ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 1, с. 97–108

ЭВОЛЮЦИЯ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

УДК 551.583.7 551.583.13 550.93 550.423 551.794

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ГОДОВЫХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА АЛТАЙСКОГО РЕГИОНА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 1400 ЛЕТ ПО ДАННЫМ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МИКРОСТРАТИГРАФИИ ЛЕНТОЧНЫХ ГЛИН оз. КУЧЕРЛИНСКОЕ

© 2021 г. А. В. Дарьин[a, *], Г. Чу[b], Ц. Сан[c], В. В. Бабич[a], И. А. Калугин[a], Т. И. Маркович[a], В. С. Новиков[a], М. А. Максимов[d], Ф. А. Дарьин[e], Д. С. Сороколетов[e], Я. В. Ракшун[e], А. А. Гогин[f], Р. А. Сенин[f]

[a]*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*

[b]*Институт геологии и геофизики АН Китая, Пекин, Китай*

[c]*Национальный исследовательский центр геоанализа, Пекин, Китай*

[d]*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия*

[e]*Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*

[f]*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия*

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

Поступила в редакцию 24.04.2020 г.
После доработки 24.08.2020 г.
Принята к публикации 30.10.2020 г.

Приледниковое озеро Кучерлинское (Алтай) содержит ленточные глины, что позволяет строить точные возрастные модели подсчетом слоев и верифицировать их изотопными данными Cs-137, Pb-210 и C-14. Результаты сканирующего микро-РФА на пучках синхротронного излучения были использованы для построения временных рядов более 20 породообразующих и следовых элементов в разрезе донных отложений. Сравнение с метеоданными показало, что коэффициент корреляции годовой температуры с реконструкцией на интервале обучения (1940–2016 гг.) равен +0.59, что является значимой величиной ($n = 76$, $p = 0.99$). При использовании 10-летних сглаженных данных коэффициент корреляции достигает величины +0.84, при этом погрешность температурной реконструкции снижается до величины ±0.52°C. Сравнение полученной реконструкции с глобальными для Северного полушария для последних 1400 лет показывает наличие общих трендов и экстремумов.

Ключевые слова: Алтай, озеро Кучерлинское, донные осадки, геохимия, микро-РФА, синхротронное излучение, реконструкция температуры

DOI: 10.31857/S2587556621010039

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Реконструкции температурных аномалий высокого временного разрешения для Северного полушария за последние тысячелетия, опубликованные в XXI в. [17, 21, 23, 24, 27, 28, 30], показывают принципиальное изменение представлений о климате прошлого, ранее обобщенных М. Манном в 1999 г. [26].

Переход от "хоккейной клюшки" Манна с так называемым беспрецедентным глобальным потеплением XX в. до почти синусоидальных (квазициклических) вариаций температуры последних тысячелетий обусловлен появлением количественных региональных температурных реконструкций высокого разрешения длиной более 500 лет, которые были использованы при построении глобальных климатических реконструкций. При этом, по нашему мнению, используемые реконструкции должны отвечать следующим требованиям: воспроизводимость исходных данных; высокое временно́е разрешение (год на тысячелетней шкале); количественная калибровка по инструментальным метеоизмерениям; реалистичная оценка погрешностей как временной шкалы, так и реконструируемых климатических параметров.

Озерные донные осадки во многих случаях являются палеоархивами, позволяющими получить заданные параметры реконструкций. Для исследований с высоким временны́м разрешением необходимо использовать тонкослоистые донные осадки, поскольку временно́е разрешение для неслоистых отложений обычно превышает десятки лет. Особенный интерес исследователей во всем мире вызывают донные отложения с годовыми

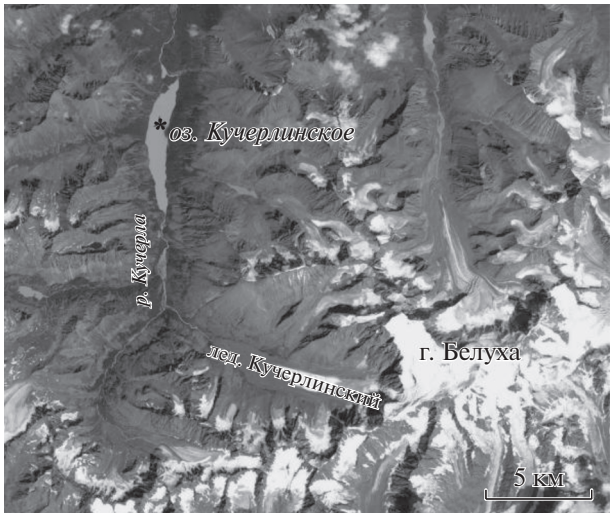

Рис. 1. Космический снимок района оз. Кучерлинское. Звездочкой отмечено место отбора керна в 2018 г.

