница со следующим ритмом более ясная. Годичные ритмы подсчитываются, и вычисляется скорость накопления слоев для каждого единичного интервала, равного 1 см на глубину. Для уменьшения субъективной погрешности подсчет проводился независимо двумя сотрудниками. При этом не во всех случаях мы уверенно можем поставить точку, так как изображение в некоторых случаях у нас может быть не ясной. Это может быть связано как с условиями осадконакопления, так и с искажениями в процессе изготовления шлифа.

Изучение шлифов также проводилось с применением оптического микроскопа ZEISS Axio Scope.A1 с 2,5-кратным увеличением. Подсчет слоев осуществлялся на основе фотографий шлифов, полученных в проходящем свете в оптическом микроскопе с увеличением, что позволило сделать снимки более высокого разрешения

2.4.2. Изотопные исследования

Распределение активности изотопов ¹³⁷Cs и ²¹⁰Pb используемые для верификации датировки верхнего интервала керна (0-200 мм для керна оз. Кучерлинское и 0-100 мм для керна оз. Нижнее Мультинске), сделаны в Аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск) с использованием полупроводниковой низкофоновой гаммаспектрометрии на коаксиальном Ge-детекторе с низкофоновым криостатом по стандартной методике (аналитик – к.г.-м.н. М.С. Мельгунов) (Приложение 2).

Полученные изотопные данные для осадка позволяют определить максимальную активность ¹³⁷Cs на глубине 160-170 мм (Куч_2018-2) и 10-20 мм (МN-02) от границы вода-осадок (рис.2.9). Это соответствует периодам глобальных атмосферных выпадений, связанным с ядерными испытаниями на Новоземельском полигоне в 1962-64 гг. (Appleby, 1997).



Рисунок 2.9. а. Распределение активности изотопов ²¹⁰Pb и ¹³⁷Cs вдоль верхней части (0-200 мм) керна донных осадков оз. Кучерлинское и верхней части (0-100 мм) керна оз. Нижнее (MN-02).

Для керна оз. Нижнее Мультинское получено 15 радиоуглеродных датировок (табл.2.3): 4 образца донного осадка были отправлены в лабораторию Beta Analytics, 11 в Университет Ланьчжоу, Китай.

LabID	age	error	depth, cm	сс
2020MN-03 1-4	950	30	4	1
Mn03-6	1190	22	6	1
Mn03-18	1309	21	18	1
Mn03-28	1849	23	28	1
Mn03-38	2333	22	38	1
2020MN-03 1-51	2960	30	51	1
Mn03-58	3413	25	58	1
Mn03-68	4008	28	68	1
2020MN-03 2-89	5350	30	89	1
Mn03-98	5841	31	98	1
Mn03-108	6631	33	108	1
Mn03-118	7777	34	118	1
Mn03-128	8361	39	128	1
Mn03-142	8553	36	142	1
2020MN-03 2-152	9570	30	152	1

Таблица 2.3. Результаты радиоуглеродного анализа керна MN03.

2.4.3. Сканирующий микроанализ образцов донных осадков

Сканирование происходило на всю глубину опробования керна Куч_2018-2 и МН-03 с шагом 100, 200 мкм и 1 мм (Приложение 3). Параметры эксперимента для приведены в табл.2.4.

Таблица 2.4. Параметры сканирования исследуемых образцов кернов.

Керн	Энергия	Размеры пятна	Шаг
	возбуждения, кэВ	возбуждающего	сканирования
		излучения (мкм),	(мкм) по высоте
		высота-ширина	керна
Куч_2018-2	19.5	100-500	100
Куч_2018-2	19.5	200-500	200
Куч_2018-2	19.5	1000-2000	1000
MN-02	19.5	1000-2000	1000
MN-03	19.5	1000-2000	1000

Аналитические сигналы, полученные в ходе измерений, представляют собой площади пиков аналитических элементов, выделенные из

спектрограммы с помощью программы для обработки сложных РФА-спектров (AXIL) (Vekemans et al., 1994), предназначенной для энергодисперсионного спектрометрического анализа. Определялись следующие элементы: K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb и Mo по K-сериям, а также Pb, Th и U по L-сериям. Расчет содержания каждого элемента в пробе проводился методом внешнего стандарта с использованием государственного стандартного образца БИЛ-1 (Байкальский ил, ГСО 7126-94). Содержания элементов связаны с точками измерений вдоль профиля сканирования от верхней части керна к его нижней части.

2.4.4. Гранулометрический анализ

Гранулометрический проведен на образцах керна донного осадка MN-03 с шагом в 2 см в диапазоне 0-152 см. Методом лазерной дифрактометрии на анализаторе размера частиц Fritsch Analysette 22 получены данные о гранулометрическом составе для 77 образцов, и выполнена статистическая обработка по методу Р.Л. Фолка и В.С. Уорда (Folk, 1980).

2.5. Результаты

На рис.2.10 приведено распределение процентного соотношения частиц разного размера от глины до мелкого песка для керна оз. Нижнее Мультинское (Krumbein and Pettijohn, 1938). Мелкие частицы доминируют на протяжении всего разреза. Также можно установить, что размерность зерен уменьшается вверх по разрезу (содержание глинистой компоненты увеличивается на 10 %, местами на 20%). По классификации гранулометрических фракций (Раукас, 1981) на интервале 0-70 см преобладает содержание пелитовой (глинистой) фракции, на интервале 70-152 см – алевритовой фракции. Донный осадок представлен алевропелитом.



Средний алеврит (8-16 мкм) Тонкий алеврит (4-8 мкм) Очень тонкий алеврит (2-4 мкм) Глина (<2 мкм) Рисунок 2.10. Результаты гранулометрического анализа для керна озера Нижнее Мультинское (MN-03).

Минеральный состав для керна оз. Кучерлинское, Среднее и Нижнее Мультинские представлен в таблице 2.2. Основными компонентами являются кварц, плагиоклаз, Fe-хлорит, мусковит, биотит. Также присутствует амфибол, калиевый полевой шпат, сидерит, каолинит. Редко встречается гематит, рутил, пирит.

Таблица 2.5. Результаты рентгенофазового анализа образцов керна оз. Кучерлинское, Среднее и Нижнее Мультинские.

N⁰	№ образца	Минеральный состав образцов
Π/Π	Глубина, см	
1	Куч-2	Слюда мусковитового типа ~ 20-30%, Fe-Mg хлорит ~ 20-30%,
	4 - 5	кварц ~ 20-25%, плагиоклаз ~ 15-20%, первые проценты
		амфибола
2	Куч-2	Слюда мусковитового типа ~ 20-30%, Fe-Mg хлорит ~ 25-35%,
	52 - 53	кварц ~ 15-20%, плагиоклаз ~ 5-15%, первые проценты
		амфибола
3	Куч-2	Слюда мусковитового типа ~ 20-30%, хлорит ~ 20-30%, кварц ~
	105 - 106	15-25%, плагиоклаз ~ 15-25%, первые проценты амфибола

50

No	№ образца	Минеральный состав образцов
Π/Π	Глубина, см	
4	MN-03	Кварц ~ 20-25%, плагиоклаз ~ 15-20%, слюда мусковитового
	3-4	типа ~ 20-25%, Fe-Mg хлорит ~ 20-30%, первые проценты
		калиевого полевого шпата, доломита, сидерита, амфибола,
		каолинита.
5	MN-03	Кварц ~ 20-25%, плагиоклаз ~ 15-20%, слюда мусковитового
	19-20	типа ~ 20-25%, Fe-Mg хлорит ~ 20-30%, первые проценты
		калиевого полевого шпата, сидерита.
6	MN-03	Кварц ~ 15-20%, плагиоклаз ~ 5-10 %, слюда мусковитового
	77-78	типа ~ 25-30%, Fe-Mg хлорит ~ 25-30%, первые проценты
		калиевого полевого шпата, сидерита, пирита, цеолита.
7	MN-03	Кварц ~ 15-20%, плагиоклаз ~ 10-15 %, слюда мусковитового
	122-123	типа ~ 20-30%, Fe-Mg хлорит ~ 20-30%, первые проценты
		калиевого полевого шпата, сидерита, гематита.
8	MS – 01	Кварц ~ 20-30%, плагиоклаз ~ 10-20 %, слюда мусковитового
	9-10	типа ~ 20-30%, Fe-Mg хлорит ~ 20-30%, первые проценты
		калиевого полевого шпата, сидерита, амфибола, рутила.

2.5.1. Построение опорного разреза оз. Нижнее Мультинское (MN-02 и MN-03)

На рис.2.11 а показаны верхние 30 см для керна MN-02 и MN-03, которые демонстрируют более высокую степень сохранности верхушки керна MN-02 в процессе пробоотбора. В целях построения надёжной климатической реконструкции принято решение о формировании единого (опорного) разреза, который объединит верхушку керна MN-02 и основную часть керна MN-03.



Рисунок 2.11. а. Фотография верхних 30 см кернов MN-02 и MN-03 (оз. Нижнее Мультинское). b. Процедура подгонки керна MN-02 к MN-03 с использованием влажности осадка. с. Итоговое распределение Br/Rb отношения в опорном разрезе MN02-03 и исходные данные.

На основе данных о влажности кернов сделана предварительная (грубая) подгонка керна MN-02 к более длинному керну MN-03 (Рис.2.10b). Деформация линейных размеров керна MN-02 проводилась путем подбора выравнивающих коэффициентов для каждого исходного интервала глубин с шагом 5 см. При этом весь керн MN-03 был сдвинут на 12 мм относительно начала керна MN-02, что связано с нарушением сохранности верхней части керна MN-03 в процессе забивания керноприемной трубы.

Более точная привязка исходных кернов к опорному разрезу проведена с использованием данных о распределение Br/Rb, полученного с шагом 1 мм для обоих кернов методом сканирующего микро рентгено-флуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (µРФА-СИ) (рис.с).

2.5.2. Построение возрастной модели

Возрастная модель керна оз. Кучерлинское

52

Возрастная модель для верхнего интервала керна оз. Кучерлинское (0– 200 мм) (рис.2.12b) построена по данным трехкратного независимого подсчета визуально выделяемых годовых слоев на этом интервале. Данные варвохронологии (подсчета слоев) показывают, что для глубины 165 мм разброс оценок варьируется от 1957 до 1965 г. Оценка погрешности при подсчете слоев составляет примерно 7%. При этом среднее значение 1961 года ± 4 полностью совпадает с изотопными данными, что подтверждает предположение о годовой природе наблюдаемых слоев.

Для построения возрастной модели на глубину 200-1120 мм проводился подсчет слоев на фотографии влажного керна и в результате исследования шлифов на интервалах 480–650 и 940–1110 мм. Полученные данные были усреднены и аппроксимированы экспоненциальной функцией.

Для подтверждения полученной возрастной модели происходил отбор образцов осадка для проведения радиоуглеродного датирования. Анализ образца, взятого в интервале глубин 1050-1060 мм от верха керна выполнен в ЦКП «Геохронология кайнозоя», Новосибирск (https://archaeology.nsc.ru/proekty/ckp_gk/) (рис.2.12a). Образец 1000-1010 мм США исследован лаборатории Beta Analytics, Майами, В (https://www.radiocarbon.com/).



Рисунок 2.12. А - возрастная модель (глубина керна – возраст слоя осадка) для керна оз. Кучерлинское на полную глубину опробования. Б – возрастная модель для верхнего интервала керна 0-200 мм по данным подсчета слоев и изотопных анализов ¹³⁷Cs.

Возрастная модель для опорного разреза оз. Нижнее Мультинское (MN02-03)

Возрастная модель для опорного разреза оз. Нижнее Мультинское (MN02-03) была построена на основании распределения активности ¹³⁷Cs для интервала 0-50 мм (MN-02) и 15 дат радиоуглеродных датировок (MN-03). Полученные для керна MN-03 радиоуглеродные даты калибровались. Медианные значения календарного возраста образцов применялись для построения возрастной модели с использованием пакета Bacon 2.2 в среде R (рис.2.13). Возраст осадка озера охватывает большую часть голоцена (базальная датировка – около 10800 лет назад, калиброванный возраст).



Рисунок 2.13. Возрастная модель (0-1520 мм) накопления осадка в оз. Нижнее Мультинское (создана с помощью алгоритма Васоп для среды R).

На основании полученных возрастных моделей был выполнен пересчет линейной глубины керна в возрастную. После этого дробные значения возраста были переведены в целочисленные значения. Все данные об элементном составе внутри одного года усреднялись и приписывались этому году в виде одного значения.

2.5.3 Поиск следов катастрофических событий

Прежде чем переходить к построению трансферных функций и последующему созданию климатических реконструкций на весь временной интервал, перекрываемый керном, необходимо провести оценку качества временных рядов геохимических данных. В непрерывном процессе осадкообразования возможны событийные нарушения, связанные с резким изменением внешних условий, в первую очередь погодными и сейсмическими событиями.

55

Событийный след в донных отложениях зачастую возникает из-за резкого изменения скорости осадкообразования, вызванного мгновенным поступлением значительного объема аллохтонного или автохтонного материала, как, например, при оползнях или образовании турбидитов (Shanmugam, 2019; Kremer et al., 2017). В ритмично слоистых осадках следы катастрофических событий визуально проявляются в виде слоя, в несколько раз отличающегося по толщине от выше- и нижележащих.

Подобный слой, мощностью более 20 мм, при средних значениях на всю глубину керна от 0,5 до 6 мм, обнаружен в исследуемом разрезе керна оз. Кучерлинское на глубине 50 см (рис.2.14). Единственным геохимическим индикатором выделяющимся во временных рядах аналитических данных является отношение Rb/Sr на интервале 496-522 мм.



Рисунок 2.14. А) Профиль распределения отношения Rb/Sr на линейной шкале; b) фотография поверхности влажного керна Куч_2018-2; c) фотография шлифа Кч-10 (интервал 480-530 мм). Красным показан фрагмент осадка, соответствующий оптическому шлифу.

Соотношение инертных и подвижных элементов обычно указывает на интенсивность или степень выветривания (Zeng et al., 2013; Jin et al., 2006; Xu et al., 2010). Rb имеет тенденцию сосуществовать с K в силикатных минералах,

таких как калиевый полевой шпат, мусковит, биотит и т. д., поскольку ионный радиус Rb близок к радиусу К. Данный элемент является слабоподвижным во время выветривания. Sr предпочитает минералы, содержащие Ca, такие как карбонатные минералы, плагиоклаз и пироксен. Когда эти минералы подвергаются выветриванию, минералы, содержащие К, как правило, более стабильны, минералы, приводит чем содержащие Ca, что К фракционированию между Rb и Sr в продуктах выветривания (Xu et al., 2010). Различное поведение Rb и Sr в природных процессах полезно для определения источников материалов указания интенсивности И химического выветривания. Поэтому соотношения Rb/Sr использовались ЛЛЯ реконструкции степени или интенсивности химического выветривания и изменений климатических условий в геологических временных масштабах (Wu et al., 2006; Liu et al., 2014; Fritz et al., 2018; Liu et al., 2023).

Ранее проведенные исследования сотрудниками лаб. 220 ИГМ СО РАН донных отложений пресноводных высокогорных озер Донгуз–Орон, Кавказ (Дарьин и др., 2013) и Телецкого, Горный Алтай (Дарьин и др., 2015) показали наличие устойчивой связи рубидий-стронциевого отношения и размера частиц в осадке.

Данный факт связан с высокой интенсивностью процессов выветривания стронция из мелких частиц (<10 мкм) с более развитой поверхностью на единицу массы по сравнению с крупноразмерными частицами. В то время, как рубидий мало растворим в пресной воде, стронций выносится из частиц разного размера с различной скоростью, что приводит к повышению отношения Rb/Sr (за счет уменьшения содержания стронция) в мелкоразмерных частицах относительно более крупных.

Применение возрастной модели построенной на всю глубину керна Куч-2018-2 (1120 мм) позволяет оценить возраст события в 1764 г.н.э. В пределах погрешности возрастной модели это совпадает с датой исторического Монгольского землетрясения, произошедшего 9 декабря 1761 года на восточных склонах Монгольского Алтая (рис.2.14). Землетрясение с магнитудой 8.3 и интенсивностью 11 баллов произошло в пределах крупного северо-западного разлома Ар-Хутел (рис.2.15) (Хилько и др., 1985; Никонов, 2004).



Рисунок 2.15. Сейсмический эффект землетрясения 9 декабря 1761 г. Звездочкой отмечен его эпицентр. Изосейсты на территории Русского Алтая проведены по данным (Никонов, 2004); данные по эпицентральной зоне в Монголии показаны по (Хилько и др., 1985). Красной точкой показано положение оз. Кучерлинское.

2.5.4 Построение температурной реконструкции региона исследования

С использованием полученных возрастных моделей (глубина керна – возраст осадка) был проведен пересчет линейной глубины керна в возрастную. После этого дробные значения возраста были переведены в целочисленные значения. Все данные об элементном составе внутри одного года усреднялись и приписывались этому году в виде одного значения.

Для выявления геохимических индикаторов, связанных со среднегодовыми температурами в регионе исследования, использовались данные с ближайших метеостанций Кара-Тюрек и Усть-Кокса, расположенных в 10-40 км от исследуемых озер (Приложение 4).

С применением методических подходов, описанных в разделе 1.6, методом множественной регрессии построена трансферная функция,

устанавливающая связь среднегодовых температур и элементного состава осадка. Сравнение проводилось на погодовой временной шкале.

В качестве геохимического индикатора климата в оз. Нижнее Мультинское выбран Br/Rb, который теоретически отражает соотношение органогенной и терригенной компоненты донного осадка. Для построения трансферной функции, связывающей геохимический индикатор климата метеопараметром, (Br/Rb) c инструментальным были подготовлены метеостанций Кара-Тюрек Усть-Кокса, временные ряды данных И расположенных на одинаковом расстоянии от озера, за период с 1940 по 2020 годы.

Полученная функция имеет вид: $T = 41,168 \times Br/Rb - 3,6314$.

Символы элементов обозначают концентрацию элемента в г/т (ppm), которая относится к интервалу керна, соответствующему годовому слою при пересчете миллиметровой шкалы в годовую по используемой возрастной Сравнительный реконструируемой модели. анализ температуры И метеорологического ряда наиболее объединенного выявил высокую корреляцию с трехлетней сглаженной среднегодовой температурой воздуха (+0.785 при n=76) с ошибкой в 1.3°С для 95% вероятности (рис.2.16). Температура представлена в виде отклонения от среднего значения за период 1961-1990 годов.



Рисунок 2.15. а. Сравнение реконструкции с инструментальными данными на интервале 1940-2016 гг. b. Линейная связь температуры с отношением Br/Rb в датированных слоях донного осадка опорного разреза.

В донных отложениях оз. Кучерлинское содержания Br оказались ниже предела обнаружение. Для установления связи элементного состава с инструментальными данными полученными с ближайшей метеостанции Кара-Тюрек, применялся более широкий набор элементов. Для оз. Кучерлинское трансферная функция имеет вид: $T = 1,104 \times Ti + 0,131 \times Ni - 0,939 \times Sr + 1,535 \times Y + 2,920 \times Nb - 1,623 \times Mo -7,505.$

Применение полученной зависимости дает значимый коэффициент корреляции (+0.6 для n = 77) между инструментально замеренной среднегодовой температурой воздуха и реконструкцией на интервале обучения (1940–2016 гг.) с ошибкой в 1.3°С для 95% вероятности. Использование сглаженных 10-летних величин способствует повышению коэффициента корреляции до +0.84 и снижению погрешности до 0.52°С. На рис.2.17 показаны сглаженные метеоданные для интервала обучения, результат реконструкции по трансферной функции и доверительный интервал.



Рисунок 2.17. 10-летние температуры на интервале 1940-2016 гг., реконструкция по геохимическим данным, 95% интервал погрешности реконструкции. Температурные значения указаны в аномалиях относительного среднего за период 1961—1990 гг.

Временной ряд геохимических данных на всю глубину опробования керна детально изучался для обнаружения возможных аномальных участков, отличающихся по элементному составу от интервала расчета трансферной функции.

Не было обнаружено участков керна, элементный состав которых (для каждого элемента) отличался бы более чем на 30% от среднего для интервала 0 – 100 мм. Это свидетельствует о принципиальном постоянстве условий осадконакопления на этом интервале времени и дает возможность использовать полученные функции для расчета температурной реконструкции на всю глубину опробования.

