



*На правах рукописи*

Новиков Вячеслав Сергеевич

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

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-  
минералогических наук

Новосибирск, 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН).

Научный руководитель: **Дарьин Андрей Викторович**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории литогеодинамики осадочных бассейнов ФГБУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск).

Официальные оппоненты:

- 1) **Субетто Дмитрий Александрович**, доктор географических наук, старший научный сотрудник, Декан факультета географии Российского государственного педагогического университета им. А.И.Герцена (г. Санкт-Петербург).
- 2) **Щетников Александр Александрович**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии мезозоя и кайнозоя Института земной коры СО РАН (г. Иркутск).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск).

Защита состоится «20» мая 2025 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.050.02, созданного на базе ФГБУН ИГМ СО РАН, в конференц-зале.

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Гаськовой О.Л. Тел./факс: +7 (383) 373-03-28; + 7(383) 373-05-61, e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН ИГМ СО РАН [https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles\\_dzubenko/novikov/dis-Novikov.pdf](https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/novikov/dis-Novikov.pdf).

Автореферат разослан «15» апреля 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
24.1.050.02  
доктор геол.-минер. наук

О.Л. Гаськова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

### **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 палеорекоkonструкций (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; Herzs Schuh 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 являются надежными архивами 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 Мультигинские), 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, датированных тектоническими или катастрофическими событиями; наличие региональных метеостанций с длительными рядами инструментальных метеонаблюдений.

2. 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  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{14}\text{C}$ . 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.

7. 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 литогеодиники осадочных бассейнов Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН № 0122041400214-9, РФФИ № 19-05-50046 и РФФИ № 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 7 кернов донных отложений из 4 озер.

Твердые препараты донных осадков готовились в лаборатории литогеодиники 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, <http://kcsni.nrcki.ru/>) и Шанхайском синхротронном центре (Шанхай, Китай, <http://www.ssrp.ac.cn/>).

Радиоуглеродный анализ образцов выполнен в ЦКП «Геохронология кайнозоя», Новосибирск (г. Новосибирск), Университете Ланьчжоу, Китай и в лаборатории «Beta analytics» (Майами, США, <https://www.radiocarbon.com/>). Распределение активности изотопов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  сделаны в Институте Геологии и Геофизики Китайской Академии Наук (Пекин, <http://www.igg.cas.cn>) 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). 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 Мультиинские (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. (озера 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.

**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».

**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.

**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 литогеодинимики 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.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** дана общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы исследования, определены объекты, цели, задачи и практическая значимость исследования, описан фактический материал и личный вклад соискателя, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассматриваются методы изучения донного осадка озер. Описаны преимущества озерных отложений как палеоклиматического архива и теоретические основы их применения при проведении температурных реконструкций. Рассматривается история развития изучения донных отложений в разных регионах мира на протяжении последних 100 лет (De Geer, 1912; Anderson et al., 2002; Суббето, 2009; Zolitschka et al., 2015). Расписаны основные процедуры проведения полевых работ и отбора материала исследования. Особое внимание уделяется лабораторным исследованиям с описанием различных видов анализов донного осадка (микро-РФА-СИ, КР-спектроскопия, работа с электронным микроскопом) и методика работы с данными. Представлена методика построения количественных реконструкций, отображающих зависимость геохимических параметров осадка и инструментально замеренных метеоданных.

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

**Географические условия.** Озеро Кучерлинское, Малое и Среднее Мультинские располагаются на территории Усть-Коксинского района Республики Алтай, в южной части Горного Алтая на северном макросклоне Катунского хребта. Кучерлинское озеро расположено в верховьях долины р. Кучерлы в гребневой части Катунского хребта на высоте 1790 м. Площадь зеркала 3 км<sup>2</sup>, размеры 4670 × 770 м. Основной объем воды поступает с ледника Мюштуайры, одного из крупнейших ледников массива г. Белухи.

Памятник природы «Мультинские озёра» располагается в среднегорной части Центрального Алтая, на северо-западном окончании Катунского хребта, в верхней. Озеро Среднее Мультинское расположено на высоте 1740 м, длина 2550 м, максимальная ширина 750 м, средняя глубина 14 м. Площадь зеркала

оз. Нижнее Мультиинское 1,7 км<sup>2</sup> (линейные размеры 2470 × 900 м), средняя глубина 21,5 м, водосборная площадь 77 км<sup>2</sup>.

**Геологическое строение.** В пределах водосборных бассейнов Кучерлинского озера, Среднего и Нижних Мультиинских на поверхность выходят отложения венда – нижнего кембрия и верхнего кембрия – нижнего ордовика. Венд – нижнекембрийские породы сложены песчаниками и алевролитами, отложения верхнего кембрия – нижнего ордовика представлены мощной флишеидной толщей, сложенной переслаивающимися песчаниками, алевролитами, глинистыми сланцами.

**Отбор образцов и пробоподготовка.** Керн донных осадков (115 см) озера Кучерлинское был извлечен с помощью ударной трубки со льда в марте 2018 г. с глубины 45 м. Отбор керна донных отложений оз. Нижнее Мультиинское MN-03 и MN-02 (1,56 м, глубина отбора (г.о.) 22 м; 410 мм, г.о. 17 м) и Среднее Мультиинское MS-01 (250 мм, г.о. 17 м) происходил в июле 2020 г. Отбор происходил с применением ударного пробоотборника “Uwitec Piston corer”, Австрия.

В лабораторных условиях проводилось 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 для непрерывного РФА-сканирования.

После доставки проб в ИГМ СО РАН (Новосибирск), изготавливались твердые препараты путем лиофильной сушки и пропитки эпоксидной смолой по методике (Lamoureaux S.F., 1994). Для анализа содержания химических элементов использовались плоскопараллельные образцы 2-миллиметровой толщины с пришлифованной поверхностью, изготовленные из твердых препаратов донных осадков. Из твердых препаратов также были изготовлены оптические шлифы (рис).

#### **Методы исследования.**

*Подсчет визуально выделяемых слоев.* Просмотр шлифов выполнялся с помощью оптического микроскопа и высокоразрешающего сканера. Донные осадки оз. Кучерлинское отличаются наличием ритмичной слоистости. Темные слои соответствуют зимнему периоду, а светлые — летнему (рис.1).

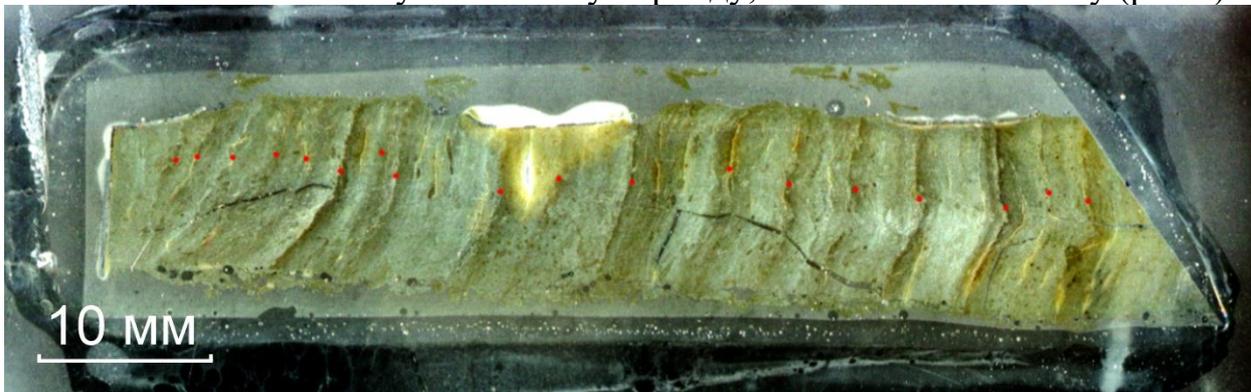


Рисунок 1. Пример подсчета визуально выделяемых слоев (пара темный-светлый) на скане шлифа Кч-1. Начало слоя маркируется красной точкой.