слоями (варвами), обеспечивающими при должном подходе и правильной интерпретации требуемый уровень детализации и точности реконструкций [33]. Ленточные глины (*varved clays*) встречаются во многих кайнозойских отложениях Горного Алтая и представляют большой интерес для гляциологических исследований [10].

В приледниковых озерах ленточные глины образуются сезонными поставками ледниковой мути и состоят из крупных алевритовых частиц (весенне-летний слой) и мелкозернистой глины, осаждающейся в зимний период. Использование современных аналитических методов позволяет исследовать такие донные отложения с годовым, а иногда и сезонным разрешением, что открывает новые подходы в палеоклиматических исследованиях [13, 15]. Необходимым требованием к таким работам является использование инструментальных аналитических методик с субмиллиметровым пространственным разрешением, таких как гиперспектральная спектроскопия [16], микро-РФА [18, 29] и микро-РФА с синхротронным возбуждением [5].

Высокое временно́е разрешение позволяет проводить прямое сравнение набора полученных прокси с данными региональных метеонаблюдений на интервале последнего столетия с нахождением климатических индикаторов и построением трансферных функций для реконструируемых параметров [2]. Использование фокусирующей рентгеновской оптики в РФА позволяет перейти на уровень субмикронного пространственного разрешения и исследовать внутреннее строение отдельных годовых слоев с получением информации о сезонных вариациях климатических прокси и построением литолого-геохимических моделей годового цикла осадкообразования [6].

Исследование современных озер с ледниковыми глинами позволяет изучать изменения окружающей природной среды на временны́х интервалах последних тысячелетий с годовым временны́м разрешением. Одним из ключевых преимуществ таких объектов является возможность построения временны́х шкал, по точности и правильности сопоставимых с дендрохронологическими. Находки новых озер и быстрое развитие современных методов анализа открывают высокий потенциал ленточных глин для палеоклиматических реконструкций [31].

В данной работе представлена 1400-летняя количественная реконструкция среднегодовых температур воздуха Алтайского региона, полученная при исследовании ежегодно ламинированных донных осадков приледникового оз. Кучерлинское с использованием современных методик аналитической микростратиграфии – сканирующего рентгенофлуоресцентного анализа с возбуждением синхротронным излучением (РФА СИ) с субмиллиметровым пространственным разрешением.

Район исследований, геология, геоморфология

Озеро Кучерлинское располагается в южной части Горного Алтая на северном макросклоне Катунского хребта. Катунский хребет (2800–4500 м) – один из крупнейших центров оледенения Алтая. Высота снеговой линии на склонах Катунского хребта составляет порядка 2600 м [8]. С вершины и склонов высочайшей точки Алтая г. Белухи (4506 м) спускаются несколько крупных долинных ледников, один из которых – ледник Кучерлинский.

Кучерлинское озеро расположено в верховьях долины р. Кучерлы в гребневой части Катунского хребта на территории природного парка “Белуха” и имеет ледниковое питание. Основной объем воды поступает с Кучерлинского ледника. Озеро расположено на высоте 1790 м над уровнем моря. Длина озера составляет 5 км, ширина – 1 км, максимальная глубина доходит до 45 м. Общая площадь 321 га. 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 (рис. 1). На расстоянии 20 км от озера находится метеостанция Кара-Тюрек с непрерывными рядами метеонаблюдений с 1940 г.

Породы территории водосборного бассейна Кучерлинского озера в основном представлены аккемской и кучерлинской свитами, сложенными слоистыми зеленовато-серыми полевошпато-

во-кварцевыми известковистыми песчаниками, алевропесчаниками и алевролитами [12].

Климат региона

Горный Алтай имеет умеренно-континентальный климат с холодной зимой и теплым летом. Существенное влияние на климат региона оказывает рельеф, который образует вертикальную климатическую зональность – зону низкогорного климата (до 500–600 м), зону среднегорного климата (от 500 до 1500 м и более) и зону высокогорного климата (свыше 2000–2500 м). Необходимо отметить, что в пределах Горного Алтая с северо-запада на юго-восток происходит аридизация климата, наблюдается уменьшение количества выпадающих осадков [9].