С применением трансферной функции построена реконструкция на всю глубину опробования керна Куч_2018-2 охватывающая интервал последних 1400 лет. В пределах полученной реконструкции выделяются известные мировые периоды потепления и похолодания: холодный период Темного века (~ от 500 до 750 г. н. э.), средневековое потепление (~ от 750 до 1300 г. н. э.), последующий Малый ледниковый период (~ от 1300 до 1850 г. н. э.), а также значительное повышение температуры, с начала XX в. (рис.2.18).



Рисунок 2.18. Реконструкция десятилетних температур за последние 1400 лет. Температурные аномалии указаны относительного среднего значения за период 1961— 1990 гг. I — современный теплый период, II — Малый ледниковый период, III — Средневековый теплый период, IV- холодный период Темного века.

Исследование положения границ ледников в Российском Алтае подтверждает, что в период с II по VI вв. н. э. в горах Алтая было тепло, в VI в. началось похолодание, а с XI и до начала XIII в. отмечалось потепление с последующим новым похолоданием (Волкова, 1977; Ненашева, 2013). Радиоуглеродное датирование деревьев, погребенных под моренами, указывает на продвижение в XIII веке н.э. в горах Российского Алтая на границе с Монголией крупных ледников, ознаменовавшее начало Малого ледникового периода в этом регионе (Agatova et al., 2012). Подобный климатический сценарий для Горного Алтая и смежных регионов также описан в работах (Myglan et al., 2012; Болиховская, Панин, 2008; Yang et al., 2020).

На рис.2.19 показано сравнение полученной температурной реконструкции для района оз. Кучерлинское с рядом глобальных реконструкций Северного полушария. Для удобства сравнения все литературные реконструкции были нормированы с использованием минимакс метода в диапазоне от 0 до 1.



Рисунок 2.19. Сравнение температурной реконструкции с литературными данными (Дарьин и др., 2021). (а) – реконструкция по литолого-геохимическим данным осадков оз. Кучерлинское (данная работа); (б) – Северное полушарие, А. Moberg, 2005; (в) – Китай, В. Yang, 2002; (г) – С.-В. Европа, V. Klimenko, 2014; (д) – Северное полушарие, В. Christiansen and F.C. Ljungqvist, 2012; (е) – Северное полушарие, IPCC, 2013.

В целом, представленные пять глобальных реконструкций для регионов Северного полушария достаточно хорошо совпадают с реконструкцией автора, что позволяет сделать вывод о правильности использованного методического подхода и полученных результатов.

Выводы 2 главы

В результате применение сканирующего µРФА-СИ получены данные о элементном составе отдельных слоев и интервалов керна донных осадков озера Кучерлинское. Впервые построенная температурная реконструкция по результатам изучения элементного состава донных отложений оз. Кучерлинское для последних 1400 лет отчетливо отображает проявление на этой территории известных периодов потепления и похолодания: холодный период Темного века, Средневековый теплый период, Малый ледниковый период и современное потепление.

Сравнительный анализ полученной реконструкции с имеющимися реконструкциями для различных регионов Северного полушария, показывает, что климат Горного Алтая на протяжении последних 1400 лет менялся в соответствии с общим глобальным климатическим сценарием.

В результате применение сканирующего µРФА-СИ получены данные о элементном составе отдельных слоев и интервалов керна донных осадков оз. Кучерлинское и оз. Нижнее Мультинское. Единый разрез оз. Нижнее Мультинское перекрывает временной интервал ~ 10800 лет, что позволяет использовать полученные данные элементного состава для построения температурной реконструкции на большую часть голоцена. В непрерывной последовательности годичной слоистости оз. Кучерлинское выявлен слой аномальной мощности, выделяющийся по визуальным и геохимическим характеристикам, который по возрастной модели соответствует Великому Монгольскому землетрясению 1761 г.

ГЛАВА 3. ОЗЕРО ПЕЮНГДА (ЭВЕНКИЯ)

3.1. Физико-географические условия

Район исследования относится к государственному природному заповеднику "Тунгусский" расположенному в Эвенкийском район Красноярского края. В орографическом отношении территория приурочена к центральной части Средне-Сибирского плоскогорья и представляет собой холмистое плато, расчлененное глубоковрезанными речными долинами. Преобладающие абсолютные отметки высот – 360-550 м.

Гидросеть площади (реки Чамба, Верхняя Лакура, Пеюнгда и их притоки) относится к бассейну Подкаменной Тунгуски, наиболее крупной водной артерии, местному базису эрозии. Климат резко континентальный, с долгими и суровыми зимами, температура которых может опускаться до –50 °C, и коротким жарким летом, где температура достигает верхней отметки в +40 °C. Устойчивый снежный покров покрывает речные долины с конца октября и сохраняется до начала мая. Среднегодовое количество осадков составляет 400 мм, при этом наибольшее количество осадков выпадает в летние месяцы и начале осени. Вся территория находится в зоне распространения вечной мерзлоты, глубина которой варьируется от 0,3 до 3 метров.

Территория исследования относится к таежной зоне Восточной Сибири с плохой обнаженностью. Склоны долин и низкие водоразделы покрыты лесными массивами, безлесны гольцовые вершины, плоские участки тундрового типа, приуроченные к верхним уровням плато, и заболоченные понижения в верховьях долин. Леса лиственничные, лиственнично-сосновые с примесью березы, ели, пихты, кедра (Верганов и др., 2015).

3.2 Геологическое строение

На основании алгоритма моделирования речных бассейнов средствами ArcGIS 9.3 был произведен расчет площади территории водосбора озера Пеюнгда (ArcGISTM Spatial Analyst, 2001) (рис.3.1). Это позволяет говорить о прямой зависимость химического состава донного осадка и состава горных пород, представленных на водосборной площади.

В пределах водосборной площади озера Пеюнгда на поверхность выходят отложения средней перми - нижнего триаса (рис.3.1). Расчленение стратифицированных образований произведено в соответствие с легендой Тунгусской серии Госгеолкарты-200/2 (Варганов и др., 2015). Информация о составе и строении этих подразделений получена в результате бурения параметрических скважин (Викс и др., 1976). Разрез верхней части нижнего– среднего кембрия вскрыт колонковыми скважинами (Ким, 1970).



Рисунок 3.1. а. Площадь территории водосбора. Точками помечен урез реки. b. Схема геологического строения района исследования (Верганов и др., 2015). Условные обозначения: 1 – кербовская свита; 2 – учамская свита; 3 – туточанская свита; 4 - катангский комплекс; 5 – несогласное залегание.

Среднепермские породы (кербовская свита) представлены переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов, залегают с перерывом

на нижнепермских отложениях. Мощность свиты до 160 м (Глухов и др., 1974; Верганов и др., 2015).

Широкое распространение в пределах исследуемой территории получили породы нижнего триаса (туточанская, учамская свиты), представленные комплексами долеритов и туфоалевритов. Интрузивные магматические породы относятся к катангскому комплексу габбродолеритов раннего триаса. Интрузии образуют мелкие маломощные тела изометричной, изометрично-вытянутой формы, пластовые тела, дайки.

На современном эрозионном срезе в пределах водосборной площади интрузии долеритов слагают около 25% территории. Обнажены интрузии слабо, коренные выходы высотой до 4-5 м имеются только на самых вершинах водоразделов и иногда в бровке рек.

Минеральный состав долеритов представлен плагиоклазом (An 55%) – 45-50%, моноклинным пироксеном – 30-35%, оливином – 3-7%, ильменитом – 3-5%, и редкими зернами биотита; структура – гломеропорфировая с микродолеритовой основной массой (Верганов и др., 2015).

3.3 Отбор образцов и пробоподготовка

Пеюнгда представляет собой пресноводное озеро (43 мг/л) округлой формы диаметром более 800 м и максимальной глубиной до 30 м. Площадь составляет 0,5 км² (рис.3.2).



Рисунок 3.2. а) Географическое положение озера Пеюнгда; b) Данные батиметрии и место отбора керна (Rogozin et al., 2023). Точкой показано самое глубокое место. АВ и ВС - сейсмоакустические профили дна.

В сентябре 2022 года коллективом институтов ИБФ СО РАН (Красноярск), КФУ (Казань) и ИГМ СО РАН проводилось совместное изучение морфологии озера Пеюнгда и, расположенного в 5 км к югу, озера Заповедное. Проведены измерения профилей дна озер с применением эхолотакартплоттера на надувной моторной лодке.

Дно озера Пеюнгда имеет коническую форму с двумя углублениями в центральной части, максимальная глубина составляет 34,6 м (60°37.174′ с.ш., 101°38.442′ в.д.) (рис.3.3).

Сейсмоакустические исследования проводились методом непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП) (Крылов и др., 2015). Для выполнения работ использовался сейсмоакустический комплекс, разработанный в Казанском федеральном университете. На вертикальных разрезах сейсмоакустических данных отображается глубина в метрах, где для перевода времени в глубину применялась скорость распространения звука в воде, равная 1500 м/с. Горизонтальная ось графиков представляет собой пикеты возбуждения, при этом 10 пикетов на разрезе соответствуют 100 воздействиям акустической волны (рис.3.3).

68



Рисунок 3.3. Сейсмоакустические профили дна озера Пеюнгда. а – профиль АВ (в районе места отбора керна), b – профиль ВС.

Из озера Пеюнгда с глубины 27 м было отобрано два керна донных отложений в сентябре 2022 года: керны Pe-22-1 и Pe-22-3 длиной 1076 мм и 1187 мм, соответственно (60°37.517' СШ, 101°38.720' ВД). Отбор осуществлялся с помощью гравитационного пробоотборника UWITEC.

На глубине 8-9 см наблюдается наличие визуально выделяемого светлого слоя мощностью до нескольких мм. В керне Pe-22-1 маркирующий слой находился на глубине 85 мм от границы вода—осадок, Pe-22-3 на глубине 78 мм (рис.3.4).



Рисунок 3.4. Фрагмент верхней части кернов донных отложений озера Пеюнгда (Pe-22-1, Pe-22-3) и озера Заповедное (Zap-15-1), глубина в см от границы вода-осадок. Белым выделен интервал содержащий аномальный слой 1908-10 гг. Слева – изменение влажности на интервале 0 – 220 мм для керна Pe-22-3.

3.5 Методы исследования

3.5.1 Построение возрастной модели

Для построения возрастной модели использовались данные подсчета визуально выделяемых слоев в оптических шлифах (рис.3.5). Полученные данные применялись для определения линейной скорости осадконакопления (мм/год) для каждого 5-мм интервала. Для "слепых" участков керна (не имеющих визуально выраженных слоев) скорость осадконакопления оценивалась путем экстраполяции данных ИЗ соседних интервалов, расположенных выше и ниже. Максимальные и минимальные оценки скорости осадконакопления применялись при пересчете линейных размеров глубины керна в временные ряды.



Рисунок 3.5. Изображение шлифа донных отложений оз. Пеюнгда (Pey-22-1), полученного на оптическом сканере. Красными точками показаны уверенно выделяемые слои, зелеными — предполагаемые.

Поскольку оба керна отобраны в сентябре 2022 года, предполагалось, что верхняя часть может соответствовать слою 2021 года. Однако с учетом повышенной влажности керна (~ 90 %), возможны деформация и потери верхних менее консолидированных слоев как в момент отбора, так и при последующей транспортировке. Предпринята попытка оценить возможные потери и установить дату верхнего слоя полученного образца для корректного построения возрастной модели.

В марте 2015 г. с озера Заповедное, расположенного в 5 км южнее озера Пеюнгда, был отобран керн донных отложений Zap-15-1 длинной 380 мм. Для оценки скорости осадконакопления проведено измерение распределения активности изотопов ²¹⁰Pb и ¹³⁷Cs. В керне на глубине 158–163 мм от границы вода–осадок выделяется светлый слой толщиной 5–7 мм. На основании полученной возрастной модели данный слой соответствует интервалу 1908–1910 гг., что позволяет связать его формирование со взрывом ТКТ (Дарьин и др., 2020). Светлый слой, расположенный на глубине более 70 мм в донном осадке озера Пеюнгда, вероятно, имеет схожее происхождение, и может быть датирован 1908-1911 гг..

Для более точного построения возрастной модели на интервале последнего столетия (~100 мм от границы вода-осадок) использовались данные о линейной скорости осадконакопления и положение маркирующего слоя 1908–10 гг. в границах 78–80 мм. Для верхних 100 мм построена линейная возрастная модель с тремя скоростями осадконакопления — 0.79, 0.81 и 0.84
мм/год (рис.3.6). Также получена оценка потерь верхних слабо консолидированных слоев в размере 10 мм (12–13 лет). В результате, для корректного построения возрастной модели к глубине керна добавлено сверху 10 мм.



Рисунок 3.6. Возрастная модель для верхних 100 мм керна Pey-22-3. Линейная модель построена для трех вариантов подсчета средней скорости осадконакопления с учетом положения датированного слоя 1908–10 гг. и добавки возможных потерь верхних 10 мм керна.

Оценка минимальной, средней и максимальной линейной скорости осадконакопления для интервала 100–900 мм проводилась также как и для верхних 100 мм. Полученные оценки скорости экстраполировались на всю глубину опробования керна Pey-22-3 (рис.3.7) для построения возрастной модели. Возрастная модель для средней скорости использована при расчете аппроксимирующей квадратичной функции, которая применялась для пересчета линейной (в мм) шкалы глубины керна во временную (лет назад).



Рисунок 3.7 Возрастная модель на глубину опробования 100–900 мм. Максимальная — подсчет только надежно выделяемых слоев, минимальная — надежных и предполагаемых.

3.5.2 Комплексное исследование аномального слоя 1908-10 гг.

При отсутствии волнового перемешивания и биотурбации, последовательно накапливающиеся донные осадки глубоководных озер представляют собой надёжный архив климатических и тектонических событий прошлого. Особый интерес представляют озера содержащие донные осадки с ежегодно ламинированными слоями – т.н. «варвные» осадки или «ленточные глины» (Zolitschka et al., 2015). При этом толщина, минеральный и элементный состав отдельных слоев зависят от внешних условий на территории водосбора и отражают как динамику погодно-климатических изменений, так и события резко меняющие процессы осадкообразования.

В представленной работе обсуждается механизм образования аномального слоя, связь с взрывом ТКТ и источники поступления вещества, формирующие его минеральный и элементный состав.

73

Аномальный слой уверенно идентифицируется в шлифах как в оптическом, так и в электронном микроскопе и отличается от выше- и нижележащих слоев толщиной (1-1,5 мм) и цветом. На основании подсчета визуально выделяемых слоев и построения возрастной шкалы «глубина керна – возраст осадка» установлено, что аномальный слой относится к временному интервалу 1908-1910 гг. (Дарьин и др., 2024).

Применение оптического микроскопа

Изучение годовой слоистости проводилось на основе тщательного микроскопического анализа 46 прозрачно-полированных шлифов на микроскопе ZEISS Axio Scope.A1. Снимки шлифов получены с помощью камеры высокого разрешения AxioCam ICc 3 High-Resolution Microscope Camera. В шлифах, как и в керне, на глубине более 70 мм отмечен слой аномальной мощности 0,6-1 мм при средней мощности выше- и нижележащих слоев 0,35 мм (рис.3.8).



Рисунок 3.8. Фотографии шлифов Pey-22-1 в проходящем свете (справа колонка без анализатора, левая колонка с анализатором). а, b – увеличение x2,5; c, d – увеличение x10. Белым квадратом выделена увеличенная область.

Применение электронного микроскопа

С электронного помощью микроскопа происходило изучение порошковых проб. Из порошковых проб проводилось выделение тяжелых минералов с использованием бромоформа с удельным весом 2,9 г/см³. Пробы разделялись на две основные фракции — легкую и тяжелую (Колесник и др., 2019). Обработано 10 проб легкой фракции и 10 проб тяжелой фракции. В преобладают кварц, слюдисто-глинистые агрегаты и легкой фракции полевые шпаты. Среди минералов тяжелой фракции преобладает анатаз, также встречаются титаномагнетит, магнетит, пироксен и амфибол. Минеральные зерна преимущественно не изменены либо, либо слабо изменены, средней степени окатанности.

Спектроскопия комбинационного рассеяния

Методы КР-спектроскопии использовались для идентификации Tiсодержащих минералов с применением спектрометра HR-800 (Horiba Jobin Yvon) при следующих параметрах: длина волны лазера 532 нм, ширина входной щели 50–200 мкм, решетка 1800 штр/мм, время накопления спектра от 5 до 30 с.

В результате применения КР-спектроскопии установлено, что Тісодержащие минералы представлены анатазом, получены данные о распространении включений анатаза в пределах слоя аномальной мощности. На рис.3.9. зерна анатаза представлены ярко-желтым цветом.



Рисунок 3.9. а) Фотография включений анатаза и b) КР-спектр, отвечающий данному минералу. с) показан фрагмент шлифа Pey-22-3, в пределах которого проводилось сканирование.

Сканирующий микроанализ

Для микро-РФА-СИ применялась монохроматическая энергия возбуждения в 23 кэВ с временем измерения в каждой точке 40 с (Приложение 5).

На глубине 78 мм в керне Pey-22-3 выделяется светлый слой мощностью до нескольких мм. По данным сканирующего микро-РФА-СИ для светлого слоя отмечаются повышенные содержания элементов (Ti, Rb, Sr, K, Y, Zr), характеризующих терригенный материал, поступающий в озеро с территории водосбора (рис.3.10). Значительное повышение содержаний этих элементов в слое 1908-1910 гг. может свидетельствовать об усиленном терригенном сносе. Повышение содержания терригенного материала в донных осадках привело к относительному уменьшению доли органогенной компоненты, что выразилось в отрицательных аномалиях в содержаниях таких элементов, как

76

Br, Mo, U и ряде других. Резкое понижение влажности в интервале 70-80 мм также свидетельствует об изменении состава осадка.





Динамика температуры северного полушария за последние 2000 лет исследована достаточно хорошо, однако пространственные закономерности остаются неопределенными и значительно варьируются в различных регионах (Shi, 2012; Jones et al., 2009). Реконструкции температур в Арктике свидетельствуют о том, что среднегодовые температуры за последние тысячелетия были сравнимы или даже выше, чем в 20-м веке (Hanhijärvi et al., 2013; IPCC, 2013; Klimenko et al., 2014; Semenov, 2021). В настоящее время Арктика демонстрирует самый быстрый рост среднегодовой температуры поверхности, превышающий мировые показатели вдвое. Этот феномен известен как "полярное усиление" (Screen, Simmonds, 2010; Serreze, Barry, 2011).

Информация об изменениии климата в приарктических и арктических районах материковой части Восточной Сибири практически отсутствует. Наиболее подробно данные о климатических вариациях в голоцене, относящихся к Восточной Сибири, представлены для территории оз. Байкал (Takahara et al., 2000; Bezrukova et al., 2010; Shichi et al., 2009).

В настоящей работе представлена климатическая реконструкция с высоким временным разрешением для района, расположенного в арктической части Восточной Сибири, т.е. между 60° и 90° северной широты (Zi-Chen et al.,

2023). Реконструкция построена на основе изучения элементного состава керна донных осадков оз. Пеюнгда.

Построение временных рядов геохимических данных

С использованием линейной возрастной модели, построенной для верхних 100 мм керна, проведен пересчет миллиметровой шкалы глубин в годовую. Аномальный слой 1908–1910 годов исключен из временного ряда, так как его элементный состав значительно отличается от выше- и нижележащих слоев и не имеет связи с климатическими условиями того времени. Для перевода глубины от 100 до 900 мм во временной ряд применялась квадратичная функция. В процессе пересчета глубин керна получены дробные значения возраста, которые затем переводились в целочисленные. Таким образом, данные о элементном составе керна донных осадков были преобразованы во временные ряды.

Полученные данные распределения элементного состава осадка по всей глубине керна были усреднены с шагом в 3 года. Усреднение необходимо, поскольку размеры пучка возбуждающего излучения превышали расчетную толщину годового слоя. В результате при измерениях фиксировался рефлекс от двух или трех соседних слоев, что влияло на точность получаемых данных. Такой подход позволил получить более устойчивые результаты, соответствующие средним условиям осадконакопления в исследуемом периоде.