*Изотопные исследования.* Распределение активности изотопов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  используемые для верификации датировки верхнего интервала керна (0-200 мм для керна оз. Кучерлинское и 0-100 мм для керна оз. Нижнее и Среднее Мультиинские), сделаны в Аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск).

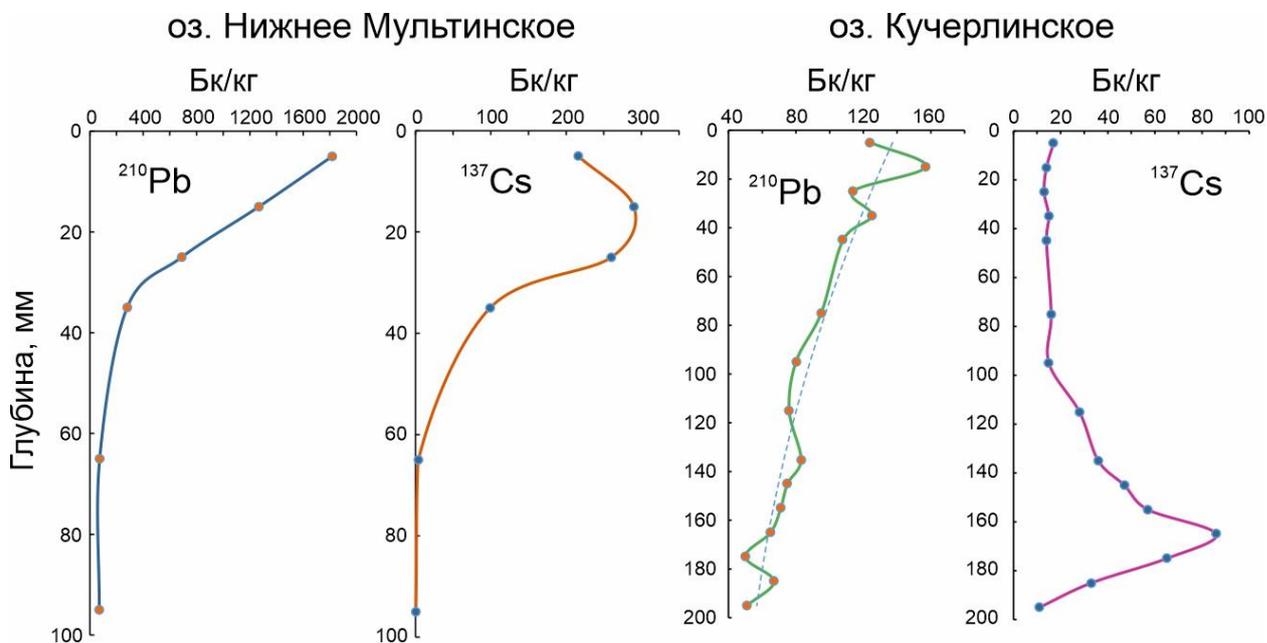


Рисунок 2. а. Распределение активности изотопов  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  вдоль верхней части (0-200 мм) керна донных осадков оз. Кучерлинское и верхней части (0-100 мм) керна оз. Нижнее (MN-02) и Среднее Мультиинское (MS-01).

Полученные изотопные данные для осадка позволяют определить максимальную активность  $^{137}\text{Cs}$  на глубине 160-170 мм (Куч\_2018-2), 10-20 мм (MN-03) и 30-40 мм (MN-02) от границы вода-осадок (рис.2). Это соответствует периодам глобальных атмосферных выпадений, связанным с ядерными испытаниями на Новоземельском полигоне в 1961-62 гг. (Appleby, 1997). На основании распределения активности  $^{137}\text{Cs}$  доказано, что слоистость оз. Кучерлинское имеет годовой характер.

**Аналитическая микростратиграфия.** 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; Darin et al., 2014). Для анализа использовались 2-мм плоскопараллельные образцы, приготовленные из твердых препаратов донных осадков. Пластины 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

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- /неупруго- рассеянного 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.

### Результаты.

*Построение возрастной модели.* Для построения возрастной модели керна оз. Кучерлинское на всю глубину опробования (0-1120 мм) применялись данные визуального подсчета годовых слоев, распределение активности изотопов. Также с разных интервалов происходил отбор образцов осадка для проведения радиоуглеродного датирования (рис.3).

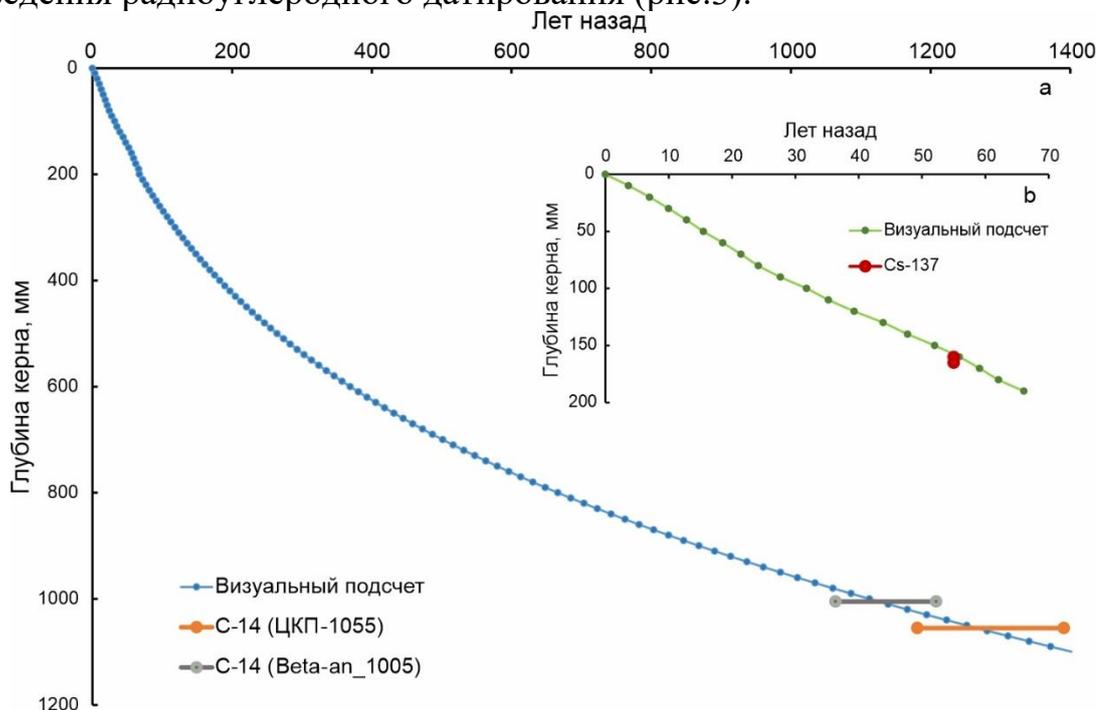


Рисунок 3. А - возрастная модель (глубина керна – возраст слоя осадка) для керна оз. Кучерлинское на полную глубину опробования. Б – возрастная модель для верхнего интервала керна 0-200 мм по данным подсчета слоев и изотопных анализов  $^{137}\text{Cs}$ .