В исследуемом регионе, по данным метеостанции Кара-Тюрек, среднегодовые температуры за период 1940–2017 гг. колебались от –7.6 до –3.4°С. Максимальные среднемесячные летние температуры достигали отметки 9.9°С, а зимние доходили до –25.2°С . При этом количество атмосферных выпадений колебалось от 835 до 368 мм (http://meteo.ru/data). Метеостанция Кара-Тюрек находится на 800 м выше оз. Кучерлинского (2601 м над ур. м.), поэтому абсолютные величины инструментальных метеоданных могут отличаться от территории озера, но относительные изменения и общий тренд погодно-климатических параметров совпадает.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отбор керна и пробоподготовка

Керн донных осадков оз. Кучерлинское был получен со льда с использованием ударной трубки в марте 2018 г. Длина керна, отобранного в самой глубокой части озера с глубины 45 м, составила 1120 мм. В процессе получения керна особое внимание обращалось на сохранность границы вода–осадок, что позволяло в дальнейшем вести отсчет годовых слоев от года отбора.

После отбора трубка с керном была плотно закрыта снизу и оставлена в вертикальном положении на несколько часов в теплом помещении. Затем вода из верхней части трубки была удалена и верх плотно закрыт без деформации керна. Керн был доставлен в лабораторию Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск) в вертикальном положении. Проведенные манипуляции позволили максимально сохранить верхнюю часть керна от повреждений.

В лабораторных условиях керн был вскрыт вдоль оси отбора. Половина керна была разрезана на дискретные образцы с шагом 10 мм. Вторая половина использована для изготовления твердых препаратов, пропитанных эпоксидной смолой. Подготовка твердых препаратов проводилась по методике, описанной в [2].

Из твердых препаратов для всего интервала керна были изготовлены плоскопараллельные образцы для микро-РФА толщиной 2 мм и оптические шлифы, перекрывающие три интервала керна с визуально наблюдаемыми слоями: верхний (0–170 мм), средний (480–650 мм) и нижний (940–1110 мм).

Варвохронология

Подсчет слоев проводился по фотографиям исходного (влажного) керна на интервалах с визуально выделяемыми слоями и по фотографиям оптических шлифов на трех выше указанных интервалах. Фотографии оптических шлифов были сделаны в двух вариантах – в отраженном свете без увеличения (оптический сканер) и в проходящем свете в оптическом микроскопе с 2.5-кратным увеличением. Подсчет проводился по визуально выделяемым парам – светлый–темный слой – двумя исследователями, независимо друг от друга. Полученные данные усреднялись и использовались для построения возрастной модели. Детально процедуры описаны в [19].

В ряде спорных случаев в дополнение к визуальным данным при подсчете слоев были использованы данные сканирующего микро-РФА на пучках СИ с субмикронным пространственным разрешением [3]. Исследования отдельных интервалов керна проводились с использованием рентгеновской концентрирующей оптики, позволяющей фокусировать пучок возбуждающего излучения до размеров 15–20 микрон. Используемый шаг сканирования в 20–100 мкм позволял получить профили изменения содержания элементов внутри отдельных годовых слоев и находить границу их раздела.

Наиболее эффективным геохимическим индикатором границ годовых слоев в приледниковых пресноводных озерах является отношение *Rb/Sr*, отражающее размер частиц в осадке. Обоснование выбора *Rb/Sr* отношения как индикатора годовых слоев в осадках приледниковых озер рассмотрено ранее в [6]. Подсчет слоев в осадках оз. Кучерлинское с использованием отношения *Rb/Sr* показан в работе [4].

Изотопные исследования

Распределения активности изотопов Cs-137 и Pb-210, используемые для верификации датировки верхнего интервала керна (0–200 мм), сделаны в Аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск) с использованием полупроводниковой низкофоновой гамма-спектрометрии на коаксиальном Ge-детекторе с низкофоновым криостатом по стан-

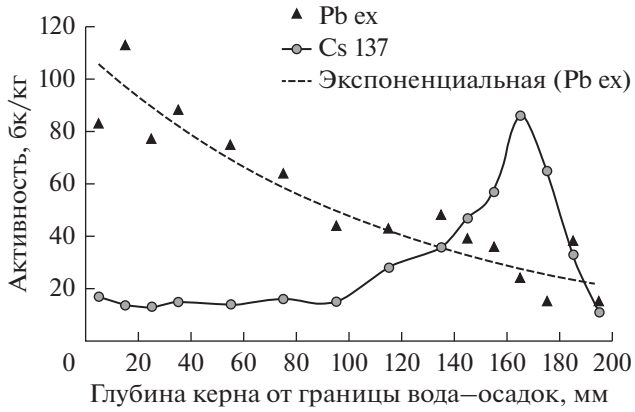

Рис. 2. Распределение активности изотопов Cs-137 и Pb-210 в верхней части (интервал 0–200 мм) керна донных отложений оз. Кучерлинское.