Выделение климатических индикаторов. Построение трансферной функции.

Для поиска связи между погодно-климатическими данными и геохимическими параметрами осадка необходим достаточно длинный ряд региональных инструментальных метеонаблюдений. Ближайшая метеостанция находится в пос. Ванавара, расположенном в 40 км от озера Пеюнгда. Для метеостанции Ванавара имеется непрерывный ряд наблюдений для интервала с 1932 по 1989 гг. и с 2005 по 2020 гг. (https://climexp.knmi.nl/ gettemp.cgi? WMO=24908) (Приложение 4). На сайте Climate Explorer

(https://climexp.knmi.nl) получена расчетная информация для координат оз. Пеюнгда о среднегодовых температурах для временного интервала 1895–2020 гг. Сравнение расчетных и фактических метеоданных показало их высокую сходимость (коэффициент корреляции ~0.9), что позволяет в дальнейшем использовать расчетный метеоряд длиной более 100 лет (1895–2000 гг.).

Для расчета трансферной функции данные о среднегодовой температуре воздуха на интервале 1895–2000 гг. были усреднены с шагом в 3 года и сопоставлялены с временным рядом геохимических данных для керна Pey-22-3 на этом же интервале. Используя метод множественной регрессии, с применением методических приемов, подробно описанных в разделе 1.7., была построена трансферная функция, связывающая данные элементного состава донного осадка с климатическими параметрами (среднегодовой температурой).

Функция, показывающая связь среднегодовой температуры с составом осадка после исключения элементов с незначительным влиянием (менее 3 % в сумме), представлена следующим образом:

T = 5.389×Co/Inc + 3.887×Br + 1.443×Rb – 5.657, где Co/Inc — отношение упруго/неупруго рассеянного на образце возбуждающего излучения, символ элемента обозначает концентрацию этого элемента в ppm.

Из параметров, входящих в уравнение, можно отметить, что содержание брома служит индикатором органической компоненты донного осадка (Gilfedder et al., 2011; Leri и Myneni, 2012; Guevara et al., 2019) , как аллохтонного, так и автохтонного происхождения, в то время как содержание рубидия считается мерой терригенного сноса (Boës et al., 2011). Отношение Со/Inc определяется рентгеновской плотностью вещества в точке измерения и в ряде случаев коррелирует с климатическими параметрами (Darin et al., 2003).

Таким образом, в уравнении отражено изменение соотношения двух видов материала (органогенного и терригенного происхождения), формирующих донные отложения озера Пеюнгда в зависимости от среднегодовых температур. Для полученной трансферной функции коэффициент корреляции между исходными метеоданными и расчетными значениями равен +0.58. Для 105 точек (1895–2000 гг.) этот коэффициент являются значительными (p = 0.99) и подтверждают наличие устойчивой линейной связи между изменением среднегодовых температур и элементным составом осадка, который формируется под воздействием внешних климатических условий.

На рис. 3.11 представлены реконструкция температуры на интервале 1895-2003 гг., 95 % интервал погрешности и усреднённый 10-летний метеоряд, для которого доступны наборы инструментально замеренных данных.



Рисунок 3.11. Сравнение температурной реконструкции с инструментально замеренными данными на интервале 1895–2003 гг. (<u>https://climexp.knmi.nl</u>) для района расположения оз. Пеюнгда.

Временной ряд геохимических данных керна оз. Пеюнгда (Pey-22-3) на интервале опробования 100–900 мм детально просматривался с целью выявления возможных аномальных участков, отличающихся по элементному составу от интервала расчета трансферной функции (0–100 мм). Не было обнаружено ни одного участка керна, элементный состав которого (для каждого элемента) изменялся бы более чем на 30 % по сравнению со средними значениями на этом интервале. Это указывает на постоянство условий осадконакопления на интервале 100-900 мм, и позволяет применить трансферную полученную функцию для расчета температурной реконструкции на всю глубину опробования керна.

Ha рис.3.12 представлена региональная реконструкция средних трехгодовых температур воздуха для района оз. Пеюнгда, выполненная с годовым временным разрешением и количественно откалиброванная на региональных метеонаблюдений. Сравнение полученной основе реконструкции c литературными данными демонстрирует хорошее соответствие основных климатических показателей и трендов.



Рисунок 3.12. а — инструментальные метеоданные п. Ванавара, доступные с 1895 по 2000 гг. (https://climexp.knmi.nl; http://meteo.ru/data/156-temperature) и реконструированные изменения температуры в районе оз. Пеюнгда, серым показан интервал неопределенности (Новиков и др., 2024); б — литературные данные: Арктика — IPCC, 2013; Русская Арктика — Klimenko et al., 2014; Северное полушарие — Moberg et al., 2005 и Esper et al., 2002; Северо-восточная Европа — Klimenko et al., 2009. МСА — Средневековый климатический оптимум (X–XIII вв.), LIA — Малый ледниковый период (XIV–XIX вв.), 20С — современность.

Выделяется средневековое потепление в период с X по XIII век. Также, несмотря на незначительные отличия, отчетливо проявлен Малый ледниковый период (XIV–XIX вв.) и значительное повышение температуры с начала XX века. Реконструированные температурные тренды отображают схожие временные интервалы. Для большинства временных периодов структура температурных вариаций совпадает. В основном, представленные температурные реконструкции совпадают достаточно хорошо, что указывает на правильность выбранного методического подхода и полученных результатов.

Выводы 3 главы

Донные отложения оз. Пеюнгда представляют собой варвные осадки, содержащие отдельные годовые слои. Подсчет отдельных слоев позволяет строить возрастную модель глубина керна–возраст слоя осадка. В осадке озера визуально и по геохимическим аномалиям выделяется слой, связанный с взрывом ТКТ в 1908 г., что позволяет верифицировать возрастные модели на интервале последнего столетия.

В результате комплексного исследования с использованием оптической и электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния и сканирующего µРФА-СИ получены данные о минеральном и элементном составе отдельных слоев и интервалов керна донных осадков озера Пеюнгда. Полученные данные подтверждают механизм образования аномального слоя 1908-10 гг. в донных осадках оз. Пеюнгда за счет усиленного сноса терригенного материала и древесной золы, после взрыва ТКТ, вывала леса и последующего пожара.

В сравнении с выше- и нижележащими слоями возрастает количество минеральных зерен анатаза, которые, вероятно, являются продуктом разрушения зерен ильменита и установлены шлиховым опробованием в аллювии водотоков (Глухов Ю.С., 1974, 1987). Источником сноса являются долериты дифференцированных интрузий комплекса габбродолеритов, получившие широкое распространение в пределах водосборной площади.

Полученная, на основании изучения элементного состава донных осадков оз. Пеюнгда, температурная реконструкция, в пределах оцененных

погрешностей, совпадает с известными мировыми реконструкциями среднегодовых температур Арктики на интервале последних 1000 лет. Также отчетливо выделяются известные периоды потепления и похолодания.

ГЛАВА 4. ОЗЕРО ЧАША

Вулканический пепел представляет собой удобный инструмент для стратиграфических корреляций осадочных отложений. Крупные эксплозивные извержения с объемом эруптивного материала более 10 км³ выбрасывают пепел высоко в стратосферу, а зафиксированная дальность разноса пепла достигает 5 –7 тыс. км. (Davies, 2015). Быстрое выпадение пепла (от дней до нескольких месяцев), приводит к формированию изохронных слоев тефры на обширных территориях. При этом сопоставление удаленных слоев основано на уникальности химического состав вулканического пепла для каждого отдельного извержения (Lowe et al., 2017; Ponomareva et al., 2015).

Использование озерных донных отложений поиска для И идентификации датированных слоев тефры представляет особый интерес в связи с хорошим сохранением вещества в керне донных осадков. Однако получение образцов ненарушенного керна донных отложений требует специального оборудования, а поиск и исследование слоев тефры (особенно криптотефры - не выделяемой визуально) предполагает использование аналитических методик с высоким пространственным разрешением и низкими обнаружения широкого набора элементов. Необходимым пределами требованиям аналитическим отвечает метод сканирующего микро рентгенофлуоресцентного анализа с возбуждением монохроматизированным синхротронным излучением (µРФА-СИ), разработанный авторами для исследования образцов донных отложений (Дарьин и др., 2013) и адаптированный к поиску слоев тефры (Дарьин и др., 2023).

4.1 Геолого-географическая характеристика

Озеро Чаша (Медвежья Чаша) расположено в Усть-Большерецком районе Камчатского полуострова. Климат района переходный от морского континентальному со сравнительно холодным влажным летом и умеренно холодной зимой. Обильное снеготаяние длится с конца мая до конца июня.

В пределах территории исследования протекает река Толмачева, которая относится к бассейну Охотского моря. Самым крупным озером является оз. Толмачево (5×4 км), остальные озера – кратерные, лавоподпрудные и ледникового происхождения, в среднем имеют диаметр менее 1 км.

В геологическом строении района принимают участие вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования неогенового и четвертичного возраста. Озеро Чаша (Медвежья Чаша) расположено в Южной Камчатке в центральной части лавового плато Толмачев дол - района интенсивного базальтового вулканизма в плейстоцене-голоцене. Кратер, в котором расположено оз. Чаша, сформировался 4628 ± 90 (датировка по ¹⁴C) лет назад во время мощного одноактного извержения.

Толмачев дол представляет собой лавовое плато с абсолютными высотами 800-900 м, образованное в результате обширных излияний лав из многочисленных шлаковых конусов, расположенных на площади около 225 км². Здесь насчитывается более 100 эруптивных центров. На севере Толмачев дол продолжает зону ареального вулканизма Южной Камчатки, которая простирается на северо-восток от вулкана Ксудач.

В бортах главного кратера вскрыты многочисленные выходы коренных пород - лавы потоков, которыми было сформировано плато Толмачев дол (Горяев, 1981; Braitseva et al., 1997; Дирксен и др., 2002).

Эруптивный центр Чаша расположен в средней части дола и состоит из двух кратеров. Диаметр главного кратера около 1,2 км, на его дне расположено озеро, глубина кратера до уровня озера колеблется от 160 до 220 м. Озеро имеет размеры 700 х 500 м (рис.4.1). Максимальная глубина достигает 45,8 м (данные автора).

85



Рисунок 4.1. Космоснимок озера Чаша. Линиями показаны данные батиметрии, точкой – место отбора керна.

4.2 Отбор образцов и пробоподготовка

В сентябре 2023 года с плавучей платформы с применением гравитационного пробоотборника было отобрано два керна длиной 780-900 мм. В процессе отбора и транспортировке особое внимание обращалось на сохранение от повреждений и перемешивания верхней части кернов. На рис.4.2 представлены фотографии верхних 170 мм двух кернов и оптических шлифов, приготовленных из твердых препаратов.



Рисунок 4.2. Фотографии верхних 170 мм вскрытых кернов донных осадков озера Чаша и оптических шлифов, приготовленных из твердых образцов, импрегнированных эпоксидной смолой.

Ненарушенные керны донных отложений герметично запечатывались и транспортировались в лабораторию. В лабораторных условиях керн вскрывался вдоль оси отбора, после чего фотографировался. Из половины каждого керна взяты пробы размерами 170х50х20 мм³ для изготовления твердых препаратов, пропитанных эпоксидной смолой по методике, описанной в (Дарьин и Ракшун, 2013). Из твердых препаратов изготовлены плоскопараллельные пластинки толщиной 2 мм для проведения µРФА-СИ исследований и оптические шлифы. Вторая половина керна нарезана с шагом 5 мм для изучения распределения активности ¹³⁷Сs и ²¹⁰Pb.

В данной работе особое внимание уделялось изучению темного слоя на глубине 50-60 мм (Слой I).

4.3 Извержение вулкана Ксудач 1907 года

Вулканический массив Ксудач представляет собой щитовидную полигенетическую постройку, сложенную лавами и тефрой многочисленных извержений разного возраста и морфологии. Подножие щита на западе, севере и юге находится на абсолютных отметках 150-200 м, на востоке, где высоко поднимаются плиоцен-раннеплейстоценовые породы фундамента, - 450-500 м. Из-за этой асимметричности относительная высота щита на востоке 500-550 м, а в других секторах - 650-700 м (Мелекесцев, 2007).

Массив представлен сложно построенным кальдерным комплексом из пяти наложенных одна на другую кальдер разного возраста и строения. Кальдера V охватывает активный стратовулкан, называемый конусом Штюбеля; его последнее извержение произошло в 1907 г. (Hulten, 1924; Vlodavets and Piip, 1957).

28-29 марта 1907 года произошло мощное эксплозивное извержение вулкана Ксудач, ставшее последним И единственным исторически зафиксированным проявлением активности молодого конуса Штюбеля, сформировавшегося около 1400 лет назад. Извержение началось с выброса черных шлаков андезитового и андезитобазальтового состава, мощность отложений которых достигала 0,5 м. Впоследствии шлаки сменились дацитовой пемзой. На склонах и у подножия конуса широко распространены смешанные пирокластические отложения, включая игнимбритовые фации. Основная часть нового лавового материала отложилась в районе между сопкой Ходутка и Ксудач, где стала причиной гибели обширных площадей березового леса. Отложения тефры прослеживаются на расстоянии более 200 км к северу от вулкана. Озеро Чаша, находящееся в 52 км севернее вулкана Ксудач, попадает в область выпадения продуктов извержения 1907 г. (рис.4.3). Извержение завершилось фреатическими взрывами, выбросившими на поверхность значительное количество резургентного материала,

включающего обломки кристаллических пород, таких как алливалиты и эвкриты.



Рисунок 4.3. Область распространения продуктов извержения вулкан Ксудач 1907 г. по данным (Захарихина, 2005).

Геологическим результатом извержения стало образование крупного кратера на конусе Штюбеля размером $1,0\times1,7$ км, а также формирование обширного покрова дацитовой пемзы мощностью до 4-5 м к северу от вулкана. Общий объем изверженного материала, по оценкам (Volynets et al., 1999), не превысил 2 км³. По своей силе и воздействию на окружающую среду это извержение сопоставимо с катастрофическими извержениями вулкана Безымянный в 1956 году и Шивелуч в 1964 году. В начальной фазе извержения вершина купола была разрушена взрывом, а ее обломки отнесены к северу.

Отложения KSht₃ соответствуют андезибазальтам и дацитам низкокалиевой серии. Характерно отсутствие роговой обманки (Базанова и др., 2005).

4.4 Методы исследования

Сканирующий µРФА-СИ

Измерения распределения элементного состава донного осадка оз. Чаша проводились в ЦКП "Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения" (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск) аналогично образцам других озер (рис.4.4) (Приложение 6).



Рисунок 4.4. Профили распределение содержаний ряда элементов в керне оз. Чаша. Серым выделены аномальные значения для слоя на глубине 50 мм.

Изотопные исследования

Для оценки скорости осадконакопления в верхних слоях, перекрывающих временной интервал последнего столетия, были проведены измерения распределения активности изотопов ¹³⁷Cs и ²¹⁰Pb. Результаты получено в Институте Геологии и Геофизики Китайской Академии Наук (Пекин, http://www.igg.cas.cn) с использованием германиевого детектора колодезного типа (EGPC 100P-15R) (Приложение 2).

Электронная микроскопия.

Полированные шлифы анализировали с применением электронного сканирующего микроскопа (СЭМ) MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding). В пределах Слоя I встречаются минералы магнетита, клинопироксена, плагиоклаза и калиевого полевого шпата (рис.4.5). Роговая обманка отсутствует.



Рисунок 4.5. Снимок фрагмента шлифа керна Chasha-23-С в электроном микроскопе. Pl – плагиоклаз, mt – магнетит, fsp - калиевый полевой шпат, cpx – клинопироксен.

4.5. Результаты

4.5.1 Оценка скорости современного осадконакопления.

Для оценки скорости осадконакопления верхних 60 мм керна использованы данные о распределении изотопов ¹³⁷Cs и ²¹⁰Pb по глубине керна Chasha-2023-C (рис.4.6) (Приложение 7).



Рисунок 4.6. Активность изотопов ²¹⁰Pb и ¹³⁷Cs по глубине керна Chasha-2023-C.

Максимум активности техногенного изотопа ¹³⁷Cs наблюдается в образцах 20-25 мм от границы вода-осадок и соответствует периоду 1962-1964 гг. (Appleby, 1997), что дает оценку линейной скорости осадконакопления в интервале 0.3-0.5 мм/год, при условии, что верх керна соответствует году отбора. Распределение активности изотопа ²¹⁰Pb позволяет качественно оценить скорость современного осадконакопления таким же интервалом (табл.4.1).

Таблица 4.1. Лине	ейная скорость	осадконакопления	мм/год в	интервале	0-50 мм	керна
Chasha-2023-С по д	цанным распред	целения ¹³⁷ Cs и ²¹⁰ Pb		-		-

1 1		
	¹³⁷ Cs	²¹⁰ Pb
Макс	0.42	0.57
Мин	0.33	0.21
Ср. значение	0.38	0.43
Стандартное	0.12	0.13
отклонение		
Стандартное	28.3	29.4
отклонение, %		

4.5.2 Сравнение данных µРФА-СИ с литературными

Для более точной оценки скорости попробуем идентифицировать маркирующий слой в интервале 50 - 60 мм, связав его с датированными историческими извержениями. Наиболее вероятно, что данные слой соответствует мощному эксплозивному извержению вулкана Ксудач, которое произошло 28-29 марта 1907 г. (Пийп, 1941). Для подтверждения датировки слоя 1 было проведено сравнение данных об его элементном составе с литературными данными о составе пеплов извержения вулкана Ксудач-1907 г. В статье (Portnyagin et al., 2020) представлена геохимическая база данных (TephraKam) по составам стекла в тефре и спекшихся туфах Камчатской вулканической дуги, в которой отображены данные об исследовании 11 образцов вулканического стекла из тефры KSht₃ (Ksudach caldera, Stübel Cone) извержения 1907 г.

Рассмотрение литературных данных и полученных нами методом µРФА-СИ при сканировании твердого образца позволило выделить ограниченное количество элементов доступных для сравнения.

На рис.4.7 представлены результаты сравнения данных об элементном составе слоя 1, выше- и нижележащих слоев и литературных данных о составе пеплов KSht₃. Полученные результаты не противоречат предположению о соответствии слоя 1 пеплу извержения вулкана Ксудач 1907 г.



Рисунок 4.7. Сравнение литературных данных химического состава стекла из тефры KSht3 и данных РФА для слоя 1907 г. (Слой I), а так же выше - (Выше I) и нижележащих (Ниже I).

4.5.3 Построение возрастной модели керна оз. Чаша (0-60 мм).

Таким образом, верх слоя 1 на глубине 50 мм датируется 1907 г., что позволяет более точно построить возрастную модель для исследуемого керна

на интервале последнего столетия (1910-2010 гг.) и аппроксимировать ее еще на несколько десятилетий, удалив из модели интервал слоя KSht3 (рис.4.8).



Рисунок 4.8. Возрастная модель глубина керна – возраст слоя для керна Chasha-2023-С по данным распределения активности изотопов ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb и идентификации слоя вулканического пепла KSht₃ 1907 г.

На возрастной модели видно, что положение слоя тефры на глубине 50 мм в рамках погрешности соответствует положению 1907 г., полученного по данным распределения активности изотопов ²¹⁰Pb и ¹³⁷Cs.

Выводы 4 главы

Наличие в керне донных осадков слоев тефры датированных исторических извержений позволяет строить более точные возрастные модели «глубина керна – возраст слоя осадка», что важно при поиске геохимических индикаторов климата и построении палеоклиматических реконструкций.

Исследования донных отложений озера Чаша позволило выявить слой тефры KSht₃, связанный с извержением вулкана Ксудач в 1907 году. Возраст слоя подтвердился данными распределения изотопов ¹³⁷Cs и ²¹⁰Pb и схожим химическим составом с известными образцами тефры KSht₃ из базы данных TephraKam (Portnyagin et al., 2020).

Применение метода сканирующего (µРФА-СИ) показало свою эффективность для идентификации слоев тефры в донных отложениях.