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

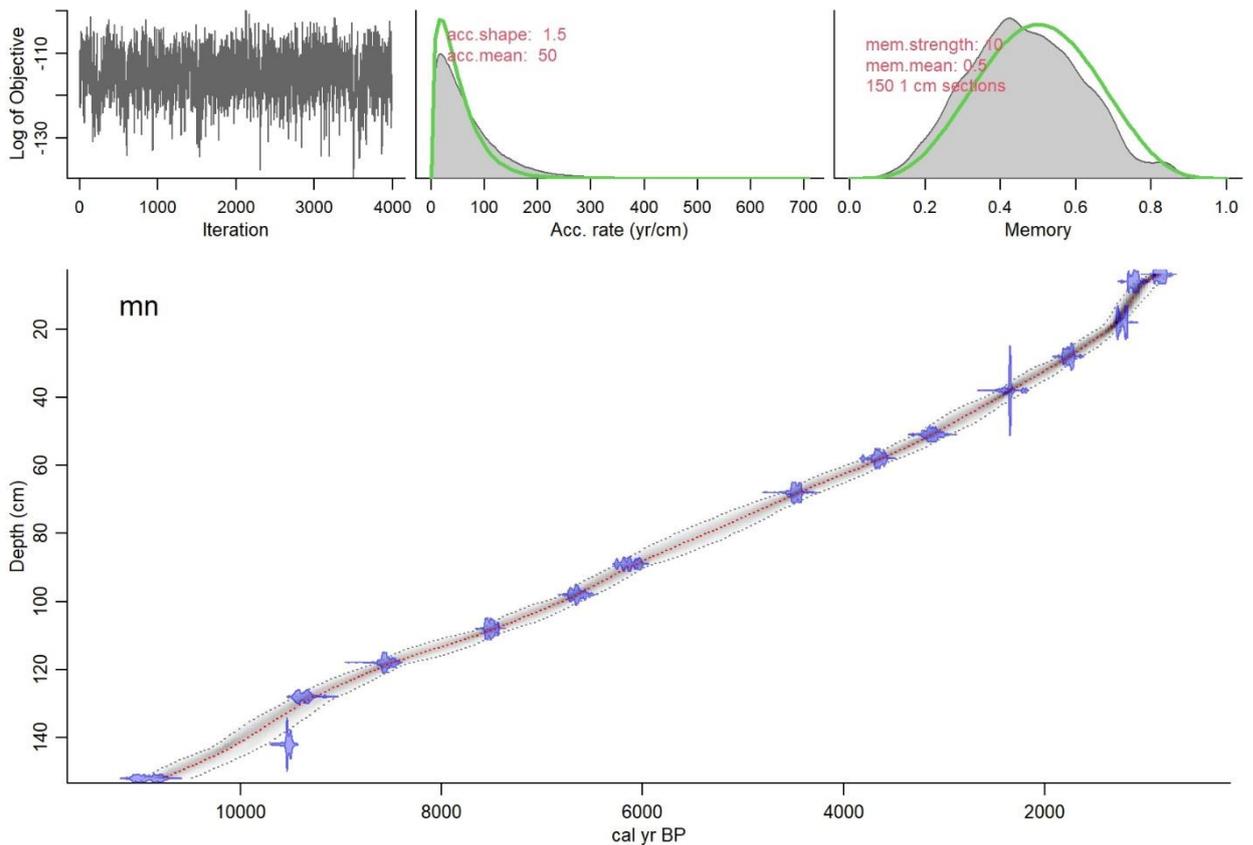


Рисунок 4. Возрастная модель (0-1520 мм) накопления осадка в оз. Нижнее Мультиинское (создана с помощью алгоритма Vascon для среды R).

На основании полученной возрастной модели проводился пересчет линейной глубины керна в возрастную.

*Поиск следов катастрофических событий.* В непрерывном процессе осадкообразования возможны событийные нарушения, связанные с резким изменением внешних условий, в первую очередь погодно-климатическими и сейсмическими событиями. 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.5). Единственным геохимическим индикатором выделяющимся во временных рядах аналитических данных является отношение Rb/Sr на интервале 496-522 мм.

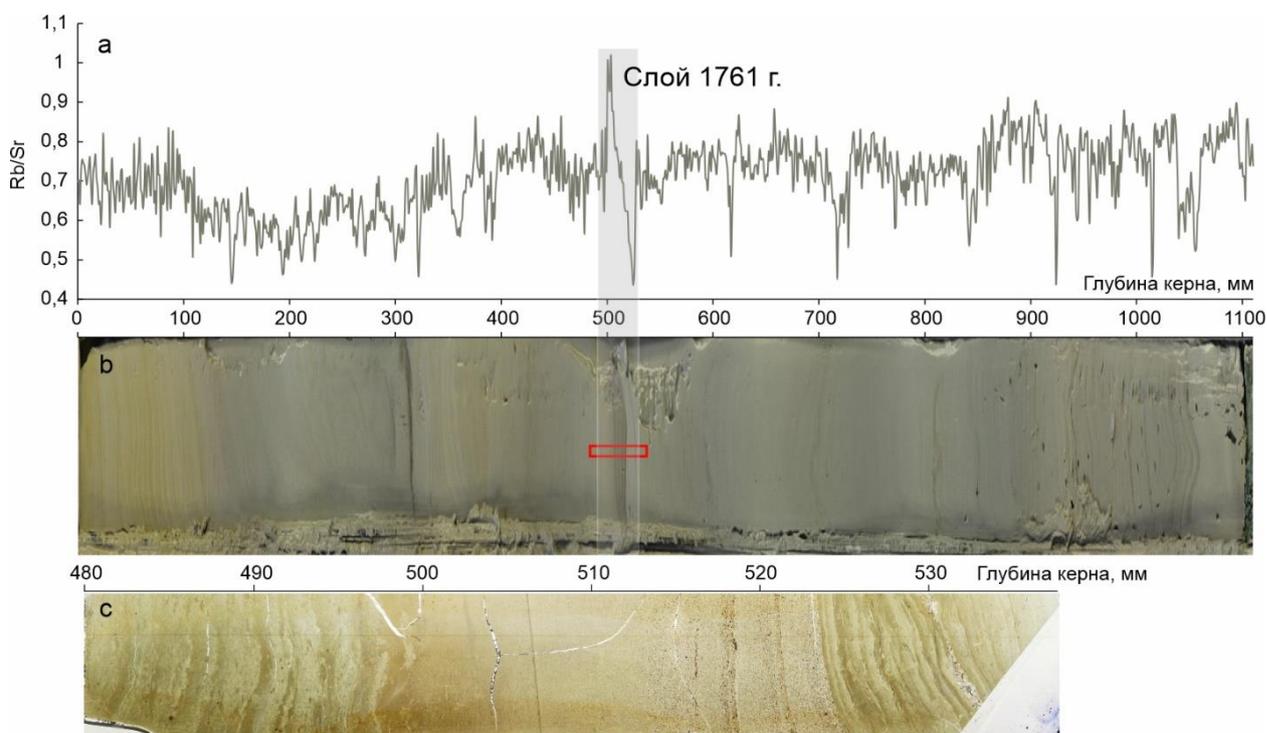


Рисунок 5. А) Профиль распределения отношения Rb/Sr на линейной шкале; б) фотография поверхности влажного керна Куч\_2018; в) фотография шлифа Кч-10 (интервал 480-530 мм). Красным показан фрагмент осадка, соответствующий оптическому шлифу.

