

ГЕОХИМИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА ПЕЮНГДА (ТУНГУССКИЙ ПРИРОДНЫЙ ЗАПОВЕДНИК) И ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ПРИАРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

© 2024 г. В. С. Новиков^{а, *}, А. В. Дарьин^а, В. В. Бабич^а, Ф. А. Дарьин^б, Д. Ю. Rogozin^с

^аИнститут геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

^бЦентр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов” Института катализа СО РАН,
пр. Академика Лаврентьева, 5, Новосибирск, 630090 Россия

^сИнститут биофизики Сибирского отделения Российской академии наук,
ул. Академгородок, 50, Красноярск, 660036 Россия

*e-mail: novikovvs@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 26.10.2023 г.

После доработки 19.12.2023 г.

Принята к публикации 24.01.2024 г.

Озеро Пеюнгда содержит ежегодно слоистые донные осадки (варвы), позволяющие строить надежную возрастную модель на всю глубину керна. Уточнение возрастной модели на интервале последнего столетия сделано по наличию слоя аномальной мощности, связанного с падением Тунгусского космического тела в июне 1908 г. Результаты сканирующего μ РФА-СИ (элементный анализ по глубине керна) использованы для сопоставления с региональными среднегодовыми данными метеонаблюдений на временном интервале 1895–2000 гг. для создания трансферной функции: среднегодовая температура как функция от элементного состава датированного слоя донного осадка. Экстраполяция полученной функции на глубину опробования керна позволила построить реконструкцию изменения региональной температуры на временном интервале последнего тысячелетия с годовым временным разрешением. Сравнение полученной реконструкции с литературными реконструкциями для материковой части Арктического региона за последние 1000 лет показывает наличие общих трендов и экстремумов, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Ключевые слова: Эвенкия, Тунгусское космическое тело, озеро Пеюнгда, донные осадки, геохимия, микро-РФА, синхротронное излучение, температурные реконструкции

DOI: 10.31857/S0016752524050045, **EDN:** JBOXGE

ВВЕДЕНИЕ

Достаточно хорошо исследованная динамика температуры северного полушария за последние 2000 лет, складывается из набора локальных реконструкций, при этом пространственные закономерности остаются недостаточно определенными (Shi, 2012) и могут значительно меняться в разных регионах (Jones et al., 2009). Реконструкции температур в Арктике показывают, что среднегодовые температуры на протяжении последних тысячелетий были сопоставимы или даже выше, чем в 20-м веке (Hanhijärvi et al., 2013; PAGES2kConsortium, 2013; Klimenko et al., 2014; Semenov, 2021). На сегодняшний день, Арктика является регионом с самым быстрым повышением среднегодовой температуры поверхности. Скорость увеличения в два раза выше, чем в среднем по миру. Данный феномен также известен, как “полярное усиление” (Screen, Simmonds, 2010; Serreze, Barry, 2011).

Данные об изменении климата арктических и приарктических территорий материковой части Восточной Сибири практически отсутствуют. Наиболее подробные сведения о климатических вариациях в голоцене, характерных для Восточной Сибири, представлены для более южных территорий района оз. Байкал (Takahara et al., 2000; Bezrukova et al., 2010; Shichi et al., 2009).

Следует отметить, что создание климатических реконструкций с высоким временным разрешением ограничивается как сглаженными природными реакциями климатических систем на внешние изменения, так и трудностями отбора образцов и аналитическими затратами на исследование большого количества материала (Gunten et al., 2012). В то же время именно данные высокого временного разрешения с количественной калибровкой по современным инструментальным метеонаблюдениям являются наиболее объективными для понимания

динамики региональных природных климатических изменений.

Донные озерные осадки представляют собой архив палеоклиматической информации, накапливающейся непрерывно на протяжении длительного времени. Особенности процесса осадкообразования в озерах региона обусловлены тем, что они на протяжении 9 месяцев в году покрыты льдом. Обломочный и органический материал, поступающий в озера в результате весенне-летнего стока (аллохтонный материал) и образующийся в самом озере (автохтонный материал), осаждается на дно в осенне-зимний период, разделяясь по размеру частиц и плотности. Такой режим осадконакопления приводит к формированию донных отложений в виде ленточных глин (Sturm, 1979).

В настоящем исследовании 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 литолого-геохимического исследования керн донных осадков оз. Пеюнгда (Тунгусский природный заповедник). Представленный результат основан на следующих основных положениях.

1. Имеется визуально выделяемая годовая слоистость, что позволяет строить возрастную модель на всю глубину исследуемого керна. Детальный подсчет годовых слоев дает возможность оценить линейную скорость осадконакопления (динамику изменения толщины слоев) и построить надежную возрастную модель: глубина керна — возраст слоя осадка (Lamougeux, 2001; Brauer, 2004; Francus, 2004).

2. Наличие в верхних слоях осадка маркирующего слоя, связанного с взрывом Тунгусского космического тела в 1908 г., дает возможность более точного построения возрастной модели на интервале последнего столетия (Darin et al., 2020). Точность возрастной модели на этом временном интервале имеет важное значение при создании трансферной функции (сопоставление данных инструментальных метеонаблюдений и химического состава датированных слоев донных осадков).