Однако, объективного сравнения для с литературными данными предпочтительно исследовать одинаковый материал – вулканические стекла. Использование методик µРФА-СИ для идентификации слоев тефры при анализе образцов донных осадков будет более эффективно при исследовании высоким пространственным разрешением (~10-15 мкм), что даст С возможность поиска внутри слоя отдельных микрочастиц вулканического стекла. В этом случае аналитические результаты будут характеризовать однотипный материал и позволят получать объективные сравнения с литературными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод сканирующего микро-РФА-СИ позволяет проводить детальные исследования элементного состава донных отложений озер с высоким пространственным разрешением. На основе полученных данных построены возрастные модели, что позволило проводить количественные сравнения состава осадка с данными инструментальных метеонаблюдений и последующее построение температурных реконструкций на всю глубину опробования керна.

В данной работе впервые представлена температурная реконструкция охватывающие интервал 1400 лет для Алтайского региона на основании изучения элементного состава донных отложений оз. Кучерлинское, тысячелетняя реконструкция для региона оз. Пеюнгда (Эвенкия, Тунгусский природный заповедник).

На основании данных сканирующего микро-РФА в донных осадках установлены следы, таких катастрофических событий, как Великое Монгольское землетрясение 1761 г. (оз. Кучерлинское), извержения вулкана Ксудач 1907 г. (оз. Чаша) и следы взрыва Тунгусского космического тела 1908 г. (оз. Пеюнгда).

Отдельно стоит отметить, что нет универсальных геохимических индикаторов, подходящих для каждого объекта изучения. Требуется систематическое исследование на разных уровнях: геологическое строение территории водосбора и его морфология, геохимия воды, осадка и продуктов сноса.

96

Список литературы

- 1. Агатова А.Р., Назаров А.Н., Непоп Р.К., Орлова Л.А. Радиоуглеродная хронология гляциальных и климатических событий голоцена юго-восточного Алтая (Центральная Азия) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 6. С. 712–737.
- Агатова А.Р., Назаров А.Н., Непоп Р.К., Роднайт Х. Голоценовые колебания ледников и климатические изменения в юго-восточной части русского Алтая на основе радиоуглеродной хронологии // Quaternary Science Reviews. 2012. Т. 43. С. 74–93.
- 3. Бабич В.В., Дарьин А.В., Рудая Н.А., Маркович Т.И. Обобщенная реконструкция температурного режима для Российского Алтая за последние 2000 лет (по озерным отложениям) // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 10. С. 1457–1468.
- Бабич В.В., Рудая Н.А., Калугин И.А., Дарьин А.В. Опыт комплексного использования геохимических особенностей донных отложений и палинологических записей для палеоклиматических реконструкций (на примере оз. Телецкое, Российский Алтай) // Сиб. экол. журн. 2015. Т. 22. № 4. С. 497–506.
- Базанова Л.И., Брайцева О.А., Дирксен О.В., Сулержицкий Л.Д., Данхара Т. Пеплопады крупнейших голоценовых извержений на траверсе Усть-Большерецк — Петропавловск-Камчатский: источники, хронология, частота // Вулканология и сейсмология. — 2005. — № 6. — С. 30–46.
- Безрукова Е. В., Абзаева А. А., Летунова П. П., Кострова С. С., Тарасов П. Е., Кулагина Н. В. Палинологическое исследование донных осадков озера Котокель (район озера Байкал) // Русская геология и геофизика. 2011. Т. 52(4). С. 458-465.
- Болиховская Н.С., Панин А.В. Динамика растительного покрова Терехольской котловины (Юго-Восточная Тува) во второй половине голоцена // Палинология: стратиграфия и геоэкология. СПб.: ВНИГРИ, 2008. Т. 2. С. 69—75.
- Варганов А. С., Попова Н. Н., Сосновская О. В., Смокотина И. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист Р-47 – Байкит. Объяснительная записка // СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2015. 359 с.
- Викс Э. Г., Байбородских К. П., Баулина Н. А. Геологический отчет по материалам бурения параметрических скважин среднего течения р. Подкаменной Тунгуски. (Отчет по теме: «Производственно-геологоразведочные работы по контролю за проводкой параметрических скважин и обработка материалов параметрического бурения») // Красноярск. 1976.
- Власов Б.П., Давыдова Н.Н., Дружинин Г.В., Прохоров А.Н., Федоренко И.А. Отбор образцов донных отложений // Общие закономерности возникновения и развития озер. Методы изучения истории озер. (Серия: История озер СССР). 1986. Л.: Наука. С. 73–84.
- 11. Волкова В.С. Стратиграфия и история развития растительности Западной Сибири в позднем кайнозое. М.: Наука. 1977. 240 с.
- 12. Геологическая карта N-57-XXXII (сопка Опала) / сост. ОАО «Камчатгеология»; ред. Горяев М.И. Масштаб 1:200000. Западно-Камчатская серия. 1981.
- 13. Геологическая карта: М-45 (Горно-Алтайск). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Третье поколение. Алтае-Саянская серия.

Геологическая карта. Масштаб: 1:1 000 000. Составлена: ОАО Горно-Алтайская экспедиция, ФГБУ «ВСЕГЕИ». 2006. Редактор(ы): Шокальский С.П.

- 14. Глухов Ю. С. Геологическое строение и полезные ископаемые междуречья Нижней Тунгуски и Чуни (Отчет Таймуринской опытно-производственной партии по групповой геологической съемке масштаба 1 : 200 000 на площади листов P-47-VII–XII, XIII–XVIII, P-48-VII–IX, P-48-XIII–XV за 1968–1973 гг.) // Красноярск. 1974.
- 15. Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 200 000. Серия Тунгусская. Листы Р-47-VII–XVIII. Объяснительная записка / Ю. С. Глухов и др. Ред. Д. И. Мусатов. // М.: Союзгеолфонд. 1987. 483 с.
- 16. Дарьин А. В., Рогозин Д. Я., Мейдус А. В., Бабич В. В., Калугин И. А., Маркович Т. И., Ракшун В., Дарьин Ф. А., Сороколетов Д. С., Гогин А. А., Сенин Р. А., Дегерменджи А. Г. Следы Тунгусского события 1908 г. в донных осадках озера Заповедное по данным сканирующего РФА-СИ // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 492 (2). С. 61–65.
- 17. Дарьин А.В., Александрин М.Ю., Калугин И.А., Соломина О.Н. Связь метеорологических данных с геохимическими характеристиками современных донных осадков оз. Донгуз-Орун, Кавказ // ДАН. 2015. Т. 463. № 5. С. 602.
- 18. Дарьин А.В., Ракшун Я.В., Скрипников А.Б., Салтыков И.Т., Фролов Н.П. Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2013. № 2. С. 112– 118.
- 19. Дарьин А.В., Чу Г., Санс Ц., Бабич В.В., Калугин И.А., Маркович Т.И., Новиков В.С., Максимов М.А., Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С., Ракшун Я.В., Гогин А.А., Сенин Р.А. Количественная реконструкция годовых температур воздуха Алтайского региона за последние 1400 лет по данным аналитической микростратиграфии ленточных глин оз. Кучерлинское // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85(1). С. 97-108.
- 20. Дирксен О.В., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Кратер Чаша (Южная Камчатка) уникальный пример массового выброса кислой пирокластики в поле базальтового ареального вулканизма // Вулканология и сейсмология. 2002. № 5. С. 3–10.
- 21. Калугин И.А., Дарьин А.В., Бабич В.В. 3000-летняя реконструкция среднегодовых температур Алтайского региона по литолого-геохимическим индикаторам донных осадков оз. Телецкое // Доклады Академии наук. 2009. Т. 426. № 4. С. 520-522.
- 22. Карпунин А.М., Мамонов С.В., Мироненко О.А., Соколов А.Р. Геологические памятники природы России. М.: Лориен. 1998. С. 146–150.
- 23. Ким С. Л., Шурлаков И. К., Порошина Г. А. Геологический отчет о результатах структурно-колонкового бурения на Тайгинской площади в 1968–1969 гг. // Красноярск. 1970.
- Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н., Прохоров А.Н., Кутовый Е.В. Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы // УФН. 1977. Т. 122. С. 369– 418.
- Лаврентьев Ю.Г., Карманов Н.С., Усова Л.В. Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий электронный микроскоп?
 // Геология и геофизика. 2015. Т. 56 (8). С. 1473—1482.Мелекесцев И.В.

Катастрофическому эксплозивному извержению 28 марта 1907 г. конуса Штюбеля (вулканический массив Ксудач) — 100 лет // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. — Петропавловск-Камчатский, 28–31 марта 2007 г. 2007. С. 3–8.

- 26. Назаров А.Н., Соломина О.Н., Мыглан В.С. Динамика верхней границы леса и ледников Центрального и Восточного Алтая в голоцене // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444. № 6. С. 671–675.
- 27. Нарожный Ю.К., Осипов А.В. Ороклиматические условия оледенения Центрального Алтая // Изв. РГО. 1999. Т. 131 (3). С. 49—57.
- 28. Ненашева Г.И. Растительность и климат голоцена межгорных котловин Центрального Алтая. Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та. 2013. 168 с.
- 29. Никонов А.А. Сильнейшие исторические землетрясения на Алтае и сейсмический потенциал региона // Природа. 2004. № 5. С. 41–47.
- 30. Новиков В.С., Дарьин А.В., Бабич В.В., Дарьин Ф.А., Рогозин Д.Ю. Геохимия донных отложений Озера Пеюнгда (Тунгусский природный заповедник) и палеоклиматические реконструкции приарктических территорий Восточной Сибири // Геохимия. 2024. Т. 69 (5). С. 468-476.
- 31. Пийп Б.И. О силе извержения вулкана Ксудач в марте 1907 г. // Бюллетень вулканологической станции на Камчатке. 1941. № 10. С. 23–29.
- 32. Раукас А.В. Классификация обломочных пород и отложений по гранулометрическому составу // Тр. Ин-та геол. АН Эстонской ССР. 1981. 24 с.
- 33. Ревякин В.С., Галахов В.П., Голещихин В.П. Горно-ледниковые бассейны Алтая. Томск: Изд-во Том. ун-та. 1979. 309 с.
- 34. Русанов В.И. Распределение среднего годового количества осадков в Центральном Алтае // Изв. ВГО. 1961. Т. 93(6). С. 272—283.
- 35. Русанов Г.Г., Деев Е.В., Зольников И.Д., Хазин Л.Б., Хазина И.В., Кузьмина О.Б. Опорный разрез неоген-четвертичных отложений в Уймонской впадине (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 8. С. 1220–1233.
- 36. Федак С.И., Туркин Ю.А., Гусев А.И., Шокальский С.П. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-45 – Горно-Алтайск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2011. С. 567.
- 37. Фролова Н.Л., Повалишникова Е.С., Ефимова Л.Е. Комплексные исследования водных объектов Горного Алтая (на примере бассейна р. Мульты) — 75 лет спустя // Изв. РАН. Сер. географическая. 2011. Т. 2. С. 113–126.
- Хилько С.Д., Курушин Р.А., Кочетков В.М. и др. Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии // Труды совместной советскомонгольской научно-исследовательской геологической экспедиции. Вып. 41. М. 1985.
- Alexandrin M.Y., Solomina O.N., Darin A.V. Variations of heat availability in the Western Caucasus in the past 1500 years inferred from a high-resolution record of bromine in the sediment of Lake Karakel // Quaternary International. 2023. V. 664. P. 20–32.
- 40. Ammann C., Joos F., Schimel D., Otto-Bliesner B., Tomas R. Solar Influence on Climate during the Past Millennium: Results from Transient Simulations with the NCAR Climate System Model // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2007. V. 104. P. 3713–3718.
- 41. Anderson R.Y., Dean W.E., Bradbury J.P., Love D. Meromictic Lakes and Varved Lake Sediments in North America. In: U.S. Geological Survey Bulletin 1607. 1985. P. 19.

- 42. Anspaugh L., Catlin R., Goldman M. The global impact of the Chernobyl reactor accident // Science. 1988. V. 242 (4885). P. 1513–1519.
- 43. Appleby P.G. Sediment records of fallout radionuclides and their application to studies of sediment-water interactions. Water, Air and Soil Pollution. 1997. V. 99. P. 573–586.
- 44. ArcGISTM Spatial Analyst: Advanced GIS Spatial Analysis Using Raster and Vector Data // ESRI White Paper. Redlands. 2001. P. 17.
- 45. Archaeological Results from Accelerator Dating. Edited by J.A.J. Gowlett, R.E.M. Hedges. 1986. Pp. 170, ill. Oxford: Oxford University Committee for Archaeology.
- 46. Bakke J., Dahl S.O., Paasche Ø., Simonsen J.R., Kvisvik B., Bakke K., Nesje A. A complete record of Holocene glacier variability at Austre Okstindbreen, northern Norway: an integrated approach // Quaternary Science Reviews. 2010. V. 29. N. 9-10. P. 1246–1262.
- 47. Bakke J., Paasche Ø. Sediment core and glacial environment reconstruction // Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. 2011. P. 979–984.
- 48. Banerji U., Goswami V., Joshi K. Quaternary dating and instrumental development: An overview // Journal of Asian Earth Sciences: X. 2022. V. 7. P. 23–30.
- 49. Barsanti M., Garcia-Tenorio R., Schirone A., Rozmaric M., Ruiz-Fernandez A., Sanchez-Cabeza A., Delbono I., Conte F., De Oliveira Godoy J., Heijnis H., Eriksson M., Hatje V., Laissaoui A., Nguyen H., Okuku E., Al-Rousan S., Uddin S., Yii M., Osvath I. Challenges and limitations of the 210Pb sediment dating method: Results from an IAEA modelling interlaboratory comparison exercise // Quaternary Geochronology. 2020. V. 59. P. 178–187.
- Baryshev V.B., Gavrilov N.G., Daryin A.V., Zolotarev K.V., Kulipanov G.N., Mezentsev N.A., Terekhov Ya.V. Scanning x-ray fluorescent microanalysis of rock samples // Rev. Sci. Instrum. 1989. V. 60 (7). P. 2456–2457.
- 51. Bertrand S., Tjallingii R., Kylander M., Wilhelm B., Roberts S., Arnaud F., Brown E., Bindler R. Inorganic geochemistry of lake sediments: A review of analytical techniques and guidelines for data interpretation // Earth-Science Reviews. 2024. V. 249. 104639.
- 52. Blaauw M., Christen, J. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process // Bayesian Analysis. 2011. V. 6. N. 3. P. 457–474.
- Blomqvist S. Quantitative sampling of soft-bottom sediments: problems and solutions // Marine Ecology Progress Series. 1991. V. 72. P. 295–304.
- 54. Boes X., Fagel N. Impregnation method for detecting annual laminations in sediment cores: An overview // Sedimentary Geology. 2005. V. 179. P. 185–195.
- 55. Boës X., Rydberg J., Martinez-Cortizas A., Bindler R., Renberg I. Evaluation of conservative lithogenic elements (Ti, Zr, Al, and Rb) to study anthropogenic element enrichments in lake sediments // Journal of Paleolimnology. 2011. V. 46. P. 75-87.
- Bradley R.S. Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary // Elsevier. 2014. 3rd Edition.
- 57. Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Melekestsev I.V., Bailey J. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // Quaternary Research. 1997. Vol. 4. P. 125–139.
- 58. Brinkhurst R.O., Chua K.E., Batoosingh E. Modifications in sampling procedures as applied to studies on the bacteria and tubificid oligochaetes inhabiting aquatic sediments // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1969. V. 26. P. 2581–2593.
- 59. Bronk Ramsey C., Staff R.A., Bryant C.L., Brock F., Kitagawa H., van der Plicht J., Schlolaut G., Marshall M.H., Brauer A., Lamb H.F., Payne R.L., Tarasov P.E., Haraguchi T., Gotanda K., Yonenobu H., Yokoyama Y., Tada R., Nakagawa T. A

complete terrestrial radiocarbon record for 11.2 to 52.8 kyr B.P. // Science. 2012. V. 338 (6105). P. 370–374.

- Büntgen U., Myglan V., Ljungqvist F., et al. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD // Nature Geoscience. 2016. V. 9. P. 231–236.
- 61. Calvert S. Origin of diatom-rich, varved sediments from the Gulf of California // Journal of Geological Research. 1966. V. 64. P. 546–565.
- 62. Christiansen B., Ljungqvist F. The extra-tropical Northern Hemisphere temperature in the last two millennia: Reconstructions of low-frequency variability // Climate Past. 2012. V. 8. № 2. P. 765–786.
- 63. Darin A. V., Goldberg E. L., Kalugin I. A., Phedorin M. A., Zolotarev K. V., Maksimova N. V. Ratio of elastically and nonelastically scattered intensities on the sample of synchrotron radiation climatic correlative paleosignal in historical layer (1860–1996) of bottom sediments of Lake Teletskoye // Poverkhn. Rentgen., Sinkhrotron. Neitron. Issled. 2003. V 12. P. 53–55.
- 64. Darin A. V., Rogozin D. Y., Novikov V. S., Meydus A. V., Babich V. V., Markovich T. I., Rakshun Ya. V., Darin F. A., Sorokoletov D. S., Degermendzhi A. G. Climatic Changes in the Arctic Regions of Eastern Siberia over the Last Millenium according to the Lithological–Geochemical Data on Bottom Sediments of Peyungda Lake (Krasnoyarsk Krai, Evenkia) // Dokl. Earth Sc. 2024. V. 514. P. 349–353.
- 65. Darin A.V., Kalugin I.A., Maksimova N.V., Smolyaninova L.G., Zolotarev K.V. Use of a scanning XRF analysis on SR beams from VEPP-3 storage ring for research of core bottom sediments from Teletskoe Lake with the purpose of high-resolution quantitative reconstruction of last millennium paleoclimate // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2005. V. 543. P. 255–258.
- 66. Daryin A.V., Baryshev V.B., Zolotarev K.V. Scanning X-ray fluorescence microanalysis of phosphorites from the underwater mountains of the Pacific // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 1991. V. 308. P. 318–320.
- 67. Davies B. Cryospheric Geomorphology: Dating Glacial Landforms I: Archival, Incremental, Relative Dating Techniques and Age-Equivalent Stratigraphic Markers. 2020.
- 68. Davis R.B., Doyle R.W. A piston corer for upper sediment in lakes // Limnology and Oceanography. 1969. V. 14. P. 643–648.
- 69. De Bock H.J. Paleoclimatological reconstruction of the Late Pleistocene in Southern Patagonia from a detailed analysis of the laminated sedimentary record of Laguna Parrillar. 2012.
- 70. De Geer G.A. Geochronology of the last 12000 years // 11th Congress Geologique Internationale, Comptes Rendues. 1912. P. 241–253.
- 71. Dolbnya P., Golubev A.V., Zolotarev K.V., Bobrov V.A., Kalugin I.A. Scanning synchrotron radiation X-ray fluorescence trace element analysis of microlayers of Fe– Mn nodules: new data on ore forming processes in the Ocean // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 1995. V. 359 (1-2). P. 327–330.
- 72. Esper J., Cook E. R., Schweingruber F. H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability // Science (New York, N.Y.). 2002. V. 295(5563). P. 2250–2253.
- 73. Fritz M., Unkel I., Lenz J., Gajewski K., Frenzel P., Paquette N., Lantuit H., Körte L., Wetterich S. Regional environmental change versus local signal preservation in

Holocene thermokarst lake sediments: A case study from Herschel Island, Yukon (Canada) // J. Paleolimnol. 2018. V. 60. P. 77–96.