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 выносятся 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 позволяет оценить возраст события в 1764 г.н.э. В пределах погрешности возрастной модели это совпадает с датой исторического Монгольского землетрясения, произошедшего в 1761 г. (Хилько и др., 1985).

#### *Построение температурной реконструкции региона исследования*

Для поиска взаимосвязи между геохимическими параметрами осадка и погодно-климатическими данными необходим достаточно длинный ряд региональных инструментальных метеонаблюдений. Набор температурных данных для большинства метеостанций не превышает период последних 100-150 лет.

Далее методом многомерной линейной регрессии выявлялось наличие функциональной зависимости временной изменчивости химического состава донных отложений от температурного режима. В результате получены трансферные функции (многопараметрические линейные регрессионные уравнения), позволившие с достаточно высокой точностью смоделировать среднегодовую температуру на интервале, для которого есть набор

инструментально замеренных метеоданных. В случае высокой корреляции между инструментальным и модельным температурными рядами, полученная функция применяется для построения температурной реконструкции на всю длину керна.

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.

В качестве геохимического индикатора климата для оз. Нижнее Мультиинское выбрано отношение  $Br/Rb$ . 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 (Voës et al., 2011).

С использованием методических приемов, подробно описанных в (Бабич и др., 2015), методом множественной регрессии построена функция, связывающая среднегодовую температуру с геохимическими данными (рис.6). Функция среднегодовой температуры для оз. Нижнее Мультиинское имеет вид:  $T = 41,168 \times Br/Rb - 3,6314$ . Символы элементов обозначают концентрацию этого элемента в г/т (ppm).

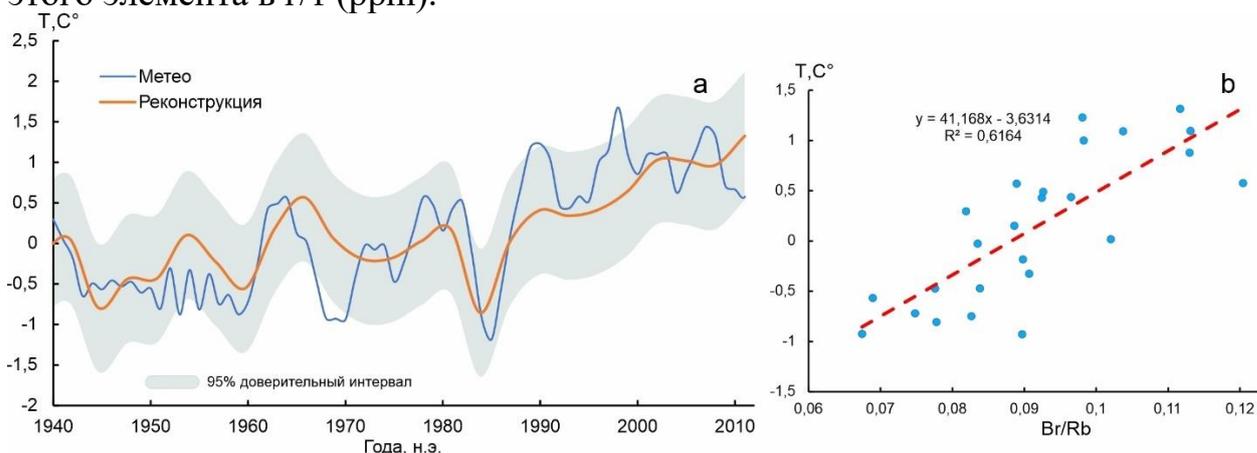


Рисунок 6. а. Сравнение реконструкции с инструментальными данными на интервале 1940-2016 гг. б. Линейная связь температуры с отношением  $Br/Rb$  в датированных слоях донного осадка опорного разреза.

В донных отложениях оз. Кучерлинское содержания  $Br$  оказались ниже предела обнаружения. Для установления связи элементного состава, применялся более широкий набор элементов:  $T = 1,104 \times Ti + 0,131 \times Ni - 0,939 \times Sr + 1,535 \times Y + 2,920 \times Nb - 1,623 \times Mo - 7,505$ .

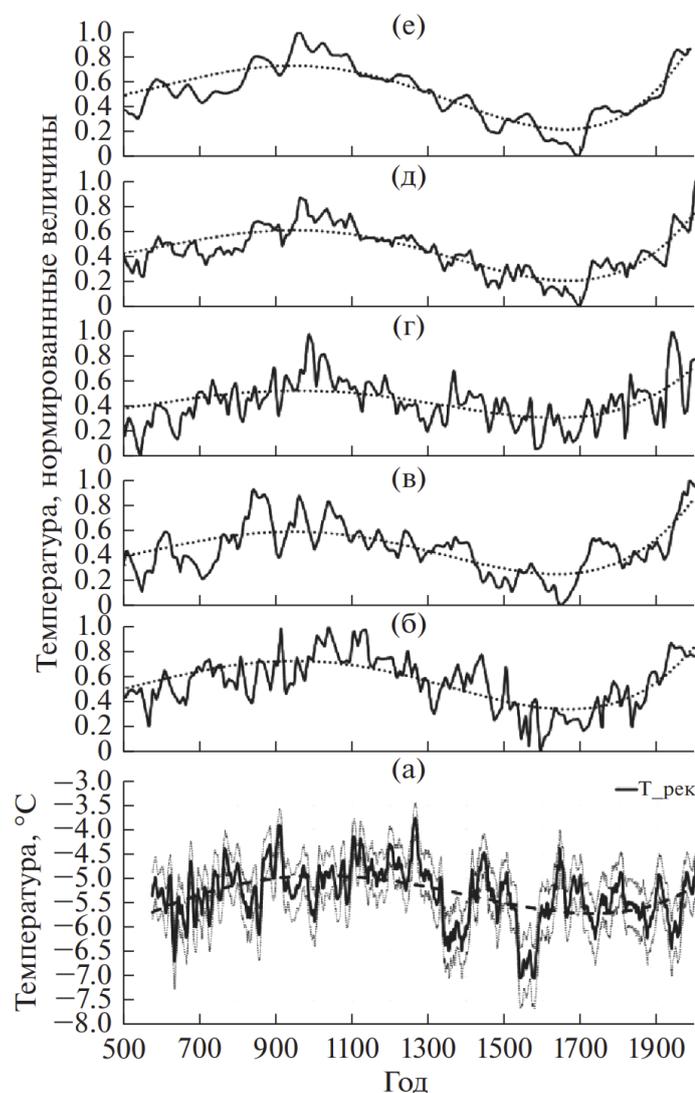


Рисунок 7. Сравнение температурной реконструкции с литературными данными (Дарьин и др., 2021). (а) – реконструкция по литолого-геохимическим данным осадков оз. Кучерлинское (данная работа); (б) – Северное полушарие, А. Moberg, 2005; (в) – Китай, В. Yang, 2002; (г) – С.-В. Европа, V. Klimentko, 2014; (д) – Северное полушарие, В. Christiansen and F.C. Ljungqvist, 2012; (е) – Северное полушарие, IPCC, 2013.