дартной методике (аналитик М.С. Мельгунов). Результаты представлены на рис. 2.

Для верификации возрастной модели на всей глубине керна были сделаны анализы двух образцов керна на радиоуглеродный возраст (C-14). 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/). Образец 1000–1010 мм исследован в лаборатории Beta analytics, Майами, США (https://www.radiocarbon.com/).

Аналитическая микростратиграфия

Методики аналитической микростратиграфии донных осадков с использованием сканирующего РФА на пучках синхротронного излучения (РФА СИ) были развиты авторским коллективом в последние десятилетия и подробно представлены в ряде публикаций [5, 7, 20].

Для анализа были использованы 2-мм плоскопараллельные образцы (пластинки) с пришлифованной поверхностью, приготовленные из твердых препаратов донных осадков. При этом 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.

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-/неупруго-рассеянного на образце излучения (Coh/Incoh) как показателя рентгеновской плотности исходного керна. Таким образом, в каждой точке сканирования регистрировался набор из 25 литолого-геохимических индикаторов (мульти-прокси), отражающих изменение состава донных осадков озера во времени.

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 2018–2020 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Построение возрастной модели и временны́х рядов геохимических данных

Полученные изотопные данные позволяют оценить положение максимальной активности Cs-137 в 160–170 мм от границы вода–осадок (см. рис. 2). Это соответствует времени глобальных атмосферных выпадений после ядерных испытаний на Новоземельском полигоне 1961–1962 гг. [14]. Данные варвохронологии (подсчет слоев) в нескольких вариантах дают для глубины 165 мм разброс оценок от 1957 до 1965 г. При этом среднее значение 1961 г. ±4 полностью совпадает с изотопными данными, что подтверждает предположение о годовой природе наблюдаемых слоев.

Возрастная модель для интервала керна 0–200 мм (рис. 3б) была построена по данным 3-кратного независимого подсчета визуально выделяемых годовых слоев на этом интервале. Правильность полученной модели подтверждается хорошим совпадением с результатами изотопных анализов – распределением активности Cs-137 и Pb-210. Подробно построение возрастной модели на этом интервале рассмотрено в [19].

Возрастная модель на интервале керна 200–1120 мм (рис. 3а) построена по данным подсчета визуально выделяемых слоев на фото исходного (влажного) керна и исследования шлифов на интервалах 480–650 и 940–1110 мм. Полученные данные были усреднены и аппроксимированы экспоненциальной функцией. Правильность модели подтверждается совпадением с радиоуглеродными датировками.

С использованием полученной возрастной модели был проведен пересчет линейной глубины керна в возрастную (лет назад). 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. Поскольку отбор керна осуществлялся в марте 2018 г. и не было отмечено потерь верхней части, то начало временной шкалы (верх керна) датируется 2017 г.