- 74. Gilfedder B. S., Petri M., Wessels M., Biester H. Bromine species fluxes from Lake Constance's catchment, and a preliminary lake mass balance // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. V. 75(12). P. 3385-3401.
- 75. Glew J.R., Smol J.P., Last W.M. Sediment Core Collection and Extrusion // Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research. Dordrecht: Springer, 2001. V. 1. P. 73–105.
- 76. Glew J.R., Smol J.P., Last W.M. Sediment Core Collection and Extrusion // Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research. Dordrecht: Springer, 2001. V. 1. P. 73–105.
- 77. Goldberg E.L., Grachev M.A., Phedorin M.A., Kalugin I.A., Klystov O.M., Mezentsev S.N., Azarova I.N., Vorobyeva S.S., Zheleznyakova T.O., Kulipanov G.N., Kondratyev V.I., Miginsky E.G., Zukanov V.M., Zolotarev K.V., Trunova V.A., Kolmogorov Y.P., Bobrov V.A. Application of synchrotron X-ray fluorescent analysis to studies of the records of paleoclimates of Eurasia stored in the sediments of Lake Baikal and Lake Teletskoye // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2001. V. 470. P. 388.
- 78. Goslar T., Arnold M., Tisnerat-Laborde N., Hatte C., Paterne M., Ralska-Jasiewiczowa M. Radiocarbon calibration by means of varves versus 14C ages of terrestrial macrofossils from Lake Goscia, z and Lake Perespilno, Poland // Radiocarbon. 2000. V. 42 (3). P. 335–348.
- Guevara S., Rizzo A., Daga R., Williams N., Villa S. Bromine as an indicator of the source of lacustrine sedimentary organic matter in paleolimnological studies // Quaternary Research. 2019. V. 92.
- Hajdas I., Bonani G., Zolitschka B. Radiocarbon dating of varve chronologies: Soppensee and Holzmaar lakes after ten years // Radiocarbon. 2000. V. 42 (3). P. 349– 353.
- Hanhijärvi S., Tingley M. P., Korhola A. Pairwise comparisons to reconstruct mean temperature in the Arctic Atlantic Region over the last 2,000 years // Climate Dynamics. 2013. V. 41(7-8). P. 2039–2060.
- Harvey G.R. A Study of the Chemistry of Iodine and Bromine in Marine Sediments // Marine Chemistry. 1980. V. 8. P. 327-332.
- 83. Heier K.S., Billings G.K. Rubidium. In: Wedepohl K.H. (Ed.) Handbook of Geochemistry. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1970. Vol. II-4. P. 37D–37E.
- 84. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker и др. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
- Jin Z.D., Cao J., Wu J., Wang S. A Rb/Sr record of catchment weathering response to Holocene climate change in Inner Mongolia // Earth Surf. Proc. Landf. 2006. V. 31. P. 285–291.
- 86. Jones P. D., Briffa K. R., Osborn T. J., Lough J. M., Van Ommen T. D. High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: A review of current status and future prospects // Holocene. 2009. V. 19. P. 3-49.
- Jones R.L. Extractable Rubidium in Surface Horizons of Illinois Soils // Soil Science Society of America Journal. 1992. V. 56 (5). P. 1453–1454.
- Kajak Z., Kacprzak K., Polkowski R. Chwytacz rurowy do pobierania prób dna // Ekologia Polska Seria B. 1965. V. 11. P. 159–165.

- Karlen W. Lacustrine sediments and tree-limit variations as evidence of Holocene climatic fluctuations in Lappland, northern Sweden // Geografiska Annaler. 1976. V. 58A. P. 1–34.
- 90. Kemp A. Palaeoclimatology and Palaeoceanography from Laminated Sediments // Geological Society Special Publication. 1996. V. 116. P. 258.
- 91. Kitagawa H., Plicht J. A 40,000-year varve chronology from Lake Suigetsu, Japan: extension of the 14C calibration curve // Radiocarbon. 1998. V. 40 (1). P. 505–515.
- 92. Kitagawa H., van der Plicht J. A 40,000-year varve chronology from Lake Suigetsu, Japan: Extension of the C-14 calibration curve // Radiocarbon. 1998. V. 40 (1). P. 505– 515.
- 93. Klimenko V., Matskovsky V., Dahlmann D. Multi-archive temperature reconstruction of the Russian Arctic for the past two millennia // Geogr. Environ. Sustain. 2014. V. 7. № 1. P. 16–29.
- 94. Koinig K., Shotyk W., Lotter A., Ohlendorf C., Sturm M. 9000 Years of geochemical evolution of lithogenic major and trace elements in the sediment of an alpine lake - The role of climate, vegetation, and land-use history // Journal of Paleolimnology. 2003. V. 30. P. 307–320.
- 95. Koizumi A., Harada K.H., Niisoe T., Adachi A., Fujii Y., Hitomi T., Kobayashi H., Wada Y., Watanabe T., Ishikawa H. Preliminary assessment of ecological exposure of adult residents in Fukushima Prefecture to radioactive cesium through ingestion and inhalation // Environmental Health and Preventive Medicine. 2012. V. 17 (4). P. 292–298.
- 96. Kremer K., Stefanie B.W., Reusch A., Fäh D., Strasser M. Lake-sediment based paleoseismology: Limitations and perspectives from the Swiss Alps // Quaternary Science Reviews. 2017. 168. P. 1–18.
- 97. Krylov P. S., Nourgaliev D. K., Yasonov P. G. Seismic investigations of Lake Chebarkul in the process of searching Chelyabinsk meteorite // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. V. 10 (2). P. 744-746.
- 98. Kulbe T., Niederreiter R. Jr. Freeze coring of soft surface sediments at a water depth of several hundred meters // Journal of Paleolimnology. 2003. V. 29. P. 257–263.
- 99. Lamoureux S.F. Embedding unfrozen lake sediments for thin-section preparation // Journal of Paleolimnology. 1994. V. 10. P. 141–146.
- 100. Leri A., Myneni S. Natural Organobromine in Terrestrial Ecosystems // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2012. V. 77. P. 1-10.
- 101. Liu J.B., Chen J.H., Selvaraj K., Xu Q., Wang Z., Chen F. Chemical weathering over the last 1200 years recorded in the sediments of Gonghai Lake, Lvliang Mountains, North China: A high-resolution proxy of past climate // Boreas. 2014. V. 43. P. 914–923.
- 102. Liu L., Yu K., Li A., Zhang C., Wang L., Liu X., Lan J. Weathering intensity response to climate change on decadal scales: A record of Rb/Sr ratios from Chaonaqiu Lake sediments, Western Chinese Loess Plateau // Water. 2023. V. 15. P. 1890.
- 103. Livingstone D.A. A lightweight piston sampler for lake deposits // Ecology. 1955. V. 36 (1). P. 137–139.
- 104. Lotter A.F., Renberg I., Hansson H., Lindstrom E., et al. A remote controlled freeze corer for sampling unconsolidated surface sediments // Aquatic Sciences. 1997. V. 59 (4). P. 295–303.
- 105. Lowe D. J., Pearce N. J. G., Jorgensen M. A., Kuehn S. C., Tryon C. A., Hayward, C. L. Correlating tephras and cryptotephras using glass compositional analyses and numerical

and statistical methods: Review and evaluation // Quaternary Science Reviews. 2017. V. 175. P. 1–44.

- 106. Mackereth F.J.H. A short core sampler for subaqueous deposits // Limnology and Oceanography. 1969. V. 15. P. 145–151.
- 107. Minyuk P.S., Brigham-Grette J., Melles M., Borkhodoev V.Ya., Glushkova O.Yu. Inorganic geochemistry of El'gygytgyn Lake sediments (northeastern Russia) as an indicator of paleoclimatic change for the last 250 kyr // Journal of Paleolimnology. 2006. V. 37. P. 123–133.
- 108. Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., Karlén W. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data // Nature. 2005. V. 433. C. 613–617.
- 109. Myglan V.S., Oidupaa O.Ch., Vaganov E.A. A 2367-year tree-ring chronology for the Altai–Sayan region (Mongun-Taiga Mountain Massif) // Archaeol. Ethnol. Anthropol. Eurasia. 2012. V. 40 (3). P. 76–83.
- Nesje A. A piston corer for lacustrine and marine sediment // Arctic and Alpine Research. 1992. V. 24. N. 3. P. 257–259.
- 111. Ojala A.E.K., Francus P., Zolitschka B., Besonen M., Lamoureux S.F. Characteristics of sedimentary varve chronologies—A review // Quaternary Science Reviews. 2012. V. 43. P. 45–60.
- 112. Ojala A.E.K., Tiljander M. Testing the fidelity of sediment chronology: comparison of varve and paleomagnetic results from Holocene lake sediments from central Finland // Quaternary Science Reviews. 2003. V. 22 (15-17). P. 1787–1803.
- 113. Olausson E., Olsson I.U. Varve stratigraphy in a core from the Gulf of Aden // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 1969. V. 6. P. 87–193.
- 114. O'Sullivan P. Annually laminated lake sediments and the study of Quaternary environmental changes review // Quaternary Science Reviews. 1983. V. 1 (4). P. 245– 313.
- 115. Perelman F.M. Rubidium and cesium. New York: MacMillan, 1965.
- 116. Perfiliev B. Zur Mikrobiologie der Bodenablagerungen // Verhandlungen der Internationalen Vereinigung f
 ür Theoretische und Angewandte Limnologie. 1929. Bd. 4. S. 107–126.
- 117. Ponomareva, V., Portnyagin, M., and Davies, S. Tephra without borders: Far-reaching clues into past explosive eruptions // Front. Earth Sci. 2015. V. 3 (83). P. 1–16.
- 118. Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A., Bazanova L.I., Pevzner M.M., Plechova A.A. et al. TephraKam: Geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // Earth System Science Data. 2020. V. 12 (1). P. 469–486.
- 119. R Development Core Team. R A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2005.
- 120. Regnéll C., Mangerud J., Svendsen J. Tracing the last remnants of the Scandinavian Ice Sheet: Ice-dammed lakes and a catastrophic outburst flood in northern Sweden // Quaternary Science Reviews. 2019. V. 221.
- 121. Renberg I. Improved methods for sampling, photographing and varve-counting of varved lake sediments // Boreas. 1981. V. 10. P. 255–258.
- Renberg I. The HON-Kajak sediment corer // Journal of Paleolimnology. 1991. V. 6 (2).
 P. 167–170.
- 123. Renberg I., Hansson H. A pump freeze corer for recent sediments // Limnology and Oceanography. 1993. V. 38 (6). P. 1317–1321.

- 124. Renberg I., Hansson H. Freeze corer No. 3 for lake sediments // Journal of Paleolimnology. 2010. V. 44 (2). P. 731–736.
- 125. Robbins J., Edgington D. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137 // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1975. V. 39 (3). P. 285– 304.
- 126. Saarnisto M. Annually laminated lake sediments. In: Berglund B.E. (Ed.) *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester. 1986. P. 343–370.
- 127. Saarnisto M. Studies of annually laminated lake sediments. In: Berglund B.E. (Ed.) Project Guide, IGCP Project 158 B // Lake and Mire Environments. 1979. V. 2. P. 61– 80.
- 128. Sabatier P., S. C., Roche D., Bouchard É., Vuillemot J., Lemaire M., De Bock H.J. A Review of Event Deposits in Lake Sediments // Quaternary. 2022. V. 5 (3).
- 129. Schlolaut G., Staff R.A., Brauer A., Lamb H.F., Marshall M.H. An extended and revised Lake Suigetsu varve chronology from ~50 to ~10 ka BP based on detailed sediment micro-facies analyses // Quaternary Science Reviews. 2018. V. 200. P. 351–366.
- 130. Schulz H., Rad U., Stackelberg U. Laminated sediments from the oxygen-minimum zone of the northeastern Arabian Sea // Palaeoclimatology and Palaeoceanography from Laminated Sediments. Ed. A.E.S. Kemp. Geological Society Special Publication. 1996. V. 116. P. 185–208.
- 131. Screen J., Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification // Nature. 2010. V. 464. P. 1334–1337.
- Seibold E. Jahreslagen in Sedimenten der mittleren // Geologische Rundschau. 1958. Bd. 47 (1). S. 100–117.
- 133. Semenov V. A. Modern Arctic Climate Research: Progress, Change of Concepts, and Urgent Problems // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2021. V. 57. P. 18–28.
- 134. Serreze M. C., Barry R. G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // Global and Planetary Change. 2011. V. 77(1-2). P. 85-96.
- 135. Shanmugam G. Slides, slumps, debris flows, turbidity currents, hyperpycnal flows, and bottom currents // Encyclopedia of Ocean Sciences (Third Edition). 2019. V. 4. P. 228– 257. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10884-X.
- 136. Shi F. Multiproxy surface air temperature field reconstruction for the Arctic covering the past millennium // Quaternary International. 2012. V. 54. P. 446-450.
- 137. Shichi K., Takahara H., Krivonogov S., Bezrukova E., Kashiwaya K., Takehara A., Nakamura T. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate records from Lake Kotokel, central Baikal region // Quaternary International. 2009. V. 205. P. 98-110.
- 138. Sirito de Vives A.E., Boscolo Brienza S.M., Moreira S., Araújo Domingues Zucchi O.L., Barroso R.C., Nascimento Filho V.F. Evaluation of the availability of heavy metals in lake sediments using SR-TXRF // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2007. V. 579. P. 503–506.
- 139. Strong W.L., Cordes L.D. A coring method for lake surface sediments // Canadian Journal of Earth Sciences. 1976. V. 13 (9). P. 1331–1333.
- 140. Takahara H., Shinya S., Harrison S., Miyoshi N., Morita Y., Uchiyama T. Pollen-based reconstructions of Japanese biomes at 0,6000 and 18,000 14C yr BP // Journal of Biogeography. 2000. V. 27. P. 665-683.
- 141. Tiljander M., Ojala A.E., Saarinen T., Snowball I. Documentation of the physical properties of annually laminated (varved) sediments at a sub-annual to decadal resolution for environmental interpretation // Quaternary International. 2002. V. 88. P. 5–12.

- 142. Vekemans X., Slatkin M. Gene and allelic genealogies at a gametophytic selfincompatibility locus // Genetics. 1994. V. 137. P. 1157–1165.
- 143. Volynets O.N., Ponomareva V.V., Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Chen Ch.H. Holocene eruptive history of Ksudach volcanic massif, South Kamchatka: evolution of a large magmatic chamber // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1999. V. 91. P. 23–42.
- 144. Whittaker E. Bottom deposits of McKay Lake, Ottawa // Proceedings and Transactions of the Royal Society of Canada. 1922. V. 16. P. 141–156.
- 145. Wilhelm B., Rapuc W., Amann B., Anselmetti F.S., Arnaud F., Blanchet J., Brauer A., Czymzik M., Giguet-Covex C., Gilli A., Glur L., Grosjean M., Irmler R., Nicolle M., Sabatier P., Swierczynski T., Wirth S.B. Impact of warmer climate periods on flood hazard in the European Alps // Nature Geoscience. 2022. V. 15. P. 118–123.
- 146. Wohlfarth B., Bjorck S., Possnert G. The Swedish time scale: a potential calibration tool for the radiocarbon time scale during the Late Weichselian // Radiocarbon. 1995. V. 37 (2). P. 347–359.
- UNSCEAR: Effects of Ionizing Radiation // United Nations, New York. 2000. P. 453-487.
- 148. Wright H.E. A square-rod piston sampler for lake sediments // Journal of Sedimentary Research. 1967. V. 37 (3). P. 975–976.
- 149. Wright H.E. Cores of soft lake sediments // Boreas. 1980. V. 9. P. 107–114.
- 150. Wu Y.H., Lücke A., Jin Z.D., Wang S.M., Schleser G.H., Battarbee R.W., Xia W.L. Holocene climate development on the central Tibetan Plateau: A sedimentary record from Cuoe Lake // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 2006. V. 234. P. 328–340.
- 151. Xu H., Liu B., Wu F. Spatial and temporal variations of Rb/Sr ratios of the bulk surface sediments in Lake Qinghai // Geochemical Transactions. 2010. V. 11. P. 3.
- 152. Yang B., Johnson K., Shi Y. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia // Geophysical Research Letters. 2002. V. 29.
- 153. Yang Y., Ran M., Sun A. Pollen-recorded bioclimatic variations of the last ~2000 years retrieved from Bayan Nuur in the western Mongolian Plateau // Boreas. 2020. V. 49 (2). P. 350—362.
- 154. Zeng Y., Chen J.A., Xiao J.L., Qi L. Non-residual Sr of the sediments in Daihai Lake as a good indicator of chemical weathering // Quat. Res. 2013. V. 79. P. 284–291.
- 155. Zi-Chen L. I., Wen-Bin S. U. N., LIANG C. X., Xu-Huang X. I. N. G., Qing-Xiang L. I. Arctic warming trends and their uncertainties based on surface temperature reconstruction under different sea ice extent scenarios // Advances in Climate Change Research. 2023. V. 14 (3). P. 335-346.
- 156. Zolitschka B. Varved lake sediments. In: Elias S.A. (Ed.) Encyclopedia of Quaternary Science. Elsevier, Amsterdam. 2007. P. 3105–3114.
- 157. Zolitschka B., Francus P., Ojala A.E., Schimmelmann A. Varves in lake sediments // Quaternary Science Reviews. 2015. V. 117. P. 1–41.
- 158. Zolotarev K.V., Goldberg E.L., Kondratyev V.I. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2001. V. 470 (1–2). P. 376–379.

Диапазон				Диапазон			
August	концен	траций,	Относительная погрешность,	Аналит	концентраций,		Относительная
Аналит	р	om			ppm		
	От	До	70		От	До	70
Р	1000	10000	10		0,1	1	30
S	1000	10000	10	Y	1	10	15
K	100	10000	10		10	100	5
Ca	100	10000	10		0,1	1	30
Ti	100	10000	10	Zr	1	10	15
Mn	100	10000	10		10	100	5
Fe	100	10000	10	Nh	0,1	1	30
X 7	1	10	30	IND	1	10	15
v	10	100	15	Mo	0,1	1	30
C	1	10	30	MO	1	10	15
Cr	10	100	15	Ag	0,1	1	30
Со	10	100	20	Ci	0,1	1	30
Ni	1	10	30	Ca	1	10	15
	10	100	15	In	0,1	1	30
Cu	0,5	5	30	C	0,1	1	30
	5	10	20	Sn	1	10	15
	10	100	10	Sh	0,1	1	30
Zn	0,5	5	30	50	1	10	15
	5	10	20	Te	0,1	1	30
	10	100	10	т	0,1	1	30
0	0,1	1	30	1	1	10	15
Ga	1	10	20	Cs	0,1	1	30
Ge	0,1	1	30		0,5	5	30
As	0,1	1	30	Ba	5	10	20
	1	10	20		10	100	10
Se	0,1	1	30		0,5	5	30
Br	0,1	1	30	La	5	10	20
	1	10	20		10	100	10
Rb	0,1	1	30		0,5	5	30
	1	10	15	Ce	5	10	20
	10	100	5		10	100	10
Sr	0,1	1	30	Pb	0,5	10	30
	1	10	15	Th	0,5	10	30
	10	100	5	U	0,5	10	30

Приложение 1. Пределы допускаемой погрешности измерений методом µРФА-СИ
Приложение 2. Параметры распределения естественных (²¹⁰Pb) и искусственных (¹³⁷Cs) радионуклидов (Бк/кг) в донных отложениях оз. Нижнее Мультинское (MN-02) и оз. Кучерлинское (Kuch-18-2).

№ образца	Глубина, мм	²¹⁰ Pb(Бк/кг)	¹³⁷ Cs(Бк/кг)
MN-02-0-1	0-10	1818	216
MN-02-1-2	10-20	1268	290
MN-02-2-3	20-30	690	260
MN-02-3-4	30-40	280	99
MN-02-6-7	60-70	74	3,9
MN-02-9-10	90-100	71	0,5

№ образца	Глубина, см	²¹⁰ Pb(Бк/кг)	¹³⁷ Cs(Бк/кг)
Kuch-18-2-1	0-1	124	17
Kuch-18-2-2	1-2	157	14
Kuch-18-2-3	2-3	114	13
Kuch-18-2-4	3-4	125	15
Kuch-18-2-5	5-6	108	14
Kuch-18-2-6	7-8	95	16
Kuch-18-2-7	9-10	80	15
Kuch-18-2-8	11-12	76	28
Kuch-18-2-9	13-14	83	36
Kuch-18-2-10	14-15	75	47
Kuch-18-2-11	15-16	71	57
Kuch-18-2-12	16-17	65	86
Kuch-18-2-13	17-18	50	65
Kuch-18-2-14	18-19	67	33
Kuch-18-2-15	19-20	51	11

Приложение 3. Содержания элементов (ppm) для верхних 77 мм керна Kuch-2018-2.