На рис.7 показано сравнение полученной температурной реконструкции для оз. Кучерлинское с рядом глобальных реконструкций Северного полушария. Представленные глобальные реконструкции для регионов Северного полушария достаточно хорошо совпадают с реконструкцией автора, что позволяет сделать вывод о правильности использованного методического подхода и полученных результатов.

### ГЛАВА 3. ОЗЕРО ПЕЮНГДА (ЭВЕНКИЯ)

**Географические условия.** Озеро находится в 30 км от эпицентра взрыва Тунгусского космического тела (ТКТ) и относится к ГПЗ "Тунгусский" расположенному в Эвенкийском район Красноярского края. В орографическом отношении территория приурочена к центральной части Средне-Сибирского плоскогорья. Преобладающие абсолютные отметки высот

– 360-550 м. Озеро Пеюнга представляет собой пресноводное озеро округлой формы диаметром более 800 м и максимальной глубиной до 30 м.

**Отбор образцов и пробоподготовка.** В сентябре 2022 года из оз. Пеюнга было отобрано два керна длиной 1187 и 1067 мм с глубины 26 м. Отбор осуществлялся с помощью гравитационного пробоотборника UWITEC. На глубине 8-9 см наблюдается наличие визуально выделяемого светлого слоя мощностью до нескольких мм (рис.8).

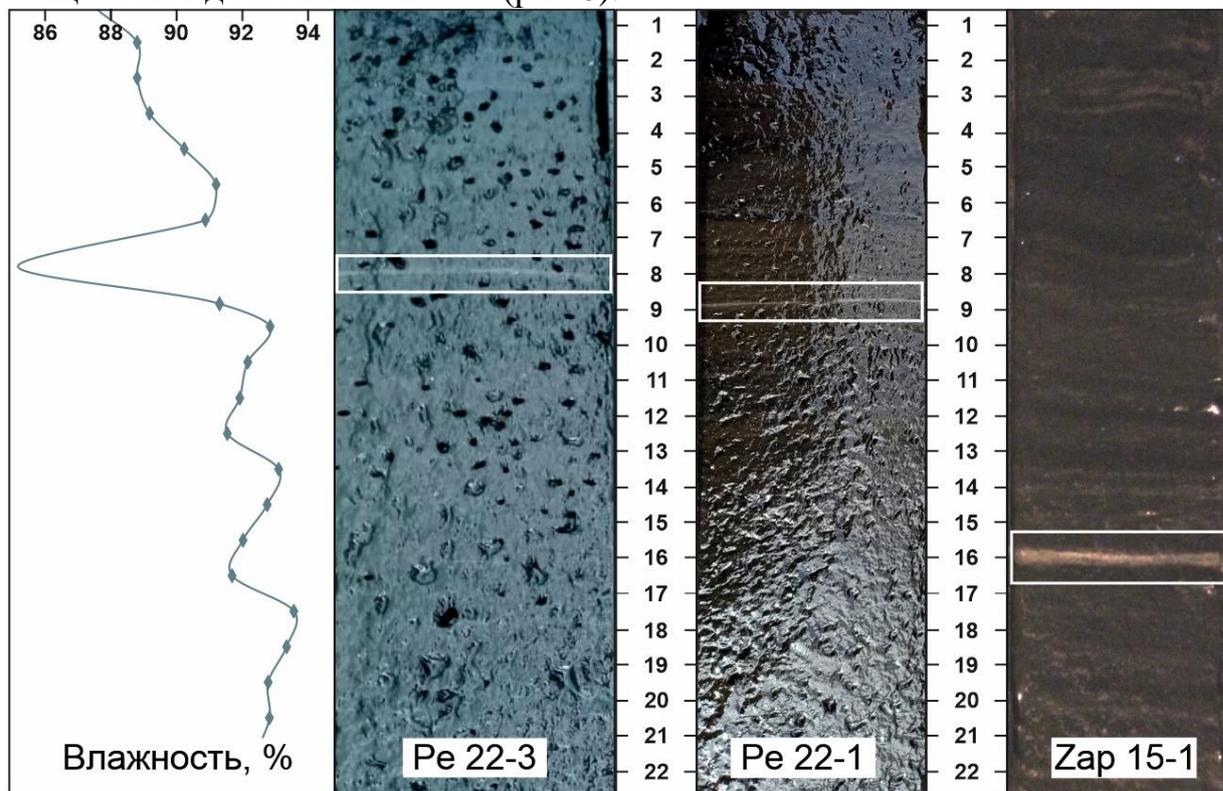


Рисунок 8. Фрагмент верхней части кернов донных отложений озера Пеюнга (Pe-22-1, Pe-22-3) и озера Заповедное (Zap-15-1), глубина в см от границы вода-осадок. Белым выделен интервал содержащий аномальный слой 1908-10 гг. Слева – изменение влажности на интервале 0 – 220 мм для керна Pe-22-3.

В марте 2015 г. с озера Заповедное, расположенного в 5 км южнее оз. Пеюнга, был отобран керн Zap-15-1 (380 мм). Для оценки скорости осадконакопления проведено измерение распределения активности изотопов  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . В керне 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. Светлый слой, расположенный на глубине более 70 мм в донном осадке озера Пеюнга, вероятно, имеет схожее происхождение, и может быть датирован 1908-1911 гг. (Дарьин и др., 2020).

**Построение возрастной модели.** В шлифах донного осадка наблюдается ритмичная слоистость, которая по данным распределения положения слоя 1908 г. имеет годичный характер. Подсчет проводился по визуально выделяемым парам слоев. Перерывов в слоистости не наблюдалось, однако не во всех случаях слои выделяются однозначно. Это может быть связано как с условиями осадконакопления, так и с разрушениями структуры

осадка в процессе изготовления оптического шлифа. Подсчет проводился по максимальному и минимальному количеству визуально выделенных слоев для каждого интервала глубин в 5 мм.

Полученные данные использовались для оценки линейной скорости осадконакопления (мм/год) для каждого интервала длиной в 5 мм. Скорость осадконакопления для “слепых” участков керна (без визуальных слоев) оценивалась экстраполяцией данных для соседних выше и ниже расположенных интервалов. Минимальные и максимальные оценки скорости осадконакопления использовались для пересчета линейных размеров глубины керна во временные ряды и построения возрастной модели (рис.9).