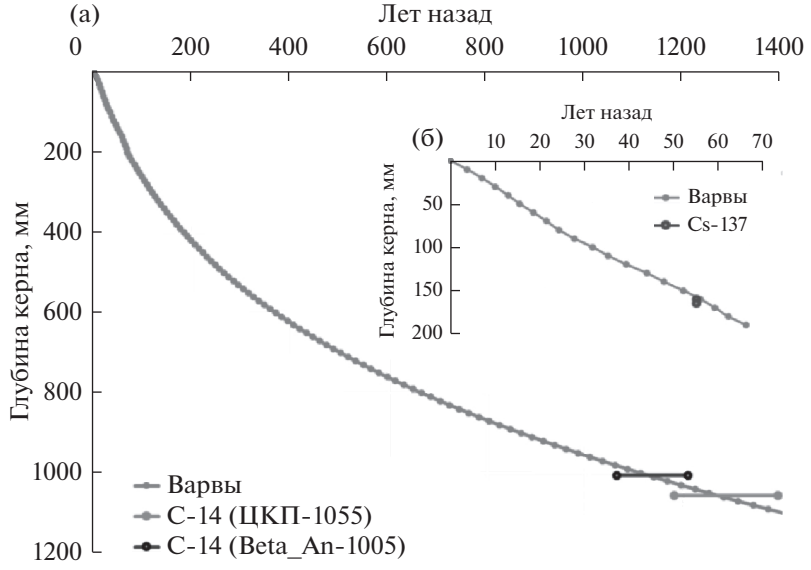

Рис. 3. (а) – возрастная модель (глубина керна – возраст слоя осадка) для керна Куч_2018 на полную глубину опробования. Модель построена по данным варвохронологии и верифицирована датировками по C-14. "ЦКП–1055" – анализ образца с глубины 1050–1060 мм выполнен в ЦКП "Геохронология кайнозоя". "Beta_An-1005" – анализ образца с глубины 1000–1010 мм выполнен в Beta Analytic.inc. (б) – возрастная модель для верхнего интервала керна 0–200 мм по данным варвохронологии и изотопных анализов Cs-137.

Таким образом были построены временны́е ряды для всех анализированных элементов.

Создание трансферной функции, реконструкция температуры

Величина шага сканирования определяется средней линейной скоростью (мм/год) осадконакопления на данном интервале керна и подбирается такой, чтобы на интервал одного года приходилось 3–5 точек. В каждой точке получается набор концентраций более 25 элементов. Из них сначала отбраковываются данные по критерию – статистическая значимость аналитического сигнала (отношение пик/фон в исходной спектрограмме). Оставшийся массив аналитических данных, привязанных к линейной шкале (мм глубины керна от границы вода–осадок), пересчитывается во временну́ю шкалу по возрастной модели с годовым временны́м разрешением. Для каждого линейного интервала керна, соответствующего одному году, проводится усреднение аналитических данных, попавших в этот интервал. Таким образом, исходные данные сканирования керна превращаются во временные ряды, где каждому году приписан ряд аналитических данных.

Для поиска геохимических индикаторов, коррелированных со среднегодовыми региональными температурами, были использованы инструментальные данные ближайшей метеостанции Кара-Тюрек. С использованием методических приемов, подробно описанных в [1], методом множественной регрессии построена функция, связывающая среднегодовую температуру с литолого-геохимическими данными. Сравнение проводилось на годовой временно́й шкале. Полученная функция имеет следующий вид: $T = 0.602*Ti + 0.034*Ni - 0.742*Sr + 0.754*Y + 1.46*Nb - 0.795*Mo - 6.762$. Символы элементов обозначают концентрацию этого элемента в г/т (ppm), приписанную интервалу керна, соответствующему годовому слою при пересчете миллиметровой шкалы в годовую по используемой возрастной модели.

В рамках данной статьи авторы не пытаются рассматривать полученную функцию как цифровую литолого-геохимическую модель годового цикла осадкообразования в озере Кучерлинское. Общая модель связи элементного состава донных осадков с внешними (климатическими) воздействиями понятна и сводится к простым объяснениям. Изменение температуры и количества атмосферных осадков приводит к вариациям соотношения терригенной, органогенной, хемогенной (для соленых озер) и аэрозольной компонент донных отложений. Каждая компонента осадка имеет специфический элементный состав, и вариации соотношений компонент приводят к вариациям состава донных осадков. Для данного объекта ничтожна доля органики, озеро пресное – поэтому нет хемогенной компоненты, вклад аэрозоля невелик. Основные вариации состава донных отложений связаны с интенсивностью поступления терригенного материала – ледникового проис-

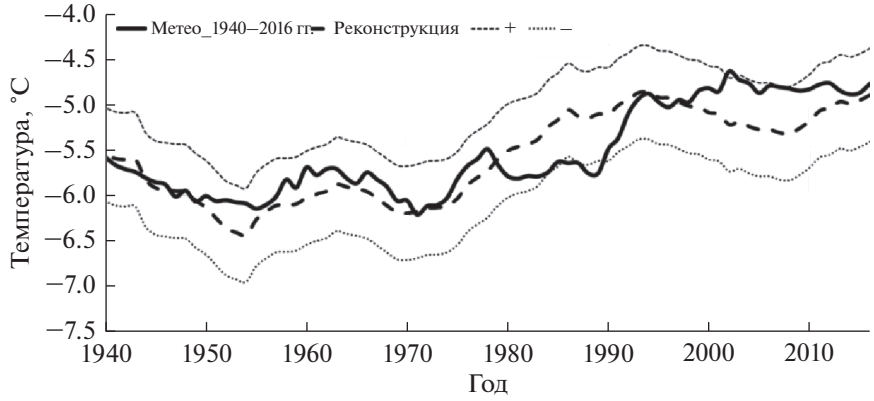

Рис. 4. Сглаженные 10-летние температуры на интервале 1940–2016 гг. (метеостанция Кара-Тюрек), реконструкция по геохимическим данным, 95% интервал погрешности реконструкции.