Глубина, мм	Ti	Ni	Sr	Y	Nb	Mo
0,0	1181,9	18,6	68,8	10,4	4,1	0,4
1,1	1164,3	10,1	63,0	10,0	3,6	0,5
2,1	1073,4	10,2	64,1	10,1	4,1	0,4
3,1	1059,7	13,9	60,0	10,6	3,7	0,2
4,2	1182,3	13,4	55,7	9,8	3,9	0,4
5,2	977,2	5,7	59,4	8,9	3,6	0,2
6,3	1047,9	7,6	56,5	9,9	3,8	0,2
7,3	1060,9	6,7	59,2	9,0	3,1	0,2
8,4	1088,6	8,9	58,6	8,6	3,8	0,2
9,4	1045,6	14,4	58,2	8,9	3,5	0,2
10,5	1004,0	7,3	57,1	8,8	3,7	0,2
11,5	1012,6	13,4	54,0	9,6	3,2	0,3
12,5	904,7	5,8	57,9	10,2	3,3	0,6
13,6	1000,7	8,6	58,6	9,1	3,7	0,6
14,6	1044,8	13,8	55,0	9,7	3,1	0,2
15,7	1055,7	13,6	57,5	9,1	3,7	0,2

Глубина, мм	Ti	Ni	Sr	Y	Nb	Mo
16,7	1008,9	11,1	54,1	8,6	3,7	0,3
17,8	1073,0	16,1	55,4	9,1	3,3	0,2
18,8	960,7	11,2	56,3	8,7	3,8	0,4
19,9	842,0	8,7	57,2	9,0	3,1	0,3
20,9	1017,6	10,7	57,7	8,7	3,4	0,4
22,0	840,9	10,6	59,2	9,1	3,7	0,5
23,0	1029,7	8,2	56,4	8,8	3,7	0,4
24,0	1006,8	10,2	49,7	8,9	3,4	0,3
25,1	982,3	9,9	55,8	9,0	3,6	0,2
26,1	1050,1	10,1	54,9	8,8	4,1	0,2
27,2	913,5	14,9	55,2	8,9	3,9	0,3
28,2	1032,6	9,3	57,6	8,6	3,6	0,2
29,3	1014,2	11,7	55,4	9,6	3,0	0,3
30,3	973,2	8,5	59,3	8,9	3,6	0,3
31,4	953,0	7,7	54,9	8,7	3,2	0,2
32,4	968,0	16,2	55,3	8,5	3,2	0,3
33,4	949,0	14,9	55,1	8,5	3,4	0,2
34,5	936,9	7,4	57,1	9,0	3,4	0,3
35,5	843,7	6,6	59,4	9,2	3,0	0,2
36,6	1036,9	12,5	56,4	9,6	3,2	0,2
37,6	991,7	6,5	55,9	8,9	3,7	0,2
38,7	985,3	6,8	56,3	8,8	3,9	0,5
39,7	934,9	12,7	58,8	9,7	3,6	0,2
40,8	985,4	6,6	55,2	8,9	2,9	0,4
41,8	1041,8	10,3	54,9	9,1	3,2	0,4
42,9	925,0	5,1	61,2	9,3	3,1	0,2
43,9	1101,4	10,1	59,8	9,9	3,3	0,2
44,9	925,7	11,4	58,1	9,2	3,2	0,2
46,0	904,8	9,5	59,4	9,3	3,4	0,3
47,0	1050,7	13,1	57,8	9,4	3,8	0,2
48,1	980,9	14,3	58,8	10,3	3,3	0,2
49,1	1057,4	10,3	58,3	9,6	3,7	0,4
50,2	1090,0	6,9	60,2	9,5	3,7	0,2
51,2	1045,8	8,8	60,6	9,4	3,9	0,3
52,3	1086,6	10,3	60,4	10,3	3,5	0,4
53,3	1124,0	14,2	55,9	8,2	3,5	0,4
54,3	1169,1	14,7	64,9	9,6	3,3	0,3
55,4	1066,4	10,1	61,9	9,9	3,9	0,2
56,4	1181,8	11,0	60,1	9,5	3,4	0,3
57,5	1186,9	12,8	61,2	9,5	3,8	0,3
58,5	1169,9	18,0	57,9	9,8	3,6	0,5
59,6	1079,2	11,0	63,9	9,6	3,9	0,5
60,6	1195,6	6,9	65,7	10,2	3,9	0,2
61,7	1073,9	8,4	67,8	10,8	3,9	0,2
62,7	1244,4	13,7	64,0	10,3	3,6	0,2
63,8	1126,9	13,0	60,5	9,0	3,9	0,2
64,8	1144,2	13,5	64,7	9,6	3,7	0,2

Глубина, мм	Ti	Ni	Sr	Y	Nb	Mo
65,8	1028,6	13,0	60,9	9,6	4,0	0,4
66,9	1050,8	10,5	59,1	9,8	3,3	0,5
67,9	1196,3	11,8	59,7	10,0	3,7	0,4
69,0	1136,6	12,0	62,7	9,7	3,6	0,3
70,0	991,3	13,3	55,5	8,9	3,3	0,4
71,1	1164,3	4,8	57,6	8,6	3,4	0,2
72,1	1113,2	14,6	63,2	9,8	4,2	0,3
73,2	1054,2	9,8	62,2	9,0	3,6	0,2
74,2	1201,0	9,0	64,5	10,0	3,6	0,5
75,2	1095,7	20,1	56,7	8,8	3,2	0,5
76,3	968,3	9,2	60,6	9,0	2,8	0,5
77,3	1122,4	9,9	60,0	9,3	3,8	0,2

Приложение 4. Набор данных среднегодовых температуры.

1		1 ' '		1 71
Год	KMNI	Ванавара	Усть-Кокса	Кара-Тюрек
2017				-3,68
2016				-4,52
2015	3,42			-4,37
2014	1,75			-5,62
2013	2,02			-4,55
2012	0,76			-5,06
2011	2,65			-4,58
2010	-0,25			-5,83
2009	-0,16			-4,79
2008	2,11		0,47	-4,37
2007	2,96		0,83	-3,88
2006	0,17		1,10	-4,98
2005	1,91		-0,57	-5,08
2004	1,30		-0,07	-4,57
2003	2,31		-0,03	-5,35
2002	2,10		1,58	-4,38
2001	1,20		0,20	-4,88
2000	-0,16		0,08	-5,46
1999	0,80		0,43	-4,68
1998	0,63		1,12	-4,38
1997	2,00		1,52	-3,38
1996	0,40		-1,13	-6,26
1995	2,89		0,43	-4,62
1994	0,77		0,62	-5,37
1993	2,47		-1,03	-5,98
1992	1,70		0,03	-5,08
1991	0,88		0,68	-5,26
1990	2,00	-4,30	0,70	-4,25
1989	1,63	-3,83	-5,22	-4,43
1988	1,27	-4,80	0,49	-5,33
1987	-0,88	-4,30	-0,40	-6,13
1986	1,54	-4,30	-0,83	-6,34

Год	KMNI	Ванавара	Усть-Кокса	Кара-Тюрек
1985	-0,31	-5,40	-1,40	-7,64
1984	-0,28	-6,30	-2,80	-7,53
1983	2,07	-5,30	-0,24	-5,39
1982	0,54	-2,23	1,37	-4,72
1981	1,26	-2,00	-6,31	-5,09
1980	-0,05	-4,17	-1,05	-5,10
1979	-0,57	-4,57	-0,38	-5,53
1978	1,32	-4,20	0,38	-4,93
1977	-0,66	-3,13	-0,30	-5,26
1976	-0,49	-3,23	-1,89	-6,46
1975	1,73	-3,17	-0,88	-6,04
1974	-1,90	-4,00	-0,78	-6,23
1973	1,45	-4,27	0,00	-5,67
1972	-0,63	-3,90	-0,67	-6,57
1971	0,86	-2,80	-1,13	-5,58
1970	-0,24	-4,03	-1,41	-6,65
1969	-1,62	-3,00	-2,94	-7,38
1968	-0,41	-3,17	-0,82	-6,41
1967	1,55	-4,67	-2,36	-5,07
1966	-1,81	-5,83	-1,18	-6,29
1965	-0,49	-7,70	0,33	-4,76
1964	0,06	-6,00	-0,71	-6,08
1963	1,49	-6,07	-0,35	-4,52
1962	1,37	-4,00	-0,08	-4,77
1961	0,11	-3,43	-1,47	-5,73
1960	-0,64	-3,67	-1,92	-6,91
1959	0,72	-5,57	-1,71	-6,03
1958	-0,14	-5,70	-1,88	-6,25
1957	-0,31	-5,60	-0,98	-6,41
1956	-0,39	-4,47	-2,61	-5,82
1955	-0,06	-4,60	-0,53	-5,36
1954	-0,19	-3,10	-2,83	-7,20
1953	1,31	-4,00	-0,38	-5,10
1952	-1,55	-3,73	-2,62	-6,58
1951	0,17	-5,20	-0,83	-5,76
1950	-0,05	-2,93	-2,30	-6,20
1949	0,78	-1,43	-1,39	-6,29
1948	1,75	-0,13	-1,03	-5,88
1947	-0,71	-0,80	1,67	-6,00
1946	-0,29	-0,97	1,57	-6,52
1945	0,60	-1,37	-1,23	-5,23
1944	0,95	-0,43	-2,34	-6,02
1943	1,66	-1,60	-1,73	-5,86
1942	0,10	-3,00	-1,54	-5,84
1941	-0,56	-3,73	-0,46	-5,12

Глубина, мм	Co/Inc	Br	Rb
0,0	0,2	11,0	3,9
1,1	0,2	12,8	4,2
2,2	0,2	9,7	5,6
3,3	0,2	10,8	3,8
4,5	0,2	9,3	3,1
5,6	0,2	10,3	3,6
6,7	0,2	9,2	9,8
7,8	0,2	11,2	4,5
8,9	0,2	12,6	4,6
10,0	0,2	12,4	4,0
11,1	0,2	9,9	4,3
12,3	0,2	10,8	3,6
13,4	0,2	14,7	4,2
14,5	0,2	12,4	5,3
15,6	0,2	11,8	6,2
16,7	0,2	11,3	5,4
17,8	0,2	10,8	5,3
18,9	0,2	11,8	4,1
20,1	0,2	10,1	4,4
21,2	0,2	11,8	4,6
22,3	0,2	11,1	5,3
23,4	0,2	9,4	5,9
24,5	0,2	8,6	7,3
25,6	0,2	9,3	6,2
26,7	0,2	7,5	8,0
27,9	0,2	7,1	5,9
29,0	0,2	9,3	4,3
30,1	0,2	8,7	2,5
31,2	0,2	9,9	5,2
32,3	0,2	9,4	7,4
33,4	0,2	9,8	9,5
34,5	0,2	12,2	6,2
35,7	0,2	10,6	4,6
36,8	0,2	9,5	5,7
37,9	0,2	9,0	6,4
39,0	0,2	10,4	6,4
40,1	0,2	10,4	7,8
41,2	0,2	12,2	5,7
42,3	0,2	10,8	7,7
43,5	0,2	12,4	3,7
44,6	0,2	12,1	4,5
45,7	0,2	11,2	4,8

Приложение 5. Содержания элементов (ppm) для верхних 70 мм керна Реу-22-3.

Глубина, мм	Co/Inc	Br	Rb
46,8	0,2	9,4	5,1
47,9	0,2	8,3	7,8
49,0	0,2	9,0	8,7
50,1	0,2	8,7	8,8
51,3	0,2	9,9	6,5
52,4	0,2	9,7	5,3
53,5	0,2	10,6	5,8
54,6	0,2	9,0	4,0
55,7	0,2	10,1	4,0
56,8	0,2	12,3	4,7
57,9	0,2	10,0	2,4
59,1	0,2	8,8	2,5
60,2	0,2	10,8	3,2
61,3	0,2	9,8	4,1
62,4	0,2	11,2	4,8
63,5	0,2	9,9	3,5
64,6	0,2	10,8	3,6
65,7	0,2	10,6	3,7
66,9	0,2	8,9	5,0
68,0	0,2	9,7	4,4
69,1	0,2	10,0	3,2
70,2	0,2	10,3	5,0

Приложение 6. Содержания элементов (ppm) для верхних 60 мм керна Chasha-23-А.

Глубина, мм	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	As	Br	Rb	Sr	Y	Zr
0,0	600,7	985,6	158,7	97,8	5346,4	8,6	2,1	9,0	4,7	23,4	3,8	15,6
1,0	447,0	1754,0	230,1	129,2	7106,1	14,6	4,9	7,7	6,7	36,7	4,7	32,3
1,9	714,5	1348,3	268,5	166,4	7800,1	18,7	2,1	8,3	9,7	40,2	5,5	25,3
2,9	728,1	1650,7	331,7	192,7	5703,4	17,8	7,8	11,0	7,6	32,9	5,2	22,1
3,9	1050,5	1112,5	257,6	154,9	5242,3	13,3	3,4	7,1	8,2	36,7	5,4	24,8
4,9	915,6	985,4	119,2	109,6	4623,7	8,8	2,6	4,7	5,0	24,0	3,1	14,4
5,8	630,1	1821,7	182,3	142,3	6731,2	12,7	4,2	3,4	11,9	62,1	7,6	37,9
6,8	300,0	463,4	75,9	49,0	2367,1	8,2	3,8	3,3	4,4	27,8	1,8	13,3
7,8	326,1	268,1	75,0	45,6	2395,0	8,1	1,0	6,5	6,0	33,9	3,0	16,6
8,7	510,1	636,3	123,2	41,1	2182,9	11,4	1,0	7,7	3,4	23,8	1,4	11,2
9,7	352,0	552,5	88,5	29,7	1953,9	6,1	1,0	6,3	3,2	21,2	2,0	9,9
10,7	300,0	233,6	75,0	15,0	1127,2	5,5	1,6	3,4	2,8	25,6	1,4	8,8
11,6	716,8	3409,0	506,6	166,2	8376,0	10,6	6,6	4,3	5,4	74,1	4,2	17,7
12,6	613,0	962,0	240,7	63,3	3003,8	9,9	4,0	10,6	6,3	37,0	2,9	17,8
13,6	617,1	968,6	130,9	51,1	2571,0	10,1	2,9	6,3	6,2	37,2	2,5	17,9
14,6	314,2	780,7	152,1	53,1	2500,2	8,8	3,1	7,1	4,2	26,3	2,2	11,4
15,5	300,0	962,1	92,4	67,9	2904,2	8,3	2,1	6,3	4,9	31,4	2,5	14,9
16,5	376,3	344,5	75,0	34,2	2144,1	6,6	3,7	5,6	2,8	15,1	1,8	7,6
17,5	535,7	764,3	187,4	60,9	3015,9	8,9	1,2	10,2	4,5	29,4	2,8	15,9