3. Использование разработанных авторами методик исследования образцов донных осадков с высоким пространственным (следовательно — временным) разрешением и получением надежных аналитических результатов — синхротронного излучения для рентгенофлуоресцентного анализа (μРФА-СИ) (Darin et al., 2019; Darin et al., 2013), позволяет получать набор данных об изменении элементного состава датированных слоев осадка и проводить сравнения с одновозрастными данными региональных инструментальных метеонаблюдений. Установленные зависимости можно использовать при построении трансферных

функций, количественно связывающих изменение региональных метеопараметров с составом донных осадков.

4. Имеется достаточно длинный ряд региональных метеоданных (более ста лет), что повышает надежность выделения геохимических климатических маркеров и точность построения трансферной функции. Метеоданные, используемые для количественной калибровки трансферной функции взятые с сайта <https://www.knmi.nl/home>, охватывают интервал с 1895 г. по наши дни и хорошо коррелируют (коэффициент корреляции ~ 0.9) с имеющимися инструментальными метеоданными станции Ванавара для интервалов 1933–1989 и 2005–2018 гг. (meteo.ru), расположенной на расстоянии 30 км от оз. Пеюнгда.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРОБООТБОР

Озеро Пеюнгда находится в пределах государственного природного заповедника “Тунгусский” в Эвенкийском автономном округе, на расстоянии 30 км от предполагаемого эпицентра взрыва Тунгусского космического тела. Пеюнгда представляет собой пресноводное озеро округлой формы диаметром более 800 м и максимальной глубиной 30 м. Площадь составляет 0.5 км² (рис. 1).

В сентябре 2022 года из оз. Пеюнгда был отобран керн длиной 1187 мм. Отбор осуществлялся с помощью гравитационного пробоотборника UWITEC (Австрия) в центральной части озера. При отборе и последующей транспортировке особое внимание уделялось сохранности верхушки керна, имеющей важное значение при датировке интервала последних десятилетий.

Донные отложения оз. Пеюнгда представляют собой тонкодисперсные темно-коричневые и черные илы с большим содержанием органического материала и слабо выраженной слоистой структурой, в отложениях глубже 1 м характер осадка меняется на более плотный, с более выраженной слоистостью. На глубине 78–80 мм наблюдается наличие визуально выделяемого светлого слоя мощностью до нескольких мм.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробоподготовка

Вскрытие и разделка керна проводились в полевых условиях. Керн донных осадков разделялся вдоль оси отбора на две части. Первая половина керна была разрезана на дискретные образцы с шагом 10 мм для последующих физико-химических исследований. Вторая половина использовалась при изготовлении твердых препаратов, пропитанных эпоксидной смолой.

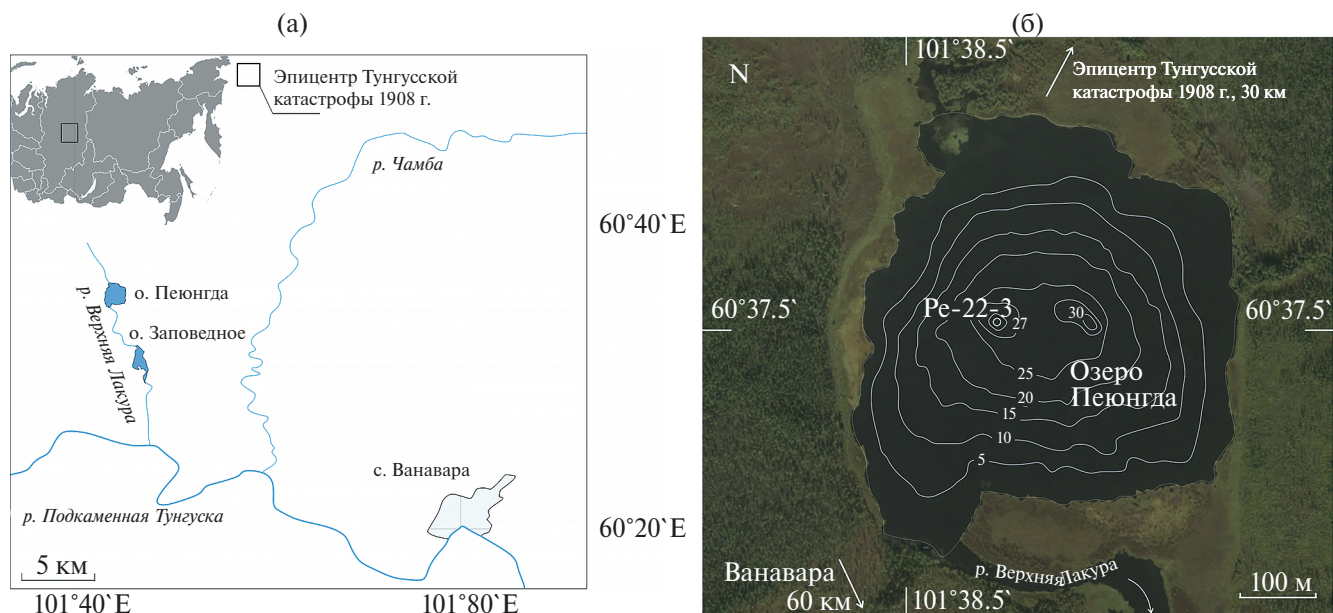


Рис. 1. а) Географическое положение оз. Пеюнгда; б) Данные батиметрии и место отбора керна (Rogozin et al., 2023).