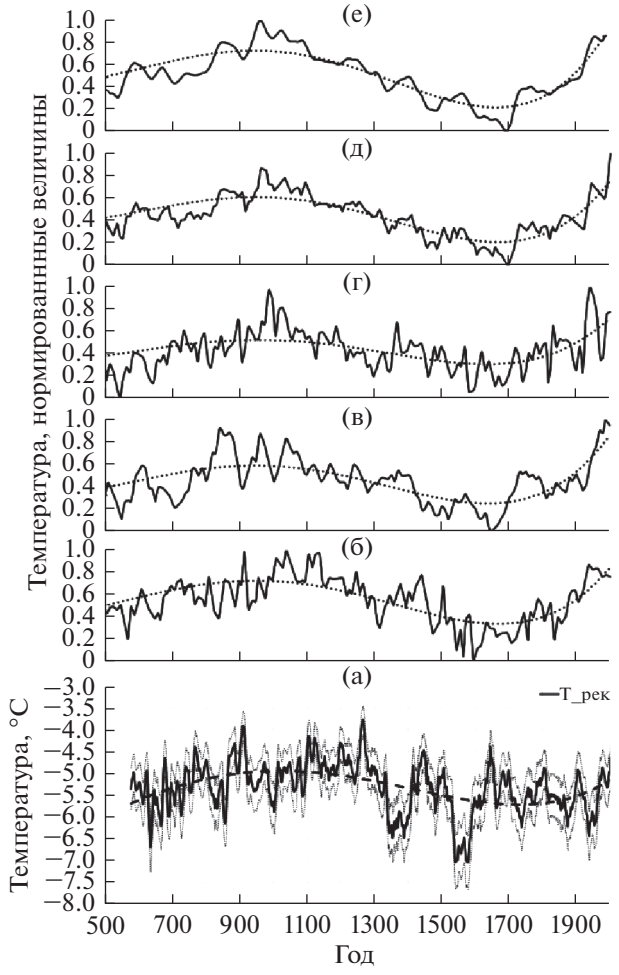

Рис. 5. Сравнение температурной реконструкции с литературными данными. (а) – реконструкция по литолого-геохимическим данным осадков оз. Кучерлинское (данная работа); (б) – Северное полушарие, A. Moberg, 2005 [28]; (в) – Китай, B. Yang, 2002 [32]; (г) – С.-В. Европа, V. Klimenko, 2014 [25]; (д) – Северное полушарие, B. Christiansen and F.C. Ljungqvist, 2012 [17]; (е) – Северное полушарие, IPCC, 2013 [24].

хождения и сносимого с бортов озера. Основными внешними факторами являются температура и атмосферные осадки. Какой из факторов будет иметь наибольший отклик определяется статистическими методами. В данном случае уравнение с более высокой корреляцией построено для температуры.

Использование полученной зависимости (трансферной функции) дает значимый коэффициент корреляции (+0.54 для $n = 77$) между инструментальной среднегодовой температурой воздуха на интервале обучения (1940–2016 гг.) и реконструкцией по составу донных осадков для этого же временно́го интервала с ошибкой в 1.3°С для 95% вероятности. Формально можно рассматривать найденную закономерность как свидетельство наличия устойчивой линейной зависимости элементного состава донных осадков оз. Кучерлинское от изменяющихся внешних условий. При этом цифровым параметром внешних условий служит среднегодовая температура воздуха.

Использование сглаженных 10-летних величин позволяет увеличить коэффициент корреляции до +0.84, при этом уменьшив величину погрешности до 0.52°С. На рис. 4 представлен сглаженный метеоряд на интервале обучения, реконструкция по трансферной функции и интервал погрешности.