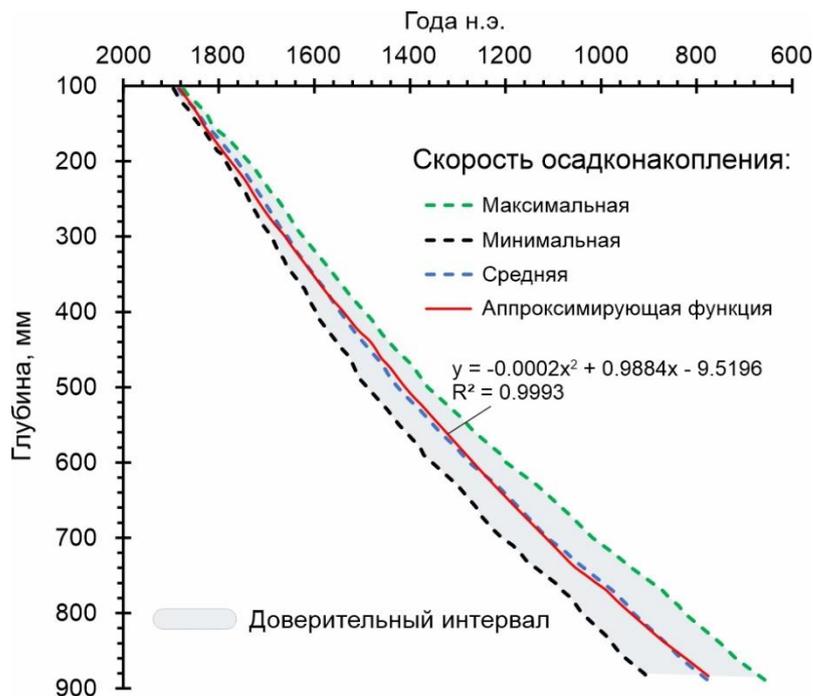


Рисунок 9. Возрастная модель на глубину опробования 100–900 мм. Максимальная — подсчет только надежно выделяемых слоев, минимальная — надежных и предполагаемых.

**Геохимическая модель образования аномального слоя 1908-10 гг.** 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. Вместе со шлифами с помощью электронного микроскопа происходило изучение порошковых проб. Из порошковых проб проводилось выделение тяжелых минералов с использованием бромформа. Пробы разделялись на две фракции — легкую и тяжелую. Таким способом обработано 10 проб легкой фракции и 10 проб тяжелой фракции. В легкой фракции преобладают кварц, слюдисто-глинистые агрегаты и полевые шпаты. Среди минералов тяжелой фракции преобладает анатаз, также встречаются титаномагнетит, магнетит, пироксен и амфибол.

*Спектроскопия комбинационного рассеяния.* Методы КР-спектроскопии использовались для идентификации Ti-содержащих минералов с применением спектрометра HR-800 (Horiba Jobin Yvon). В результате применения КР-спектроскопии установлено, что Ti-содержащие минералы представлены

анатазом, получены данные о распространении включений анатаза в пределах слоя аномальной мощности. На рис.10. зерна анатаза представлены ярко-желтым цветом.

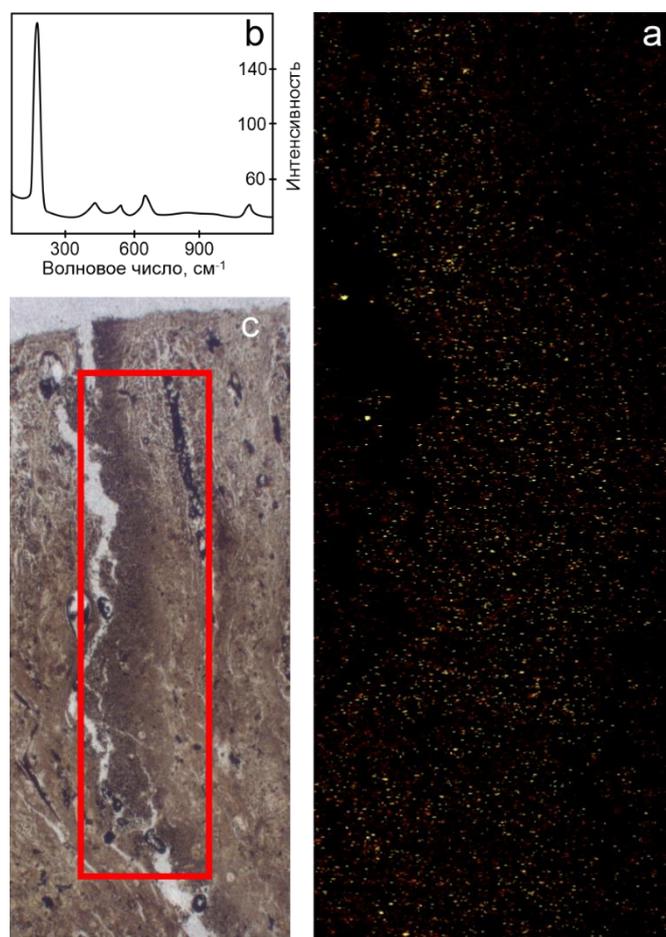


Рисунок 10. а) Фотография включений анатаза и б) КР-спектр, отвечающий данному минералу. с) показан фрагмент шлифа Рсu-22-3, в пределах которого проводилось сканирование.

*Сканирующий микроанализ.* 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. 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 органической компоненты, что выразилось в отрицательных аномалиях в содержаниях таких элементов, как Br, Mo, U и ряде других.

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. Источником сноса являются долериты дифференцированных интрузий комплекса габбродолеритов, получившие широкое распространение в пределах водосборной площади (Варганов и др., 2015).

Полученные данные позволяют сделать вывод о связи образования слоя аномальной мощности со взрывом ТКТ в 1908 г. Во время взрыва происходило интенсивное поступление материала с территории водосбора в осадок озера.

### Построение температурной реконструкции.

Для выявления геохимических индикаторов, связанных со среднегодовыми температурами в регионе исследования, использовались данные с ближайшей метеостанции в пос. Ванавара, расположенной в 40 км от оз. Пеюнгда. Функция, показывающая связь среднегодовой температуры с составом осадка после исключения элементов с незначительным влиянием (менее 3 % в сумме), представлена следующим образом:  $T = 5.389 \times Co/Inc + 3.887 \times Br + 1.443 \times Rb - 5.657$ . Отношение  $Co/Inc$  определяется рентгеновской плотностью вещества в точке измерения и в ряде случаев коррелирует с климатическими параметрами (Darin et al., 2003).

Сравнение полученной реконструкции с литературными данными (рис.11) демонстрирует хорошее соответствие основных климатических показателей и трендов.