Твердые препараты донных осадков готовились по методике, предложенной в работе (Boes, Fagel, 2008) и адаптированной для микро-РФА исследований. В полевых условиях алюминиевые контейнеры длиной 170 мм, шириной 25 мм и глубиной 10 мм в шахматном порядке погружались в поверхность влажного керна вдоль оси отбора с взаимным перекрытием в 10 мм, после чего извлекались с попавшим внутрь осадком без его перемешивания. Извлеченные алюминиевые контейнеры с влажным осадком (т.н. “плашки” slab) были аккуратно завернуты в несколько слоев пищевой стретч-пленки ПВХ и упаковывались в герметичные транспортные контейнеры для доставки в лабораторию. Всего из керна длиной 1187 мм было приготовлено девять “плашек”, полностью перекрывающих весь разрез. Во время транспортировки и последующего хранения не было зафиксированного повреждения исходной текстуры и потерь вещества донных осадков.

В лабораторных условиях ИГМ СО РАН “плашки” подвергались шоковой заморозке в жидком азоте. При этом не происходило образования крупных кристаллов льда, которые могли бы повлиять на исходную структуру осадка. Затем из образцов методом сублимационной сушки при температуре жидкого азота и давлении 3–10 мбар полностью удалялась влага. После чего образец, сохранивший исходную структуру, пропитывался смесью эпоксидной смолы, отвердителя и ацетона. Полимеризация происходила в сушильном шкафу при 60 °C в течение 3–4 суток. Из твердого препарата готовились пластинки (plate) для микро-РФА-сканирования толщиной 2 мм с плоскопараллельными

полированными поверхностями и оптические шлифы для визуального подсчета годовых слоев.

Сканирующий микроанализ образцов донных осадков

Сканирующий мРФА на пучках синхротронного излучения проводился в ЦКП “Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения” по методике (Darin et al., 2013). Использование мРФА-СИ при изучении донных осадков позволяет значительно снизить предел обнаружения и определять одновременно до 30 пороодообразующих и следовых элементов. Сканирование образцов проводилось последовательно от верха керна в глубину разреза.

Размер пучка возбуждающего синхротронного излучения с энергией 21 кэВ на образце составлял 1 мм вдоль оси сканирования и 2.5 мм поперек. Шаг сканирования составлял 1 мм, время измерения в точке — 30 сек. В каждой точке одновременно определялись следующие пороодообразующие и следовые элементы: K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo. Также контролировалось содержание элементов ниже пределов обнаружения в данных условиях V, Cr, Co, Ge, Se, Pb, Th и U. Расчет содержаний определяемых элементов проводился методом внешнего стандарта по аттестованной методике (Darin, Rakshun, 2013).

Дополнительно регистрировался параметр — отношение упруго-неупруго рассеянного на образце излучения (Co/Inc — рентгеновская плотность) — важный для литолого-геохимической характеристики материала донных осадков.

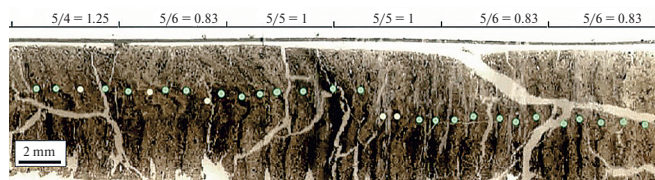


Рис. 2. Изображение участка шлифа донных осадков оз. Пеюнгда, полученное на оптическом сканере. Зелеными точками показаны уверенно выделяемые слои (минимум), желтыми — предполагаемые. Сверху показаны линейные скорости осадконакопления для каждого интервала глубин.

Пространственная (по глубине керна) привязка литолого-геохимических данных проводилась по первоначальным размерам каждого образца (“плашки”), с учетом их исходного положения в вскрытом влажном керне.

Варвохронология

Фотографии оптических шлифов получены на сканере CanoScan 5600F. Изображения с разрешением 2400 dpi, на которых видно чередование темных и светлых слоев, обрабатывались в графическом редакторе (рис. 2). 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. Пример подсчета для одного из шлифов представлен на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Построение возрастной модели для интервала 0–100 мм

Для построения возрастной модели использовались данные подсчета визуально выделяемых слоев в оптических шлифах. Выбирались участки фотографий, на которых можно было выделить слои на интервале 5 мм и более. 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.

Поскольку отбор керна происходил в сентябре 2022 г., изначально предполагалось, что верх керна может датироваться сформировавшимся

слоем 2021 г. Однако, принимая во внимание высокую влажность керна (~90 %), возможны потери и деформация верхних слабо консолидированных слоев как в процессе отбора, так и последующей транспортировки. Нами была сделана попытка оценить возможные потери и датировать верхний слой полученного твердого образца для правильного построения возрастной модели.

На рис. 3 представлен внешний вид (фотография) и график изменения влажности верхних 220 мм исходного керна.

На глубине 78–80 мм наблюдается наличие визуально выделяемого светлого слоя мощностью до нескольких мм. По данным сканирующего мРФА-СИ для данного слоя отмечаются повышенные содержания элементов (Rb, K, Ti, Sr, Y, Zr), характеризующих терригенный материал, поступающий в озеро с территории водосбора. Значительное повышение содержаний этих элементов в белом слое может свидетельствовать об усиленном терригенном сносе. Резкое понижение влажности в интервале 70–80 мм также свидетельствует об изменении состава осадка.