Применение трансферной функции на всю глубину опробования керна позволило получить температурную реконструкцию для временно́го интервала 1940–576 г. (рис. 5а).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 5 представлено сравнение полученной нами региональной температурной реконструкции с рядом обобщенных глобальных реконструкций [17, 24, 25, 28, 32]. Для удобства сравнения все литературные реконструкции были нор-

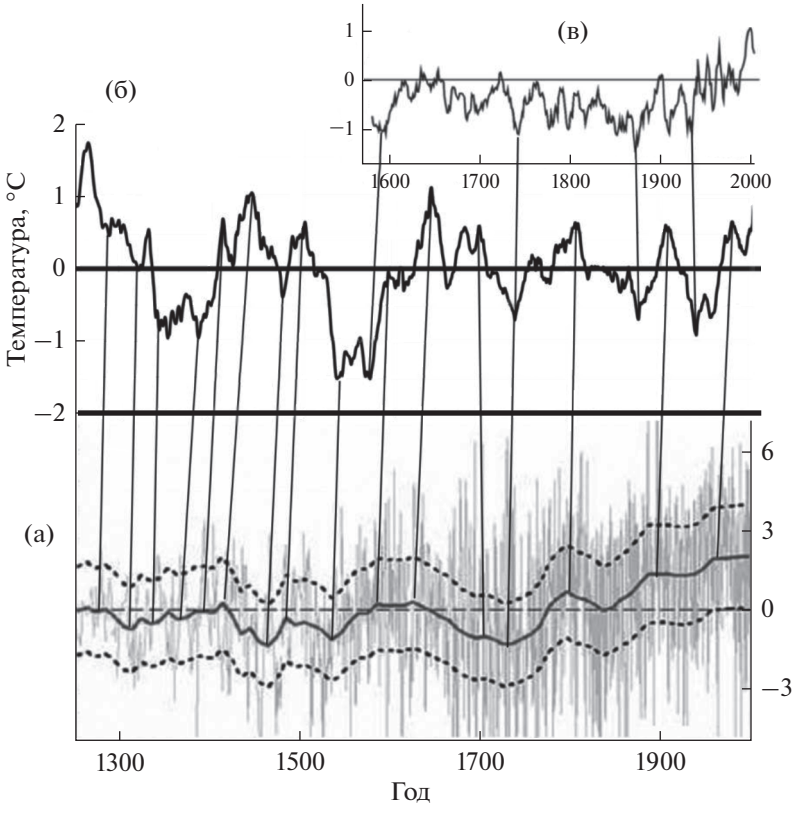

Рис. 6. Сравнение региональных температурных реконструкций высокого временного разрешения. (а) – реконструкция температуры на основе $d^{18}O$ ледника Белуха. Данные представляют собой аномалии, от среднего за 1250–2001 гг. Показаны отдельные значения (серые), средние за 10 лет и интервал погрешности (черные, пунктирные) [22]; (б) – реконструкция по литолого-геохимическим данным осадков оз. Кучерлинское, пересчитанная как аномалии от среднего за 1250–2001 гг.; (в) – отклонения средней летней температуры воздуха Алтайского региона по дендрохронологическим данным, калиброванные по инструментальным данным метеостанции Усть-Кокса. Представлены 7-летнее скользящее среднее и отклонения от периода 1940–1994 гг. [11].

мированы методом минимакс от 0 до 1. Несмотря на значительную разницу в исходных данных, усреднениях и сглаживаниях, все реконструкции имеют ярко выраженные общие тренды и экстремумы.

Можно выделить средневековое потепление, по амплитуде сопоставимое с современным глобальным. Также отчетливо во всех реконструкциях проявлен малый ледниковый период, хотя и имеющий немного отличий на временно́й шкале. Выделяемый температурный тренд имеет примерно одинаковый период. Тонкая структура температурных вариаций совпадает для многих временны́х интервалов.

В целом, представленные пять глобальных реконструкций достаточно хорошо совпадают с авторской, что позволяет сделать вывод о правильности использованного методического подхода и полученных результатов.

Для более детальных оценок точности полученной реконструкции, как возрастной шкалы, так и абсолютной величины реконструированной температуры, проведем сравнение с имеющимися региональными гляциологическими [22] и дендроклиматическими [11] данными годового временно́го разрешения. На рис. 6а представлены данные о реконструкции температуры воздуха за последние 750 лет, полученные на основе исследования изотопного состава льда ледника Белуха [22], расположенного рядом с оз. Кучерлинское. Рисунок 6б – наша реконструкция, для удобства сравнения абсолютных величин с данными изотопии льда, пересчитанная в аномалии от среднего за 1250–2001 гг. Рисунок 6в – отклонения средней летней температуры воздуха Алтайского региона по дендро данным, калиброванные по инструментальным данным метеостанции Усть-Кокса [11].