$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Глубина, мм	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	As	Br	Rb	Sr	Y	Zr
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	18,4	309,9	999,7	97,3	84,6	3193,0	7,2	1,9	7,5	4,9	30,1	2,3	13,7
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	19,4	311,5	760,5	106,0	41,2	3251,5	9,7	1,0	7,4	5,4	31,3	2,9	13,9
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	20,4	653,3	999,0	181,5	44,1	3698,5	12,3	3,4	7,1	6,3	37,9	2,7	17,4
22,3 601,7 1825,7 196,6 78,9 4605,8 17,6 3.0 6.6 6.4 42,0 3.8 20,5 23,3 442,2 1323,7 277,8 107,9 4746,7 18,6 10. 6.3 7,1 47,0 47,2 12 24,3 1847,5 5347,8 12,5 145,6 6084,6 13,1 1,1 1,4 14,1 4,6 9,5 6,5 41,7 25,2 1652,6 4690,9 432,6 168,5 6738,9 17,1 1,0 2,8 18,9 44,0 7,1 2,8 1,0 6,5 1,0 9,9 4,4 17,1 28,1 491,4 1428,2 124,4 83,9 4570,6 1,2,4 0,5 5,9 3,6,4 3,1 1,7,0 3,5,3 3,9 2,9 16,8 31,0 637,9 1228,1 17,6,3 845,2 3845,6 8,5 1,0 5,3 3,6,4 3,1 1,0 2,0 3,4 3,1 1,0 2,0 3,4 3,1 1,0 2,0	21,3	646,6	1541,0	361,1	93,8	3845,2	13,0	1,0	7,6	5,1	34,6	2,7	18,1
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	22,3	601,7	1825,7	196,6	78,9	4605,8	17,6	3,0	6,6	6,6	42,0	3,8	20,5
24.3 1847.5 3487.8 521.5 145.6 6084.6 13.1 4.1 14.6 95.5 6,5 41,7 25.2 1652.6 4690.9 432.6 168.5 6738.9 17.1 1.0 2.8 19.8 118.9 7.4 58.6 26.2 1376.5 1675.4 207.4 120.5 537.9 12.1 4.2 4.3 12.9 81.9 6.0 37.1 27.2 677.2 1657.9 297.8 83.3 4417.4 9.0 4.0 7.6 5.5 40.9 3.6. 3.1 17.2 29.1 630.9 1292.6 243.8 88.5 3931.6 11.0 1.8 7.2 5.7 33.9 2.9 16.8 31.0 637.9 1228.1 176.3 86.2 3845.6 9.7 1.7 6.3 5.3 3.6.4 3.6 18.2 32.0 514.3 1422.2 227.0 89.4 4885.6 9.7 1.7 6.3 5.3 3.8 2.6 15.5 34.0 901.6 <td< td=""><td>23,3</td><td>442,2</td><td>1323,7</td><td>277,8</td><td>107,9</td><td>4746,7</td><td>18,6</td><td>1,0</td><td>6,3</td><td>7,1</td><td>47,0</td><td>4,7</td><td>21,2</td></td<>	23,3	442,2	1323,7	277,8	107,9	4746,7	18,6	1,0	6,3	7,1	47,0	4,7	21,2
25.21652.64690.9432.6168.56738.917.11.02.819.811.8.97.458.626.21376.51675.4207.4120.5537.912.14.24.312.981.96.037.127.2677.21657.9274.883.34417.49.04.07.65.540.94.417.128.1491.41428.2124.483.94570.612.43.06.65.936.43.117.229.1630.91292.6243.689.7391.27.52.46.54.936.53.317.030.1559.81504.2243.888.53931.611.01.87.25.733.92.916.631.0637.91228.1176.386.2345.68.510.54.52.33.73.115.632.0514.31422.2227.089.44885.69.71.76.35.33.6.43.618.233.0959.81707.2252.589.24485.913.12.26.06.742.14.219.935.9707.91454.8297.870.93998.87.51.94.86.043.23.621.036.9541.32307.8412.397.84633.215.64.04.66.253.74.727.539.8609.71245.4291.8<	24,3	1847,5	3487,8	521,5	145,6	6084,6	13,1	4,1	4,1	14,6	95,5	6,5	41,7
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	25,2	1652,6	4690,9	432,6	168,5	6738,9	17,1	1,0	2,8	19,8	118,9	7,4	58,6
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	26,2	1376,5	1675,4	207,4	120,5	5357,9	12,1	4,2	4,3	12,9	81,9	6,0	37,1
28.1 491.4 1428.2 124.4 83.9 4570.6 12.4 3.0 6.6 5.9 36.4 3.1 17.2 29.1 630.9 1292.6 243.6 89.7 3912.2 7.5 2.4 6.5 4.9 36.5 3.3 17.0 30.1 559.8 1504.2 243.8 88.5 3931.6 11.0 1.8 7.2 5.7 33.9 2.9 16.8 31.0 637.9 1228.1 176.3 86.2 3845.6 8.5 1.0 5.4 5.2 34.7 3.1 15.6 32.0 514.3 1427.4 227.3 86.6 4253.6 12.4 2.5 6.0 6.8 43.1 3.0 20.0 34.9 901.6 147.4 27.3 86.6 4253.6 12.4 2.5 6.0 6.7 42.1 4.2 19.9 35.9 707.9 1454.8 297.8 70.9 3998.8 7.5 1.9 4.8 6.0 43.2 3.6 21.0 35.9 707.9 1454.8	27,2	677,2	1657,9	297,8	83,3	4417,4	9,0	4,0	7,6	5,5	40,9	4,4	17,1
29,1630,91292,6243,689,73912,27,52,46,54,936,53,317,030,1559,81504,2243,888,53931,611,01,87,25,733,92,916,831,0637,91228,1176,386,23845,68,51,05,45,234,73,115,632,0514,31422,2221,089,43885,69,71,76,35,336,43,618,233,0959,81707,2252,589,24485,913,12,26,06,843,13,020,034,0777,51368,1188,784,43794,310,42,06,75,531,82,615,534,9901,61427,4227,386,6423,612,41,56,043,23,621,035,9707,91454,8297,870,9399,87,51,94,86,043,23,621,036,9541,32307,8412,397,84813,112,410,44,66,25,74,329,037,8542,82301,6345,581,14740,69,01,03,56,65,67,429,038,8452,597,8,5326,945,9463,21,65,65,94,72,7,539,839,8609,7124,889,6369,97,81,	28,1	491,4	1428,2	124,4	83,9	4570,6	12,4	3,0	6,6	5,9	36,4	3,1	17,2
30,1 $559,8$ $1504,2$ $243,8$ $88,5$ $3931,6$ $11,0$ $1,8$ $7,2$ $5,7$ $33,9$ $2,9$ $16,8$ $31,0$ $637,9$ $1228,1$ $176,3$ $86,2$ $3845,6$ $8,5$ $1,0$ $5,4$ $5,2$ $34,7$ $3,1$ $15,6$ $32,0$ $514,3$ $1422,2$ $227,0$ $89,4$ $3885,6$ $9,7$ $1,7$ $6,3$ $5,3$ $36,4$ $3,6$ $18,2$ $33,0$ $959,8$ $1707,2$ $252,5$ $89,2$ $4485,9$ $13,1$ $2,2$ $6,0$ $6,8$ $43,1$ $3,0$ $20,0$ $34,0$ $777,5$ $1368,1$ $188,7$ $84,4$ $3794,3$ $10,4$ $2,0$ $6,7$ $42,1$ $4,2$ $19,9$ $35,9$ $707,9$ $1454,8$ $297,8$ $70,9$ $3998,8$ $7,5$ $1,9$ $4,8$ $6,0$ $43,2$ $3,6$ $21,0$ $36,9$ $541,3$ $2307,8$ $412,3$ $97,8$ $4813,1$ $12,4$ 10 $4,9$ $6,6$ $47,0$ $3,5$ $5,5$ $37,8$ $542,8$ $2301,6$ $455,9$ $453,2$ $15,6$ $40,4,6$ $62,2$ $53,7$ $4,7$ $27,5$ $39,8$ $609,7$ $1245,4$ $291,8$ $69,6$ $3969,9$ $7,8$ $1,6$ $5,6$ $59,45,7$ $4,5$ $24,6$ $40,7$ $344,3$ $1065,6$ $130,7$ $45,5$ $3203,2$ $8,0$ $2,9$ $5,7$ $5,7$ $32,3$ $3,4$ $17,1$ $41,7$ $509,5$	29,1	630,9	1292,6	243,6	89,7	3912,2	7,5	2,4	6,5	4,9	36,5	3,3	17,0
31,0 $637,9$ $1228,1$ $176,3$ $86,2$ $3845,6$ $8,5$ 1.0 $5,4$ $5,2$ $34,7$ $3,1$ $15,6$ $32,0$ $514,3$ $1422,2$ $227,0$ $89,4$ $3885,6$ $9,7$ $1,7$ $6,3$ $5,3$ $36,4$ $3,0$ $20,0$ $34,0$ $777,5$ $1368,1$ $188,7$ $84,4$ $3794,3$ $10,4$ 2.0 $6,7$ $5,5$ $31,8$ $2,6$ $15,5$ $34,9$ $901,6$ $1427,4$ $227,3$ $86,6$ $4223,6$ $12,4$ $2,5$ $6,0$ $6,7$ $42,1$ $42,2$ $19,9$ $35,9$ $707,9$ $1454,8$ $297,8$ $70,9$ $3998,8$ $7,5$ $1,9$ $4,8$ $6,0$ $43,2$ $3,6$ $21,0$ $36,9$ $541,3$ $2307,8$ $412,3$ $97,8$ $4813,1$ $12,4$ $1,0$ $4,9$ $6,6$ $47,0$ $3,5$ $25,1$ $37,8$ $542,8$ $2301,6$ $345,5$ $81,1$ $4740,6$ $9,0$ $1,0$ $3,5$ $6,6$ $53,7$ $4,7$ $27,5$ $39,8$ $609,7$ $1245,4$ $291,8$ $69,6$ $3969,9$ $7,8$ $1,6$ $5,6$ $5,9$ $45,7$ $4,5$ $440,7$ $344,3$ $1065,6$ $130,7$ $45,5$ $3203,2$ $8,0$ $2,9$ $5,7$ $5,7$ $3,2,3$ $3,4$ $17,1$ $41,7$ $509,5$ $1411,1$ $13,4$ $100,9$ $3904,6$ $10,3$ $1,6$ $6,4$ $45,3$ $4,5,2$ $26,7$ <td< td=""><td>30,1</td><td>559,8</td><td>1504,2</td><td>243,8</td><td>88,5</td><td>3931,6</td><td>11,0</td><td>1,8</td><td>7,2</td><td>5,7</td><td>33,9</td><td>2,9</td><td>16,8</td></td<>	30,1	559,8	1504,2	243,8	88,5	3931,6	11,0	1,8	7,2	5,7	33,9	2,9	16,8
32,0 $514,3$ $1422,2$ $227,0$ $89,4$ $3885,6$ $9,7$ $1,7$ $6,3$ $5,3$ $36,4$ $3,6$ $18,2$ $33,0$ $959,8$ $1707,2$ $252,5$ $89,2$ $4485,9$ $13,1$ $2,2$ $6,0$ $6,8$ $43,1$ $3,0$ $20,0$ $34,0$ $777,5$ $1368,1$ $188,7$ $84,4$ $3794,3$ $10,4$ $2,0$ $6,7$ $5,5$ $31,8$ $2,6$ $15,5$ $34,9$ $901,6$ $1427,4$ $227,3$ $86,6$ $4253,6$ $12,4$ $2,5$ $6,0$ $6,7$ $4,2,1$ $4,2,1$ $19,9$ $35,9$ $707,9$ $1454,8$ $297,8$ $70,9$ $3998,8$ $7,5$ $1,9$ $4,8$ $6,0$ $43,2$ $3,6$ $21,0$ $36,9$ $541,3$ $2307,8$ $412,3$ $97,8$ $4813,1$ $12,4$ $1,0$ $4,9$ $6,6$ $47,0$ $3,5$ $25,1$ $37,8$ $542,8$ $2301,6$ $345,5$ $81,1$ $4740,6$ $9,0$ $1,0$ $3,5$ $6,6$ $56,7$ $4,3$ $29,0$ $38,8$ $452,5$ $978,5$ $326,9$ $45,9$ $4633,2$ $15,6$ $4,0$ $4,6$ $6,2$ $53,7$ $4,7$ $27,5$ $39,8$ $609,7$ $1245,4$ $291,8$ $69,6$ $3969,9$ $7,8$ $1,6$ $5,6$ $5,9$ $45,7$ $4,5$ $24,6$ $40,7$ $344,3$ $105,7$ $45,5$ $320,2$ $8,0$ $2,5$ $5,7$ $5,7$ $5,1$ $4,5$ $22,6$ <td>31,0</td> <td>637,9</td> <td>1228,1</td> <td>176,3</td> <td>86,2</td> <td>3845,6</td> <td>8,5</td> <td>1,0</td> <td>5,4</td> <td>5,2</td> <td>34,7</td> <td>3,1</td> <td>15,6</td>	31,0	637,9	1228,1	176,3	86,2	3845,6	8,5	1,0	5,4	5,2	34,7	3,1	15,6
33,0959.81707,2252,589,24485,913,12,26,06,843,13,020,034,0777,51368,1188,784,43794,310,42,06,75,531,82,615,534,9901,61427,4227,386,6423,612,42,56,06,742,14,219,935,9707,91454,8297,870,93998,87,51,94,86,043,23,621,036,9541,32307,8412,397,84813,112,410,44,96,647,03,525,137,8542,82301,6345,581,14740,69,01,03,56,65,74,329,038,8452,5978,5326,945,94633,215,64,04,66,253,74,72,7,539,8609,71245,4291,869,63969,97,81,65,65,94,5,74,52,4,640,7344,3106,5130,74,5320,28,02,95,75,732,33,417,141,7509,51411,1131,866,83760,77,34,04,69,25,75,74,22,643,7721,81029,9113,4100,93904,610,31,04,98,859,75,12,6,744,6717,4127,7274	32,0	514,3	1422,2	227,0	89,4	3885,6	9,7	1,7	6,3	5,3	36,4	3,6	18,2
34,0 $777,5$ $1368,1$ $188,7$ $84,4$ $3794,3$ $10,4$ $2,0$ $6,7$ $5,5$ $31,8$ $2,6$ $15,5$ $34,9$ $901,6$ $1427,4$ $227,3$ $86,6$ $4253,6$ $12,4$ $2,5$ $6,0$ $6,7$ $42,1$ $4,2$ $19,9$ $35,9$ $707,9$ $1454,8$ $227,3$ $86,6$ $4253,6$ $12,4$ $1,0$ $4,8$ $6,0$ $43,2$ $3,6$ $21,0$ $36,9$ $541,3$ $2307,8$ $412,3$ $97,8$ $4813,1$ $12,4$ $10,0$ $4,9$ $6,6$ $47,0$ $3,5$ $55,1$ $37,8$ $542,8$ $2301,6$ $345,5$ $81,1$ $4740,6$ 90 $1,0$ $3,5$ $6,6$ $56,7$ $4,3$ 290 $38,8$ $452,5$ $978,5$ $326,9$ $45,9$ $4633,2$ $15,6$ $40,4,6$ $6,2$ $53,7$ $4,7$ $27,5$ $39,8$ $609,7$ $1245,4$ $291,8$ $69,6$ $3969,9$ $7,8$ $1,6$ $5,6$ $5,9$ $45,7$ $4,5$ $24,6$ $40,7$ $344,3$ $1065,6$ $130,7$ $45,5$ $3203,2$ $8,0$ $2,9$ $5,7$ $5,7$ $32,3$ $3,4$ $17,1$ $41,7$ $509,5$ $1411,1$ $131,8$ $66,8$ $3760,7$ $7,3$ $4,0$ $4,6$ $92,2$ $57,5$ $4,4$ $27,4$ $42,7$ $654,0$ $1248,8$ $159,2$ $66,3$ $3593,2$ $11,0$ $1,8$ $6,6$ $6,4$ $45,3$ $4,5$ $22,6$ <td>33,0</td> <td>959,8</td> <td>1707,2</td> <td>252,5</td> <td>89,2</td> <td>4485,9</td> <td>13,1</td> <td>2,2</td> <td>6,0</td> <td>6,8</td> <td>43,1</td> <td>3,0</td> <td>20,0</td>	33,0	959,8	1707,2	252,5	89,2	4485,9	13,1	2,2	6,0	6,8	43,1	3,0	20,0
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	34,0	777,5	1368,1	188,7	84,4	3794,3	10,4	2,0	6,7	5,5	31,8	2,6	15,5
35.9 707.9 1454.8 297.8 70.9 3998.8 7.5 1.9 4.8 6.0 43.2 3.6 21.0 36.9 541.3 2307.8 412.3 97.8 4813.1 12.4 1.0 4.9 6.6 47.0 3.5 25.1 37.8 542.8 2301.6 345.5 81.1 4740.6 9.0 1.0 3.5 6.6 56.7 4.3 29.0 38.8 452.5 978.5 326.9 45.9 4633.2 15.6 4.0 4.6 6.2 53.7 4.7 27.5 39.8 600.7 1245.4 291.8 69.6 3969.9 7.8 1.6 5.6 5.9 45.7 4.5 24.6 40.7 344.3 1065.6 130.7 45.5 3203.2 8.0 2.9 5.7 5.7 3.4 17.1 41.7 509.5 1411.1 131.8 66.8 3760.7 7.3 4.0 4.6 9.2 57.5 4.4 27.4 42.7 654.0 1248.8 159.2 66.3 3593.2 11.0 1.8 6.6 445.3 4.5 22.6 43.7 721.8 1029.9 113.4 100.9 3904.6 10.3 1.0 4.9 8.8 59.7 5.1 26.7 44.6 717.4 1272.7 274.3 71.6 3776.6 10.2 2.5 5.7 8.1 52.5 5.7 26.9 4	34,9	901,6	1427,4	227,3	86,6	4253,6	12,4	2,5	6,0	6,7	42,1	4,2	19,9
36.9 541.3 2307.8 412.3 97.8 4813.1 12.4 1.0 4.9 6.6 47.0 3.5 25.1 37.8 542.8 2301.6 345.5 81.1 4740.6 9.0 1.0 3.5 6.6 56.7 4.3 29.0 38.8 452.5 978.5 326.9 45.9 4633.2 15.6 4.0 4.6 6.2 53.7 4.7 27.5 39.8 609.7 1245.4 291.8 69.6 3969.9 7.8 1.6 5.6 5.9 45.7 4.5 24.6 40.7 344.3 1005.6 130.7 45.5 3203.2 8.0 2.9 5.7 5.7 32.3 3.4 17.1 41.7 509.5 1411.1 131.8 66.8 3760.7 7.3 4.0 4.6 9.2 57.5 4.4 27.4 42.7 654.0 1248.8 159.2 66.3 3593.2 11.0 1.8 6.6 6.4 45.3 4.5 22.6 43.7 721.8 1029.9 113.4 100.9 3904.6 10.3 10.4 4.8 57.5 51.2 26.7 44.6 717.4 1272.7 274.3 71.6 3776.6 10.2 2.5 5.7 8.1 52.5 57.2 26.7 45.6 746.0 1678.8 234.3 84.4 3721.4 13.6 2.7 3.6 7.7 2.5 3.6 5.7 <td>35,9</td> <td>707,9</td> <td>1454,8</td> <td>297,8</td> <td>70,9</td> <td>3998,8</td> <td>7,5</td> <td>1,9</td> <td>4,8</td> <td>6,0</td> <td>43,2</td> <td>3,6</td> <td>21,0</td>	35,9	707,9	1454,8	297,8	70,9	3998,8	7,5	1,9	4,8	6,0	43,2	3,6	21,0
37.8 542.8 2301.6 345.5 81.1 4740.6 9.0 1.0 3.5 6.6 56.7 4.3 29.0 38.8 452.5 978.5 326.9 45.9 4633.2 15.6 4.0 4.6 6.2 53.7 4.7 27.5 39.8 609.7 1245.4 291.8 69.6 3969.9 7.8 1.6 5.6 5.9 45.7 4.5 24.6 40.7 344.3 1065.6 130.7 45.5 3203.2 8.0 2.9 5.7 5.7 32.3 3.4 17.1 41.7 509.5 1411.1 131.8 66.8 3760.7 7.3 4.0 4.6 9.2 57.5 4.4 27.4 42.7 654.0 1248.8 159.2 66.3 3593.2 11.0 1.8 6.6 6.4 45.3 4.5 22.6 43.7 721.8 1029.9 113.4 100.9 3904.6 10.3 1.0 4.9 8.8 59.7 5.1 26.7 44.6 717.4 1272.7 274.3 71.6 377.66 10.2 2.5 5.7 8.1 52.5 5.7 26.9 45.6 746.0 1679.8 234.3 84.4 3721.4 13.6 2.7 5.3 $38.29.7$ 5.7 22.5 44.6 590.9 1133.5 195.9 56.6 3169.8 13.0 2.1 5.3 $38.29.7$ 5.7 22.5 <tr< td=""><td>36,9</td><td>541,3</td><td>2307,8</td><td>412,3</td><td>97,8</td><td>4813,1</td><td>12,4</td><td>1,0</td><td>4,9</td><td>6,6</td><td>47,0</td><td>3,5</td><td>25,1</td></tr<>	36,9	541,3	2307,8	412,3	97,8	4813,1	12,4	1,0	4,9	6,6	47,0	3,5	25,1
38.8 452.5 978.5 326.9 45.9 4633.2 15.6 4.0 4.6 6.2 53.7 4.7 27.5 39.8 609.7 1245.4 291.8 69.6 3969.9 7.8 1.6 5.6 5.9 45.7 4.5 24.6 40.7 344.3 1065.6 130.7 45.5 3203.2 8.0 2.9 5.7 5.7 32.3 3.4 17.1 41.7 509.5 1411.1 131.8 66.8 3760.7 7.3 4.0 4.6 9.2 57.5 4.4 27.4 42.7 654.0 1248.8 159.2 66.3 3593.2 11.0 1.8 6.6 6.4 45.3 4.5 22.6 43.7 721.8 1029.9 113.4 100.9 3904.6 10.3 1.0 4.9 8.8 59.7 5.1 26.7 44.6 717.4 127.2 274.3 71.6 3776.6 10.2 2.5 5.7 8.1 52.5 5.7 26.9 45.6 746.0 1679.8 234.3 84.4 3721.4 13.6 2.7 3.6 7.0 50.4 4.9 23.8 46.6 590.9 1133.5 195.9 56.6 3169.8 13.0 2.1 5.3 3.8 29.7 3.7 16.6 47.5 516.3 1148.0 106.4 66.5 5039.1 10.3 3.4 2.2 36.6 5.7 22.5	37,8	542,8	2301,6	345,5	81,1	4740,6	9,0	1,0	3,5	6,6	56,7	4,3	29,0
39,8609,71245,4291,869,63969,97.81,65,65,945,74,524,640,7344,31065,6130,745,53203,28,02,95,75,732,33,417,141,7509,51411,1131,866,83760,77,34,04,69,257,54,427,442,7654,01248,8159,266,33593,211,01,86,66,445,34,522,643,7721,81029,9113,4100,93904,610,31,04,98,859,75,126,744,6717,41272,7274,371,63776,610,22,55,78,152,55,726,945,6746,01679,8234,384,43721,413,62,73,67,050,44,923,846,6590,91133,5195,956,63169,813,02,15,33,829,73,716,647,5516,31148,0106,466,55039,110,33,34,25,236,65,722,548,5921,91413,5229,777,33523,812,02,53,78,246,45,528,549,51009,1808,3118,954,33325,59,44,03,16,448,74,724,650,41091,11288,3112,6 <td>38,8</td> <td>452,5</td> <td>978,5</td> <td>326,9</td> <td>45,9</td> <td>4633,2</td> <td>15,6</td> <td>4,0</td> <td>4,6</td> <td>6,2</td> <td>53,7</td> <td>4,7</td> <td>27,5</td>	38,8	452,5	978,5	326,9	45,9	4633,2	15,6	4,0	4,6	6,2	53,7	4,7	27,5
40,7 $344,3$ $1065,6$ $130,7$ $45,5$ $3203,2$ $8,0$ $2,9$ $5,7$ $5,7$ $32,3$ $3,4$ $17,1$ $41,7$ $509,5$ $1411,1$ $131,8$ $66,8$ $3760,7$ $7,3$ $4,0$ $4,6$ $9,2$ $57,5$ $4,4$ $27,4$ $42,7$ $654,0$ $1248,8$ $159,2$ $66,3$ $3593,2$ $11,0$ $1,8$ $6,6$ $6,4$ $45,3$ $4,5$ $22,6$ $43,7$ $721,8$ $1029,9$ $113,4$ $100,9$ $3904,6$ $10,3$ $1,0$ $4,9$ $8,8$ $59,7$ $5,1$ $26,7$ $44,6$ $717,4$ $1272,7$ $274,3$ $71,6$ $3776,6$ $10,2$ $2,5$ $5,7$ $8,1$ $52,5$ $5,7$ $26,9$ $45,6$ $746,0$ $1679,8$ $234,3$ $84,4$ $3721,4$ $13,6$ $2,7$ $3,6$ $7,0$ $50,4$ $4,9$ $23,8$ $46,6$ $590,9$ $1133,5$ $195,9$ $56,6$ $3169,8$ $13,0$ $2,1$ $5,3$ $3,8$ $29,7$ $3,7$ $16,6$ $47,5$ $516,3$ $1148,0$ $106,4$ $66,5$ $5039,1$ $10,3$ $3,3$ $4,2$ $5,2$ $36,6$ $5,7$ $22,5$ $48,5$ $921,9$ $1413,5$ $229,7$ $77,3$ $3523,8$ $12,0$ $2,5$ $3,7$ $8,2$ $46,4$ $5,5$ $28,5$ $49,5$ $1009,1$ $808,3$ $118,9$ $54,3$ $3325,5$ $9,4$ $4,0$ $3,1$ $6,4$ $48,7$ $4,7$ <td>39,8</td> <td>609,7</td> <td>1245,4</td> <td>291,8</td> <td>69,6</td> <td>3969,9</td> <td>7,8</td> <td>1,6</td> <td>5,6</td> <td>5,9</td> <td>45,7</td> <td>4,5</td> <td>24,6</td>	39,8	609,7	1245,4	291,8	69,6	3969,9	7,8	1,6	5,6	5,9	45,7	4,5	24,6
41,7 $509,5$ $1411,1$ $131,8$ $66,8$ $3760,7$ $7,3$ $4,0$ $4,6$ $9,2$ $57,5$ $4,4$ $27,4$ $42,7$ $654,0$ $1248,8$ $159,2$ $66,3$ $3593,2$ $11,0$ $1,8$ $6,6$ $6,4$ $45,3$ $4,5$ $22,6$ $43,7$ $721,8$ $1029,9$ $113,4$ $100,9$ $3904,6$ $10,3$ $1,0$ 4.9 $8,8$ $59,7$ $5,1$ $26,7$ $44,6$ $717,4$ $1272,7$ $274,3$ $71,6$ $3776,6$ $10,2$ $2,5$ $5,7$ $8,1$ $52,5$ $5,7$ $26,9$ $45,6$ $746,0$ $1679,8$ $234,3$ $84,4$ $3721,4$ $13,6$ $2,7$ $3,6$ $7,0$ $50,4$ $4,9$ $23,8$ $46,6$ $590,9$ $1133,5$ $195,9$ $56,6$ $3169,8$ $13,0$ $2,1$ $5,3$ $3,8$ $29,7$ $3,7$ $16,6$ $47,5$ $516,3$ $1148,0$ $106,4$ $66,5$ $5039,1$ $10,3$ $3,3$ $4,2$ $5,2$ $36,6$ $5,7$ $22,5$ $48,5$ $921,9$ $1413,5$ $229,7$ $77,3$ $3523,8$ $12,0$ $2,5$ $3,7$ $8,2$ $46,4$ $5,5$ $28,5$ $49,5$ $1009,1$ $808,3$ $118,9$ $54,3$ $3325,5$ $9,4$ $4,0$ $3,1$ $6,4$ $48,7$ $4,7$ $24,6$ $50,4$ $1091,1$ $1288,3$ $112,6$ $73,7$ $3130,5$ $7,8$ $1,0$ $2,8$ $8,1$ $56,7$ $5,7$ <td>40,7</td> <td>344,3</td> <td>1065,6</td> <td>130,7</td> <td>45,5</td> <td>3203,2</td> <td>8,0</td> <td>2,9</td> <td>5,7</td> <td>5,7</td> <td>32,3</td> <td>3,4</td> <td>17,1</td>	40,7	344,3	1065,6	130,7	45,5	3203,2	8,0	2,9	5,7	5,7	32,3	3,4	17,1
42,7 $654,0$ $1248,8$ $159,2$ $66,3$ $3593,2$ $11,0$ $1,8$ $6,6$ $6,4$ $45,3$ $4,5$ $22,6$ $43,7$ $721,8$ $1029,9$ $113,4$ $100,9$ $3904,6$ $10,3$ $1,0$ $4,9$ $8,8$ $59,7$ $5,1$ $26,7$ $44,6$ $717,4$ $1272,7$ $274,3$ $71,6$ $3776,6$ $10,2$ $2,5$ $5,7$ $8,1$ $52,5$ $5,7$ $26,9$ $45,6$ $746,0$ $1679,8$ $234,3$ $84,4$ $3721,4$ $13,6$ $2,7$ $3,6$ $7,0$ $50,4$ $4,9$ $23,8$ $46,6$ $590,9$ $1133,5$ $195,9$ $56,6$ $3169,8$ $13,0$ $2,1$ $5,3$ $3,8$ $29,7$ $3,7$ $16,6$ $47,5$ $516,3$ $1148,0$ $106,4$ $66,5$ $5039,1$ $10,3$ $3,3$ $4,2$ $5,2$ $36,6$ $5,7$ $22,5$ $48,5$ $921,9$ $1413,5$ $229,7$ $7,3$ $3523,8$ $12,0$ $2,5$ $3,7$ $8,2$ $46,4$ $5,5$ $28,5$ $49,5$ $1009,1$ $808,3$ $118,9$ $54,3$ $3325,5$ $9,4$ $4,0$ $3,1$ $6,4$ $48,7$ $4,7$ $24,6$ $50,4$ $1091,1$ $1288,3$ $112,6$ $73,7$ $3130,5$ $7,8$ $1,0$ $2,8$ $8,1$ $56,7$ $5,7$ $29,2$ $51,4$ $996,4$ $1210,6$ $191,8$ $7,7,1$ $3339,1$ $9,0$ $1,9$ $2,1$ $7,1$ $49,4$ $5,8$ <td>41,7</td> <td>509,5</td> <td>1411,1</td> <td>131,8</td> <td>66,8</td> <td>3760,7</td> <td>7,3</td> <td>4,0</td> <td>4,6</td> <td>9,2</td> <td>57,5</td> <td>4,4</td> <td>27,4</td>	41,7	509,5	1411,1	131,8	66,8	3760,7	7,3	4,0	4,6	9,2	57,5	4,4	27,4
43,7 $721,8$ $1029,9$ $113,4$ $100,9$ $3904,6$ $10,3$ $1,0$ $4,9$ $8,8$ $59,7$ $5,1$ $26,7$ $44,6$ $717,4$ $1272,7$ $274,3$ $71,6$ $3776,6$ $10,2$ $2,5$ $5,7$ $8,1$ $52,5$ $5,7$ $26,9$ $45,6$ $746,0$ $1679,8$ $234,3$ $84,4$ $3721,4$ $13,6$ $2,7$ $3,6$ $7,0$ $50,4$ $4,9$ $23,8$ $46,6$ $590,9$ $1133,5$ $195,9$ $56,6$ $3169,8$ $13,0$ $2,1$ $5,3$ $3,8$ $29,7$ $3,7$ $16,6$ $47,5$ $516,3$ $1148,0$ $106,4$ $66,5$ $5039,1$ $10,3$ $3,3$ $4,2$ $5,2$ $36,6$ $5,7$ $22,5$ $48,5$ $921,9$ $1413,5$ $229,7$ $77,3$ $3523,8$ $12,0$ $2,5$ $3,7$ $8,2$ $46,4$ $5,5$ $28,5$ $49,5$ $1009,1$ $808,3$ $118,9$ $54,3$ $3325,5$ $9,4$ $4,0$ $3,1$ $6,4$ $48,7$ $4,7$ $24,6$ $50,4$ $1091,1$ $1288,3$ $112,6$ $73,7$ $3130,5$ $7,8$ $1,0$ $2,8$ $8,1$ $56,7$ $5,7$ $29,2$ $51,4$ $996,4$ $1210,6$ $191,8$ $77,1$ $3339,1$ $9,0$ $1,9$ $2,1$ $7,1$ $49,4$ $5,8$ $27,6$ $52,4$ $432,9$ $1132,5$ $209,2$ $50,6$ $3384,9$ $8,1$ $1,8$ $2,2$ $7,2$ $58,3$ $6,2$ <td>42,7</td> <td>654,0</td> <td>1248,8</td> <td>159,2</td> <td>66,3</td> <td>3593,2</td> <td>11,0</td> <td>1,8</td> <td>6,6</td> <td>6,4</td> <td>45,3</td> <td>4,5</td> <td>22,6</td>	42,7	654,0	1248,8	159,2	66,3	3593,2	11,0	1,8	6,6	6,4	45,3	4,5	22,6
44.6 717.4 1272.7 274.3 71.6 3776.6 10.2 2.5 5.7 8.1 52.5 5.7 26.9 45.6 746.0 1679.8 234.3 84.4 3721.4 13.6 2.7 3.6 7.0 50.4 4.9 23.8 46.6 590.9 1133.5 195.9 56.6 3169.8 13.0 2.1 5.3 3.8 29.7 3.7 16.6 47.5 516.3 1148.0 106.4 66.5 5039.1 10.3 3.3 4.2 5.2 36.6 5.7 22.5 48.5 921.9 1413.5 229.7 77.3 3523.8 12.0 2.5 3.7 8.2 46.4 5.5 28.5 49.5 1009.1 808.3 118.9 54.3 3325.5 9.4 4.0 3.1 6.4 48.7 4.7 24.6 50.4 1091.1 1288.3 112.6 73.7 3130.5 7.8 1.0 2.8 8.1 56.7 5.7 29.2 51.4 996.4 1210.6 191.8 77.1 3339.1 9.0 1.9 2.1 7.1 49.4 5.8 27.6 52.4 432.9 1132.5 209.2 50.6 3384.9 8.1 1.8 2.2 7.2 58.3 6.2 33.5 53.4 802.0 1198.8 192.0 92.9 3913.8 8.7 5.3 1.1 6.3 79.5 10.0	43,7	721,8	1029,9	113,4	100,9	3904,6	10,3	1,0	4,9	8,8	59,7	5,1	26,7
45,6 $746,0$ $1679,8$ $234,3$ $84,4$ $3721,4$ $13,6$ $2,7$ $3,6$ $7,0$ $50,4$ $4,9$ $23,8$ $46,6$ $590,9$ $1133,5$ $195,9$ $56,6$ $3169,8$ $13,0$ $2,1$ $5,3$ $3,8$ $29,7$ $3,7$ $16,6$ $47,5$ $516,3$ $1148,0$ $106,4$ $66,5$ $5039,1$ $10,3$ $3,3$ $4,2$ $5,2$ $36,6$ $5,7$ $22,5$ $48,5$ $921,9$ $1413,5$ $229,7$ $77,3$ $3523,8$ $12,0$ $2,5$ $3,7$ $8,2$ $46,4$ $5,5$ $28,5$ $49,5$ $1009,1$ $808,3$ $118,9$ $54,3$ $3325,5$ $9,4$ $4,0$ $3,1$ $6,4$ $48,7$ $4,7$ $24,6$ $50,4$ $1091,1$ $1288,3$ $112,6$ $73,7$ $3130,5$ $7,8$ $1,0$ $2,8$ $8,1$ $56,7$ $5,7$ $29,2$ $51,4$ $996,4$ $1210,6$ $191,8$ $77,1$ $3339,1$ $9,0$ $1,9$ $2,1$ $7,1$ $49,4$ $5,8$ $27,6$ $52,4$ $432,9$ $1132,5$ $209,2$ $50,6$ $3384,9$ $8,1$ $1,8$ $2,2$ $7,2$ $58,3$ $6,2$ $33,5$ $53,4$ $802,0$ $1198,8$ $192,0$ $92,9$ $3913,8$ $8,7$ $5,3$ $1,1$ $6,3$ $79,5$ $10,0$ $37,8$ $54,3$ $488,6$ $908,7$ $102,3$ $77,0$ $3325,9$ $8,2$ $4,9$ $1,2$ $3,2$ $61,7$ $9,9$ <t< td=""><td>44,6</td><td>717,4</td><td>1272,7</td><td>274,3</td><td>71,6</td><td>3776,6</td><td>10,2</td><td>2,5</td><td>5,7</td><td>8,1</td><td>52,5</td><td>5,7</td><td>26,9</td></t<>	44,6	717,4	1272,7	274,3	71,6	3776,6	10,2	2,5	5,7	8,1	52,5	5,7	26,9
46,6 $590,9$ $1133,5$ $195,9$ $56,6$ $3169,8$ $13,0$ $2,1$ $5,3$ $3,8$ $29,7$ $3,7$ $16,6$ $47,5$ $516,3$ $1148,0$ $106,4$ $66,5$ $5039,1$ $10,3$ $3,3$ $4,2$ $5,2$ $36,6$ $5,7$ $22,5$ $48,5$ $921,9$ $1413,5$ $229,7$ $77,3$ $3523,8$ $12,0$ $2,5$ $3,7$ $8,2$ $46,4$ $5,5$ $28,5$ $49,5$ $1009,1$ $808,3$ $118,9$ $54,3$ $3325,5$ $9,4$ $4,0$ $3,1$ $6,4$ $48,7$ $4,7$ $24,6$ $50,4$ $1091,1$ $1288,3$ $112,6$ $73,7$ $3130,5$ $7,8$ $1,0$ $2,8$ $8,1$ $56,7$ $5,7$ $29,2$ $51,4$ $996,4$ $1210,6$ $191,8$ $77,1$ $3339,1$ $9,0$ $1,9$ $2,1$ $7,1$ $49,4$ $5,8$ $27,6$ $52,4$ $432,9$ $1132,5$ $209,2$ $50,6$ $3384,9$ $8,1$ $1,8$ $2,2$ $7,2$ $58,3$ $6,2$ $33,5$ $53,4$ $802,0$ $1198,8$ $192,0$ $92,9$ $3913,8$ $8,7$ $5,3$ $1,1$ $6,3$ $79,5$ $10,0$ $37,8$ $54,3$ $488,6$ $908,7$ $102,3$ $77,0$ $3325,9$ $8,2$ $4,9$ $1,2$ $3,2$ $61,7$ $9,9$ $42,1$ $55,3$ $372,4$ $1168,9$ $210,6$ $85,5$ $4328,0$ $10,0$ $4,8$ $1,0$ $2,0$ $78,3$ $7,8$ <t< td=""><td>45,6</td><td>746,0</td><td>1679,8</td><td>234,3</td><td>84,4</td><td>3721,4</td><td>13,6</td><td>2,7</td><td>3,6</td><td>7,0</td><td>50,4</td><td>4,9</td><td>23,8</td></t<>	45,6	746,0	1679,8	234,3	84,4	3721,4	13,6	2,7	3,6	7,0	50,4	4,9	23,8
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	46,6	590,9	1133,5	195,9	56,6	3169,8	13,0	2,1	5,3	3,8	29,7	3,7	16,6
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	47,5	516,3	1148,0	106,4	66,5	5039,1	10,3	3,3	4,2	5,2	36,6	5,7	22,5
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	48,5	921,9	1413,5	229,7	77,3	3523,8	12,0	2,5	3,7	8,2	46,4	5,5	28,5
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	49,5	1009,1	808,3	118,9	54,3	3325,5	9,4	4,0	3,1	6,4	48,7	4,7	24,6
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	50,4	1091,1	1288,3	112,6	73,7	3130,5	7,8	1,0	2,8	8,1	56,7	5,7	29,2
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	51,4	996,4	1210,6	191,8	77,1	3339,1	9,0	1,9	2,1	7,1	49,4	5,8	27,6
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	52,4	432,9	1132,5	209,2	50,6	3384,9	8,1	1,8	2,2	7,2	58,3	6,2	33,5
54,3488,6908,7102,377,03325,98,24,91,23,261,79,942,155,3372,41168,9210,685,54328,010,04,81,02,078,37,829,856,3327,4342,575,027,61173,79,01,01,02,495,89,941,357,22214,48181,7478,2303,912103,616,11,01,12,283,48,732,958,2300,01127,275,015,6943,78,11,01,01,142,02,58,759,2300,0182,375,016,2333,07,61,01,01,017,22,88,560,1715,02384,4273,769,44514,012,22,61,01,571,18,526,461,1791,22848,8248,677,05501,911,14,91,75,679,07,533,1	53,4	802,0	1198,8	192,0	92,9	3913,8	8,7	5,3	1,1	6,3	79,5	10,0	37,8
55,3372,41168,9210,685,54328,010,04,81,02,078,37,829,856,3327,4342,575,027,61173,79,01,01,02,495,89,941,357,22214,48181,7478,2303,912103,616,11,01,12,283,48,732,958,2300,01127,275,015,6943,78,11,01,01,142,02,58,759,2300,0182,375,016,2333,07,61,01,01,017,22,88,560,1715,02384,4273,769,44514,012,22,61,01,571,18,526,461,1791,22848,8248,677,05501,911,14,91,75,679,07,533,1	54,3	488,6	908,7	102,3	77,0	3325,9	8,2	4,9	1,2	3,2	61,7	9,9	42,1
56,3327,4342,575,027,61173,79,01,01,02,495,89,941,357,22214,48181,7478,2303,912103,616,11,01,12,283,48,732,958,2300,01127,275,015,6943,78,11,01,01,142,02,58,759,2300,0182,375,016,2333,07,61,01,01,017,22,88,560,1715,02384,4273,769,44514,012,22,61,01,571,18,526,461,1791,22848,8248,677,05501,911,14,91,75,679,07,533,1	55,3	372,4	1168,9	210,6	85,5	4328,0	10,0	4,8	1,0	2,0	78,3	7,8	29,8
57,22214,48181,7478,2303,912103,616,11,01,12,283,48,732,958,2300,01127,275,015,6943,78,11,01,01,142,02,58,759,2300,0182,375,016,2333,07,61,01,01,017,22,88,560,1715,02384,4273,769,44514,012,22,61,01,571,18,526,461,1791,22848,8248,677,05501,911,14,91,75,679,07,533,1	56,3	327,4	342,5	75,0	27,6	1173,7	9,0	1,0	1,0	2,4	95,8	9,9	41,3
58,2300,01127,275,015,6943,78,11,01,01,142,02,58,759,2300,0182,375,016,2333,07,61,01,01,017,22,88,560,1715,02384,4273,769,44514,012,22,61,01,571,18,526,461,1791,22848,8248,677,05501,911,14,91,75,679,07,533,1	57,2	2214,4	8181,7	478,2	303,9	12103,6	16,1	1,0	1,1	2,2	83,4	8,7	32,9
59,2300,0182,375,016,2333,07,61,01,01,017,22,88,560,1715,02384,4273,769,44514,012,22,61,01,571,18,526,461,1791,22848,8248,677,05501,911,14,91,75,679,07,533,1	58,2	300,0	1127,2	75,0	15,6	943,7	8,1	1,0	1,0	1,1	42,0	2,5	8,7
60,1715,02384,4273,769,44514,012,22,61,01,571,18,526,461,1791,22848,8248,677,05501,911,14,91,75,679,07,533,1	59,2	300,0	182,3	75,0	16,2	333,0	7,6	1,0	1,0	1,0	17,2	2,8	8,5
61,1 791,2 2848,8 248,6 77,0 5501,9 11,1 4,9 1,7 5,6 79,0 7,5 33,1	60,1	715,0	2384,4	273,7	69,4	4514,0	12,2	2,6	1,0	1,5	71,1	8,5	26,4
	61,1	791,2	2848,8	248,6	77,0	5501,9	11,1	4,9	1,7	5,6	79,0	7,5	33,1