Вероятно, что это след события, связанного со взрывом Тунгусского космического тела в июне 1908 г. Причиной возникновения аномального слоя является нарушение задренованности территории в результате вывала леса и усиление сноса

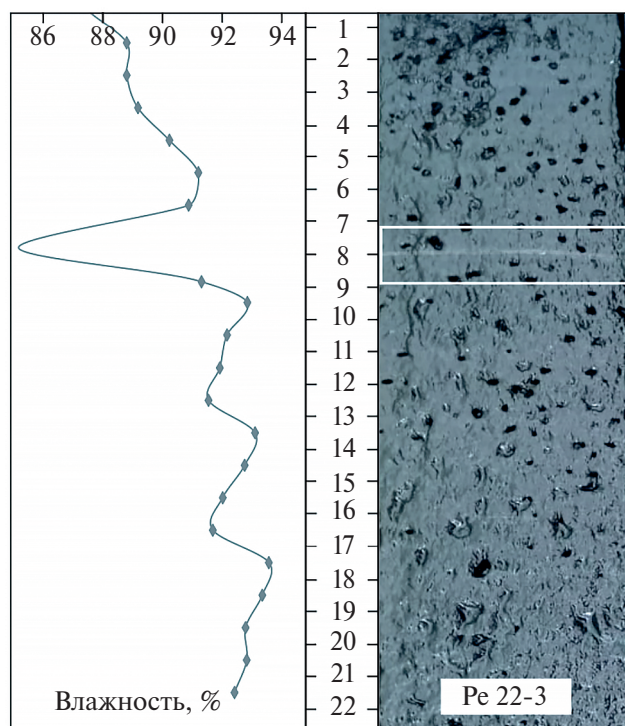


Рис. 3. Фотография исходного (влажного) керна. Выделен интервал, содержащий аномальный слой 1908–10 гг. Слева — изменение влажности на интервале 0–220 мм. Резко выделяется интервал 70–80 мм.

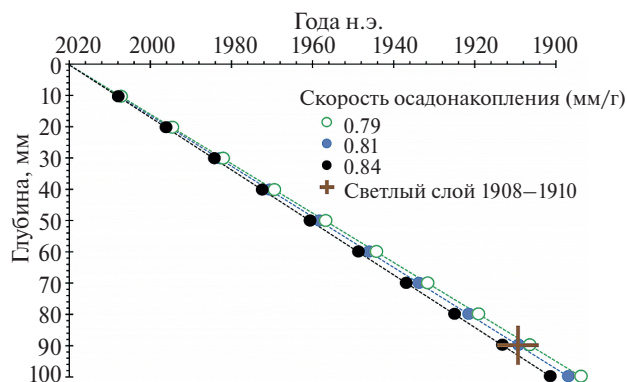


Рис. 4. Возрастная модель для верхних 100 мм керна. Линейная модель построена для трех вариантов средней скорости осадконакопления с учетом положения датированного слоя 1908–10 гг. и добавки возможных потерь верхних 10 мм керна.

терригенного материала. Повышение содержания терригенного материала в донных осадках привело к относительному уменьшению доли органической компоненты, что выразилось в уменьшении содержания таких элементов, как Br, Mo, U и других.

В 2015 г. в оз. Заповедное в 5 км от оз. Пеюнга (рис. 1) был отобран керн, в котором наблюдался светлый слой толщиной до 8 мм. Для оценки скорости осадконакопления проводились измерения распределения активности изотопов ^{137}Cs и ^{210}Pb . Полученная возрастная модель датирует этот слой 1908–1910 гг., что позволяет связать его образование со взрывом ТКТ (Darin et al., 2020). Светлый слой, в донном осадке оз. Пеюнга, вероятно, имеет то же происхождение и датируется 1908–10 гг.

Для более точного построения возрастной модели на интервале последнего столетия (~100 мм от верха керна) кроме данных о линейной скорости осадконакопления использовалось положение маркирующего слоя 1908–10 гг. (78–80 мм). В результате для верхних 100 мм была построена линейная возрастная модель с тремя скоростями осадконакопления — 0.79, 0.81 и 0.84 мм/год (рис. 4). При этом была получена оценка потерь верхних слабо консолидированных слоев в размере 10 мм или 12–13 лет. Таким образом, для корректного построения возрастной модели к глубине керна было добавлено сверху 10 мм.

Построение возрастной модели для интервала 100–900 мм

Оценка максимальной, минимальной и средней линейной скорости осадконакопления на глубине керна 100–900 мм проводилась также как и для верхнего интервала 0–100 мм. Полученные оценки скорости были использованы для построения возрастной модели на всю глубину опробования (рис. 5). Возрастная модель для средней скорости

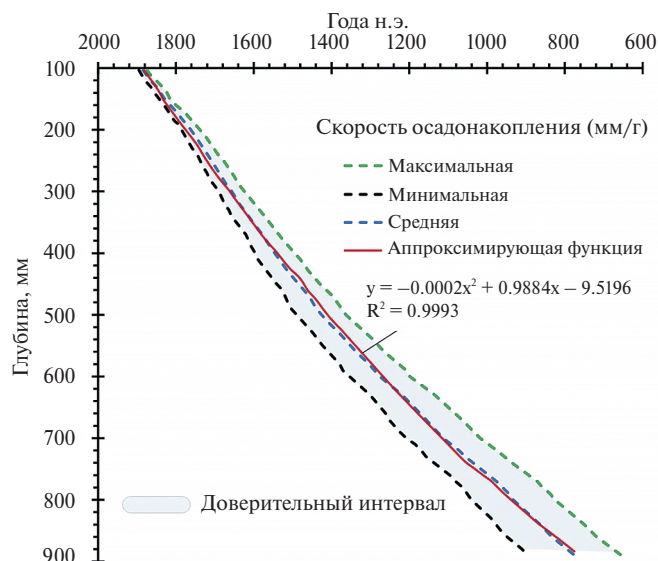


Рис. 5. Возрастная модель на глубину опробования 100–900 мм. Макс — подсчет только надежно выделяемых слоев, мин — надежных и предполагаемых. Серым показан интервал погрешности.