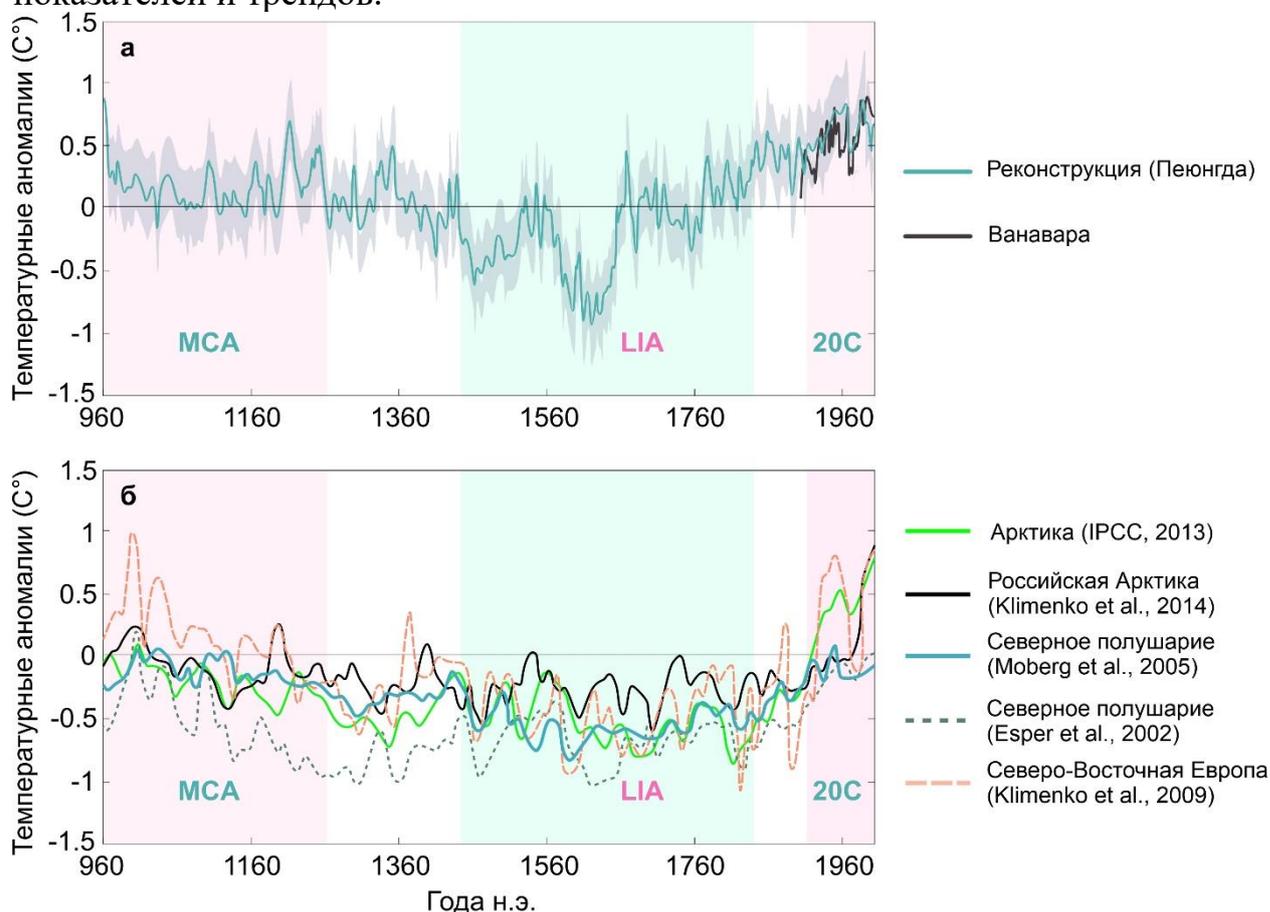


Рисунок 11. а — инструментальные метеоданные п. Ванавара, доступные с 1895 по 2000 гг. (<https://climexp.knmi.nl>; <http://meteo.ru/data/156-temperature>) и реконструированные изменения температуры в районе оз. Пеюнгда, серым показан интервал неопределенности (Новиков и др., 2024); б — литературные данные: 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 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.

#### **ГЛАВА 4. ОЗЕРО ЧАША (КАМЧАТКА)**

**Географические условия.** Объектом исследования являются донные осадки озера Чаша, расположенного в одноимённом кратере на территории Южной Камчатки в центральной части района интенсивного базальтового вулканизма в плейстоцене-голоцене - лавового плато Толмачев дол (Дирксен и др., 2002). Диаметр главного кратера около 1,2 км, на его дне расположено озеро Чаша. Озеро, изометричное в плане, имеет размеры 700 x 500 м. Глубина достигает 45,8 м.

**Отбор образцов и пробоподготовка.** Полевые работы проводились в августе-сентябре 2023 г. С плавучей платформы с применением гравитационного пробоотборника отобрано три керна длиной 780-900 мм (Chasha-2023-A,B,C). Отбор происходил в самой глубокой точке озера - 45,8 м.

В лабораторных условиях керна вскрывался вдоль оси отбора. Из половины каждого керна взяты пробы длиной 17 см, используемые для непрерывного сканирования. Вторая половина керна нарезана с шагом 1 см для изучения распределения изотопов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$ , необходимого при датировки верхних слоев. Так же происходил отбор образцов для радиоуглеродного анализа. На рис.12 представлены фотографии верхних 170 мм двух кернов и оптических шлифов, приготовленных из твердых препаратов.

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

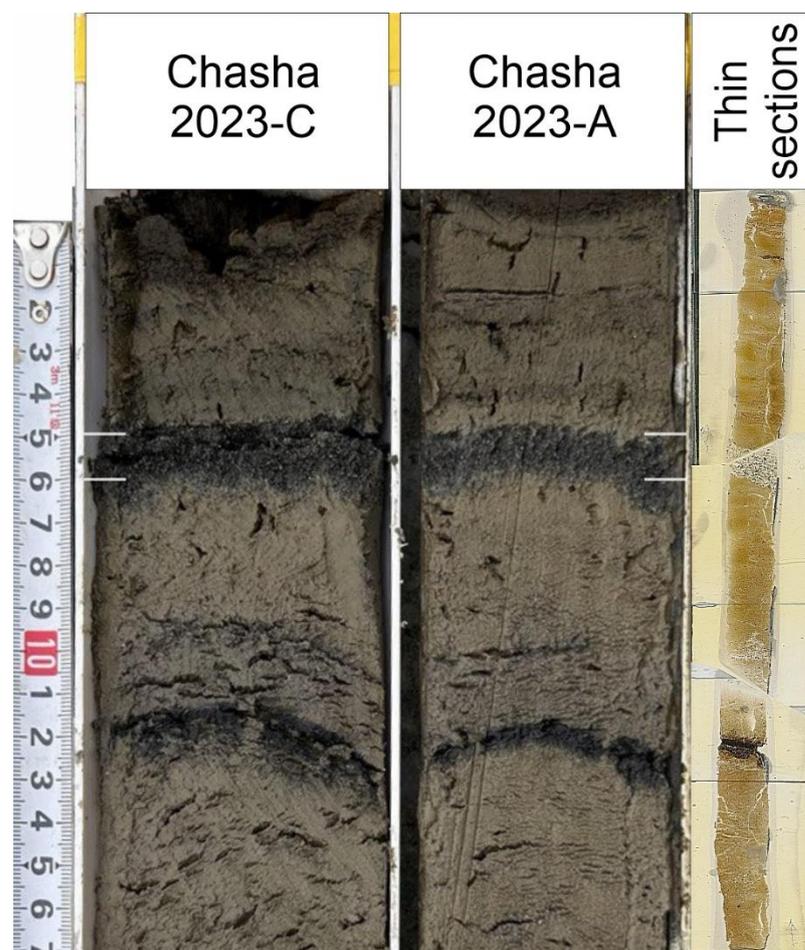


Рисунок 12. Фотографии верхних 170 мм вскрытых кернов донных осадков озера Чаша и оптических шлифов, приготовленных из твердых образцов, импрегнированных эпоксидной смолой.

**Сканирующий  $\mu$ РФА-СИ.** Непрерывный сканирующий микроанализ донного осадка оз. Чаша проводился в ЦКП “Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения” (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск).