№ образца	Глубина, мм	210 Pb(dpm/g)	±σ	137 Cs(dpm/g)	±σ
Chasha-C-0,5	0-5	36,37	0,56	0,59	0,03
Chasha-C-1	5-10	35,45	0,58	0,9	0,04
Chasha-C-1,5	10-15	35,92	0,6	1,27	0,05
Chasha-C-2	15-20	30,85	0,58	1,93	0,06
Chasha-C-2,5	20-25	27,87	0,57	2,99	0,06
Chasha-C-3	25-30	13,16	0,49	2,32	0,06
Chasha-C-3,5	30-35	8,24	0,46	1,29	0,05
Chasha-C-4	35-40	5,39	0,42	0,62	0,04
Chasha-C-4,5	40-45	3,44	0,36	0,64	0,03
Chasha-C-5	45-50	2,98	0,32	0,45	0,03
Chasha-C-5,5	50-55	1,1	0,24	0,5	0,02
Chasha-C-6	55-60	0,71	0,22	0,16	0,02
Chasha-C-6,5	60-65	0,91	0,24	0,17	0,02
Chasha-C-7	65-70	1,57	0,29	0,1	0,02
Chasha-C-7,5	70-75	1,86	0,32	0,07	0,02
Chasha-C-8	75-80	1,39	0,32	0,05	0,02
Chasha-C-8,5	80-65	1,02	0,32	0,03	0,02

Приложение 7. Параметры распределения естественных (²¹⁰Pb) и искусственных (¹³⁷Cs) радионуклидов (dpm/g) в донных отложениях оз. Чаша.