использована для расчета аппроксимирующей квадратичной функции (представлена на рис. 5), использованной для пересчета линейной (в мм) шкалы глубины керна во временную (лет назад).

Построение временных рядов геохимических данных

Используя линейную возрастную модель, полученную для верхних 100 мм керна, был проведен пересчет миллиметровой шкалы глубин в годовую. Интервал осадочного разреза, соответствующий аномальному слою 1908–10 гг. был убран из временного ряда, поскольку его элементный состав отличается от остальных участков керна и не связан с климатическими параметрами того времени.

Для интервала 100–900 мм для пересчета глубины во временной ряд была использована квадратичная функция. При пересчете глубин керна были получены дробные значения возраста, которые затем переведены в целочисленные. Таким образом данные об элементном составе керна были переведены во временные ряды. После этого полученные аналитические данные об элементном распределении на всю глубину опробования керна были усреднены с шагом в 3 года. Необходимость усреднения аналитических данных связана с тем, что размеры пучка возбуждающего излучения больше, чем расчетная толщина годового слоя. Поэтому при проведении измерений одновременно фиксировался рефлекс от двух или трех соседних слоев.

*Выделение климатических индикаторов.**Построение трансферной функции*

Для поиска взаимосвязи между литолого-геохимическими параметрами осадка и погодно-климатическими данными необходим достаточно длинный ряд региональных инструментальных метеонаблюдений. Ближайшая метеостанция находится в пос. Ванавара, расположенном в 30 км от оз. Пеюнга. Для метеостанции Ванавара имеется непрерывный ряд наблюдений с 1932 по 1989 гг. и с 2005 по 2020 гг. (<https://climexp.knmi.nl/gettemp.cgi?WMO=24908>). С сайта Climate Explorer (<https://climexp.knmi.nl>) была получена расчетная информация для координат оз. Пеюнга о среднегодовых температурах для временного интервала 1895–2020 гг. Сравнение расчетных и фактических метеоданных показало их хорошую сходимость (коэффициент корреляции ~0.9), что позволило в дальнейшем для сравнения 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 пересчитаны в средние 3-х годовые и сопоставлены с временным рядом литолого-геохимических данных для керна Пе-22–3 на этом же интервале. Используя метод множественной регрессии, с применением методических приемов, подробно описанным в работе (Babich et al., 2015), была построена трансферная функция, связывающие климатические параметры (среднегодовую температуру) с литолого-геохимическими данными.

Функция, отображающая зависимость среднегодовой температуры от элементного состава осадка, после редуцирования элементов, имеющих незначительное влияние (в сумме менее 3 %), выглядит следующим образом:

$$T = 5.389 \cdot \text{Co/Inc} + 3.887 \cdot \text{Br} + 1.443 \cdot \text{Rb} - 5.657,$$

где Co/Inc — отношение упруго/неупруго рассеянного на образце возбуждающего излучения, символ элемента обозначает концентрацию этого элемента в ppm.

По входящим в уравнение параметрам следует отметить, что содержание брома может рассматриваться как мера органической компоненты донного осадка как аллохтонного, так и автохтонного происхождения, а содержание рубидия рассматривается как мера вещества терригенного сноса. Отношение Co/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 отношения двух видов материала (терригенного и органогенного происхождения), формирующего донные отложения в оз. Пеюнга в зависимости от среднегодовой температуры.

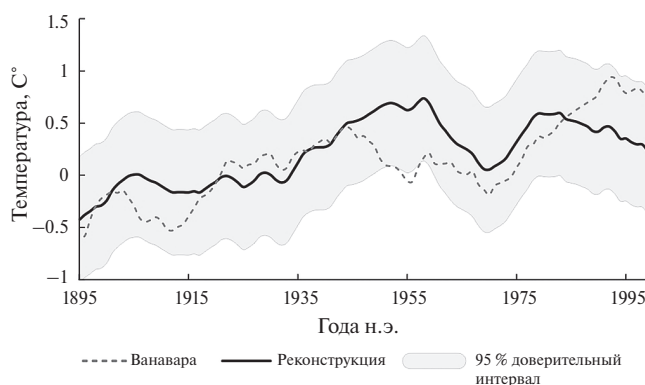


Рис. 6. Сглаженные 10-летние температуры на интервале 1895–2003 гг. (<https://climexp.knmi.nl>) и реконструкция по геохимическим данным, 95 % интервал погрешности реконструкции.

Для полученной функции коэффициент корреляции между исходными метеоданными и расчетными величинами составляет +0.58. Для 105 точек (1895–2000 гг.) эти коэффициенты являются значимыми ($p = 0.99$) и свидетельствуют о наличии устойчивой линейной связи между изменением среднегодовых температур и элементным составом осадка, накапливающимся под влиянием внешних климатических условий. На рис. 6 представлена реконструкция температуры и 95 % интервал погрешности, а также сглаженный 10-летний метеоряд на интервале расчета трансферной функции (1895–2003 гг.), для которого имеется набор инструментально замеренных метеоданных.

*Построение температурной
палеореконструкции*

Временной ряд литолого-геохимических данных на интервале опробования керна 100–900 мм был детально рассмотрен для обнаружения 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) 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 трансферную функцию (1) для расчета температурной реконструкции на всю глубину опробования.