**Изотопные исследования.** Распределение активности изотопа  $^{137}\text{Cs}$  получено в Институте Геологии и Геофизики Китайской Академии Наук (Пекин, <http://www.igg.cas.cn>). Радиоуглеродные возраста определялись методом ускорительной масс-спектрометрии в Лаборатории радиоуглеродного датирования Beta Analytic (США).

Полученные изотопные данные позволяют оценить положение максимальной активности  $^{137}\text{Cs}$  в 25-30 мм от границы вода-осадок. Получены три радиоуглеродные датировки: из верхней части керна, срединной и базального горизонта (22, 57 и 77 см от границы вода-осадок, соответственно) (табл.1). На основании полученных изотопных данных строилась возрастная модель «глубина керна-возраст осадка», которая использовалась для привязки данных РФА-СИ к годовой шкале.

**Результаты.** Для оценки скорости осадконакопления верхних 60 мм керна использованы данные о распределении изотопов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$  по глубине керна Chasha-2023-C. Для более точной оценки скорости попробуем идентифицировать маркирующий слой в интервале 50 - 60 мм, который, наиболее вероятно, соответствует извержению вулкана Ксудач 1907 г.

В статье (Zelenin et al., 2020) представлены данные об исследовании 11 образцов вулканического стекла из тефры KSht<sub>3</sub> (Ksudach caldera, Stübel Cone) извержения вулкана Ксудач в 1907 г. Рассмотрение литературных данных и полученных нами методом  $\mu$ РФА-СИ при сканировании твердого образца, позволило выделить ограниченное количество элементов доступных для сравнения.

На рис.13 представлены результаты сравнения данных об элементном составе слоя 1, выше- и нижележащих слоев и литературных данных о составе пеплов KSht<sub>3</sub>. Полученные результаты не противоречат предположению о соответствии слоя 1 пеплу извержения вулкана Ксудач 1907 г.

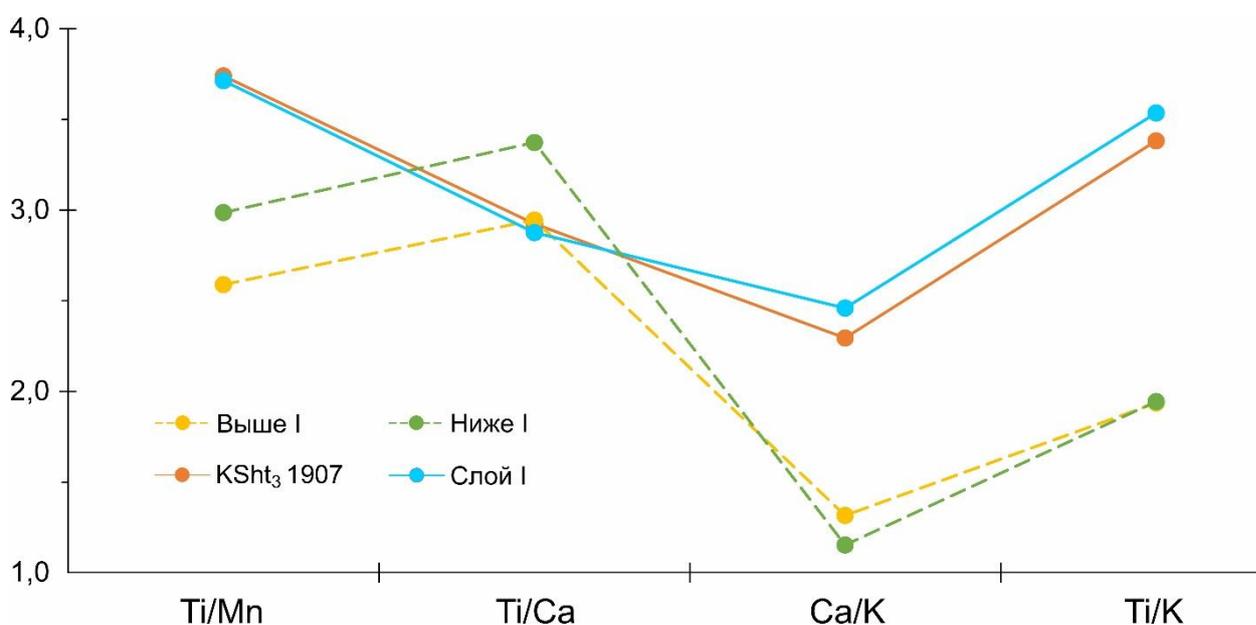


Рисунок 13. Сравнение литературных данных химического состава стекла из тефры KSht<sub>3</sub>, результатов работы с данными РФА для слоя 1907 г. (Слой I), а так же выше - (Выше I) и нижележащих (Ниже I).

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 KSht<sub>3</sub> (рис.14).

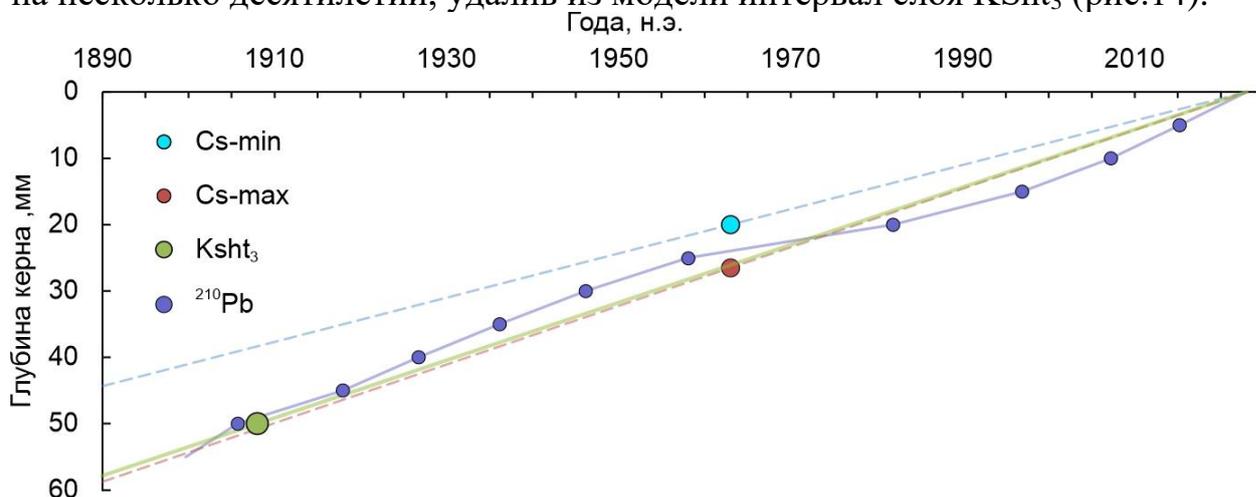


Рисунок 14. Возрастная модель глубина керна – возраст слоя для керна Chasha-2023-C по данным распределения активности изотопов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и идентификации слоя вулканического пепла KSh<sub>t3</sub> 1907 г.

На возрастной модели видно, что положение слоя тefры на глубине 50 мм в рамках погрешности соответствует положению 1907 г., полученному по данным распределения активности изотопов  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

## 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.

### Список публикаций по теме диссертации:

#### 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. Расказова, 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 Мультиинское (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 Мультиинское (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 Мультиинское (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.