На рис. 7а представлена полученная региональная реконструкция средних 3-х годовых температур воздуха приарктической территории Восточной Сибири, построенная с годовым временным разрешением, количественно калиброванная по данным региональных метеонаблюдений. Сравнение полученной реконструкции с литературными данными (рис. 7б) показывает хорошее совпадение основных климатических показателей и трендов.

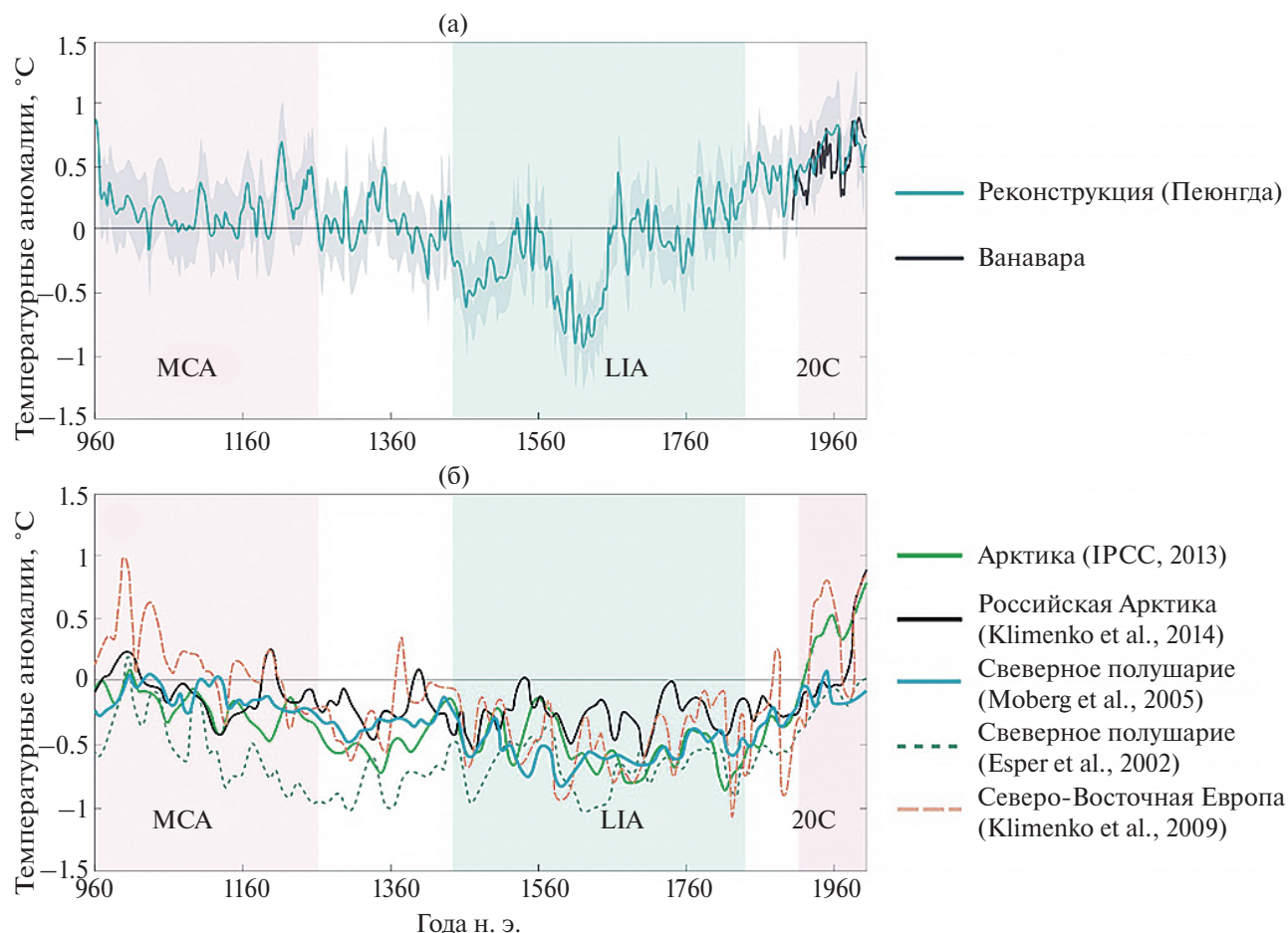


Рис. 7. а — инструментальные метеоданные п. Ванавара, доступные с 1895 по 2000 гг. (<https://climexp.knmi.nl>; <http://meteo.ru/data/156-temperature>) и реконструированные изменения температуры в районе оз. Пеюнгда, серым показан интервал неопределенности; б — литературные данные: Арктика — IPCC, 2013; Русская Арктика — Klimenko et al., 2014; Северное полушарие — Moberg et al., 2005 и Esper et al., 2002; Северо-восточная Европа — Klimenko et al., 2009. MCA — Средневековый климатический оптимум (X–XIII вв.), LIA — Малый ледниковый период (XIV–XIX вв.), 20C — современность.

Выделяется средневековое потепление (X–XIII вв.). Также, несмотря на имеющиеся небольшие отличия, отчетливо проявлен малый ледниковый период (XIV–XIX вв.), а также значительное повышение температуры, с начала XX в. Реконструированные температурные тренды имеют схожие периоды. Для большинства временных интервалов структура температурных вариаций совпадает.

В целом, представленные реконструкции совпадают достаточно хорошо, что позволяет говорить о правильности использованного методического подхода и полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Донные отложения оз. Пеюнгда представляют собой тонкослоистый осадок, содержащий ритмично-переслаивающиеся отдельные годовые слои (варвы). Подсчет отдельных пар-слоев позволяет строить возрастную модель глубина керна—возраст

слоя осадка с высокой точностью. Подсчет слоев возможен по снимкам шлифов, полученных на сканере с высоким разрешением. Так же необходимо проводить дополнительный контроль результатов подсчета сканирующим РФА-СИ с субмикронным пространственным разрешением. В оз. Пеюнгда и ряде других озер региона визуально и по геохимическим аномалиям выделяется слой, связанный с взрывом ТКТ в 1908 г., что позволяет верифицировать возрастные модели на интервале последнего столетия.

2. Использование современного аналитического метода микро-РФА на пучках синхротронного излучения дает возможность построения временных рядов литолого-геохимических данных о составе отдельных слоев донных отложений с высоким пространственным (0.1–1 мм), а следовательно — временным разрешением.

3. Значимая корреляция элементного состава датированных слоев донного осадка с региональными

инструментальными метеоданными позволяет строить трансферные функции и получать климатические палеорекострукции на интервале последних тысячелетий.

4. Полученная нами на основе исследования донных осадков оз. Пеюнгда температурная реконструкция, в пределах оцененных погрешностей, совпадает с литературными реконструкциями среднегодовых температур Арктики, что подтверждает ее надежность и правильность.

5. Представленная реконструкция региональных среднегодовых температур откалибрована по данным региональных метеонаблюдений, имеет количественную оценку погрешности и может использоваться для получения информации о природной периодичности климатических циклов.

Авторы выражают благодарность рецензентам и научному редактору М.И. Дину.

Подготовка твердых препаратов (В.С. Новиков), микро-РФА-СИ (Ф.А. Дарьин) образцов донных отложений, варвохронология, построение возрастной модели (А.В. Дарьин, В.С. Новиков), построение трансферной функции и реконструкции (В.В. Бабич) осуществлялись в рамках государственного задания Института геологии и минералогии им. Соболева СО РАН № 122041400214-9. Отбор проб донных отложений и анализ данных выполнены Рогозиным Д.Ю. за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 22-17-00185.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дарьин А.В., Бабич В.В., Калугин И.А., Маркович Т.И., Рогозин Д.Ю., Мейдус А.В., Дарьин Ф.А., Ракшун Я.В., Сороколетов Д.С. (2019) Исследование геохимических особенностей годовых слоев в донных осадках пресноводных озер методом рентгенофлуоресцентного микроанализа с возбуждением синхротронным излучением // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. **83** (11), 1572–1575.
- Дарьин А.В., Гольдберг Е.Л., Калугин И.А., Федорин М.А., Золотарев К.В., Максимова Н.В. (2003) Отношение интенсивностей упруго- и неупругорассеянного на образце синхротронного излучения — климатически коррелированный палеосигнал в историческом слое (1860–1996 гг.) донных осадков оз. Телецкое. Поверхность. *Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. **12**, 53–55.
- Дарьин А.В., Калугин И.А., Бабич В.В., Маркович Т.И., Грачев А.М., Дарьин Ф.А., Ракшун Я.В., Сороколетов Д.С. (2019) Поиск годично стратифицированных донных осадков в озерах Горного Алтая методом рентгенофлуоресцентного микроанализа с использованием синхротронного излучения. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. **83**, 243–246.
<https://doi.org/10.1134/S0367676519020108>.
- Дарьин А.В., Рогозин Д.Ю., Мейдус А.В., Бабич В.В., Калугин И.А., Маркович Т.И., Ракшун Я.В., Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С., Гогин А.А., Сенин Р.А., Дегерменджи А.Г. (2020) Следы Тунгусского события 1908 г. в донных осадках озера Заповедное по данным сканирующего РФА-СИ. *ДАН. Науки о Земле*. **492** (2), 61–65.
- Климченко В.В. (2009) Климат: непрочитанная глава истории. Москва: Издательский дом МЭИ.
- Babich V.V., Rudaya N.A., Kalugin I.A., Darin A.V. (2015) Complex use of the geochemical features of bottom deposits and pollen records for paleoclimate reconstructions (with lake Teletskoe, Altai Republic, as an example). *Contemporary Problems of Ecology*. **8**, 405–413.
<https://doi.org/10.1134/S1995425515040022>
- Bezrukova E.V., Abzaeva A.A., Letunova P.P., Kostrova S.S., Tarasov P.E., Kulagina N.V. (2011) Palynological study of Lake Kotokel' bottom sediments (Lake Baikal Region). *Russian Geology and Geophysics*. **52** (4), 458–465.
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.03.008>
- Boës X., Fagel N. (2009) Relationships between southern Chilean varved lake sediments, precipitation and ENSO for the last 600 years. *Journal of Paleolimnology*. **39**, 237–252.
<https://doi.org/10.1007/s10933-007-9119-9>
- Brauer A. (2004) Annually Laminated Lake Sediments and Their Palaeoclimatic Relevance, In: Fischer, H., et al. *The Climate in Historical Times*. GKSS School of Environmental Research. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-10313-5_7
- Darin A.V., Kalugin I.A., Rakshun Y.V. (2013) Scanning X-ray microanalysis of bottom sediments using synchrotron radiation from the BINP VEPP-3 storage ring. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. **77**, 182–184.
<https://doi.org/10.3103/S106287381302010X>
- Darin A.V., Rakshun Y.V. (2013) Methodology for performing measurements in determining the elemental composition of rock samples by the method of X-RAY fluorescence analysis using synchrotron radiation from the VEPP-3 accessory. *Data Analysis and Processing Systems*. **2** (51), 112–118.
- Gunten L., D'Andrea W.J., Bradley R.S., Huang Y. (2012) Proxy-to-proxy calibration: Increasing the temporal resolution of quantitative climate reconstructions. *Sci. Rep.*, **2**, 609.
<https://doi.org/10.1038/srep00609>
- Hanhijärvi S., Tingley M.P., Korhola A. (2013) Pairwise comparisons to reconstruct mean temperature in the Arctic Atlantic Region over the last 2,000 years. *Climate Dynamics*. **41** (7–8), 2039–2060.
- Jones P.D., Briffa K.R., Osborn T.J., Lough J.M., Van Ommen T.D., et al. (2009) High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: A review of current status and future prospects. *Holocene*. **19**, 3–49.
- Klimenko V., Matskovsky V., Dahlmann D. (2014) Multi-archive temperature reconstruction of the Russian Arctic for the past two millennia. *Geography, environment, sustainability*. **7** (1), 16–29.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2014-7-1-16-29>
- Lamoureux S.F. (2001) Varve chronology techniques. *Developments in Paleoenvironmental Research (DPER)*. **2**, 247–260.
- P. Francus, *Image Analysis, Sediments and Paleoenvironments*. (2004)
<https://doi.org/10.1007/1-4020-2122-4>
- PAGES2k Consortium. (2013) Continental-scale temperature variability during the last two millennia. *Nature Geoscience*. **6**, 339–346.
- Rogozin D.Y., Krylov P.S., Dautov A.N. et al. (2023) Morphology of Lakes of the Central Tunguska Plateau (Krasnoyarsk

- Krai, Evenkiya): New Data on the Problem of the Tunguska Event of 1908. *Dokl. Earth Sc.* **510**, 307–311.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X23600044>
- Screen J., Simmonds I. (2010) The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*. **464**, 1334–1337.
<https://doi.org/10.1038/nature09051>
- Semenov V.A. (2021) Modern Arctic Climate Research: Progress, Change of Concepts, and Urgent Problems. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* **57**, 18–28.
<https://doi.org/10.1134/S0001433821010114>
- Serreze M.C., Barry R.G. (2011) Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change*. **77** (1–2), 85–96.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>
- Shi F. (2012) Multiproxy surface air temperature field reconstruction for the Arctic covering the past millennium. *Quaternary International*. **54** (279–280), 446.
<https://doi.org/10.3354/cr01112>
- Shichi K., Takahara H., Krivonogov S., Bezrukova E., Kashiwaya K., Takehara A., Nakamura T. (2009) Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate records from Lake Kotokel, central Baikal region. *Quaternary International*. **205**, 98–110.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.02.005>
- Sturm M. (1979) Origin and composition of clastic varves. *Moraines and Varves*. Rotterdam: A.A. Balkema, 281–285.
- Takahara H., Shinya S., Harrison S., Miyoshi N., Morita Y., Uchiyama T. (2000) Pollen-based reconstructions of Japanese biomes at 0,6000 and 18,000 14C yr BP. *Journal of Biogeography*. **27**, 665–683.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2000.00432.x>
- Zi-Chen L. I., Wen-Bin S. U. N., LIANG C. X., Xu-Huang X. I. N. G., Qing-Xiang L. I. (2023) Arctic warming trends and their uncertainties based on surface temperature reconstruction under different sea ice extent scenarios. *Advances in Climate Change Research*. **14** (3), 335–346.
<https://doi.org/10.1016/j.accr.2023.06.003>

GEOCHEMISTRY OF BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE PEYUNGDA (TUNGUSKA NATURE RESERVE) AND PALEOCLIMATIC RECONSTRUCTIONS OF THE ARCTIC TERRITORIES OF EASTERN SIBERIA

V. S. Novikov^{a, *}, A. V. Darin^a, V. V. Babich^a, F. A. Darin^b, D. Yu. Rogozin^c

^aInstitute of Geology And Mineralogy V. S. Sobolev SB RAS, Novosibirsk, 630090 Russia

^bThe Center for the Collective Complex “Siberian Ring Photon Source” of the Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk, 630090 Russia

^cInstitute of Biophysics, SB RAS, Krasnoyarsk, 630090 Russia

*e-mail: novikovvs@igm.nsc.ru

Lake Peyungda annually contains layered bottom sediments (varves), which make it possible to build a reliable age model for the entire depth of the core. The age model was refined over the last century based on the presence of a layer of anomalous thickness associated with the fall of the Tunguska cosmic body (TCB) in June 1908. The results of scanning μ XRF-SI (elemental analysis along core depth) were used for comparison with regional average annual weather observation data over time interval 1895–2000. to create a transfer function: average annual temperature as a function of the elemental composition of the dated layer of bottom sediment. Approximation of the obtained function to the depth of core sampling made it possible to reconstruct changes in regional temperature over the time interval of the last millennium with an annual time resolution. A comparison of the obtained reconstruction with literary reconstructions for the Arctic region over the past 1000 years shows the presence of general trends and extremes, which confirms the reliability of the results obtained.

Keywords: Evenkia, Tunguska Cosmic Body, Lake Peyungda, bottom sediments, geochemistry, micro-XRF, synchrotron radiation, temperature reconstructions