Дендрохронологическая реконструкция дает летние температуры, поэтому не будем сравнивать абсолютные величины. Больший интерес представляет сравнение ярко выраженных температурных экстремумов на возрастной шкале. Возрастные шкалы, построенные подсчетом годовых слоев (дендрохронология), благодаря отработан-

ным методикам и отсутствию значимых систематических погрешностей являются на сегодняшний день наиболее точными и могут рассматриваться в качестве эталонных при проведении региональных исследований. Графическое сравнение наиболее выраженных экстремумов позволяет оценить отклонения нашей возрастной шкалы от дендро на интервале 0–400 лет назад абсолютными величинами 5–10 лет, но не более 5 отн. %. Приняв дендрохронологическую шкалу за абсолютно точную, считая летние температурные экстремумы совпадающими со среднегодовыми, можем утверждать, что точность подсчета годовых слоев в донных осадках оз. Кучерлинское (варвохронология) позволяет строить возрастную шкалу с относительной погрешностью менее 5 отн. %.

Сравнение с ледниковыми записями по временно́й шкале дает больший разброс, что может быть связано с суммированием погрешностей варвной и ледниковой возрастных моделей. При этом временна́я разница сопоставляемых экстремумов на температурных реконструкциях составляет величины 5–35 лет, или 4–12 отн. %.

Интервал разброса реконструируемой величины в случае ледниковых данных составляет 3°С (от –1 до +2) относительно среднего 1250–2001 гг. Для наших данных разброс величин чуть больше: от –1.5 до +1.8°С, что очень близко с учетом диапазона ошибок обеих реконструкций. Существенное отличие нашей реконструкции от ледовой проявляется в слабо выраженном современном потеплении, хотя, с учетом интервала погрешности, различие может быть не столь значимо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

1. Озеро Кучерлинское имеет тонкослоистый осадок, содержащий отдельные годовые слои (варвы), что позволяет строить возрастную модель глубина керна–возраст слоя осадка с точностью не хуже 5 отн. %. Подсчет слоев может вестись по фотографиям исходного влажного керна, но необходимо дополнительно контролировать результаты подсчета исследованием оптических шлифов и сканирующим РФА СИ с субмикронным пространственным разрешением.

2. Индикатором границ отдельных годовых слоев в донных осадках оз. Кучерлинское служит отношение *Rb/Sr* по данным сканирующего РФА СИ.

3. Сравнение временны́х рядов литолого-геохимических данных на годовой шкале с региональными метеонаблюдениями позволяет определить набор геохимических индикаторов климата и построить трансферные функции, связывающие состав датированных слоев донных отложений с метеопараметрами.

4. Температурная реконструкция, построенная по литолого-геохимическим данным, совпадает с региональными и глобальными реконструкциями, построенными по биологическим и изотопным прокси, в пределах оцененных погрешностей как возрастной шкалы, так и значений реконструируемого параметра.

5. Построенная реконструкция высокого временно́го разрешения, откалиброванная по региональным метеонаблюдениям, имеет количественную оценку погрешности и может быть использована для получения информации о природной периодичности климатических циклов, что дает возможность подготовки региональных кратко- и среднесрочных погодно-климатических прогнозов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках гос. задания ИГМ СО РАН, при поддержке грантов РФФИ ГФЕН_а № 18-55-53016 и Микромир № 19-05-50046 (субмикронный РФА-СИ). В работе использовалось оборудование ЦКП “СЦСТИ” (ИЯФ СО РАН) на базе УНУ “Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000” и УНУ Курчатовский источник синхротронного излучения (НИЦ Курчатовский институт), проекты Министерства образования и науки РФ RFMEFI62119X0022 и RFMEFI61919X0015.

FUNDING

This work was carried out as part of the state-ordered research theme of the IGM SB RAS, with the financial support of the RFBR (projects no. 18-55-53016 and no. 19-05-50046; submicron XRF-SR). In the work we used the equipment of the shared research center SSTRC on the basis of the Novosibirsk VEPP-4 – VEPP-2000 complex at BINP SB RAS and the Kurchatov Synchrotron Radiation Source, supported by projects RFMEFI62119X0022 and RFMEFI61919X0015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. https://doi.org/10.15372/SEJ20150401
2. *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. https://doi.org/10.7868/S0869565215230176
3. *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.* Исследование геохимических особенностей годовых слоев в донных осадках пресноводных озер методом рентгенофлуоресцентного

микроанализа с возбуждением синхротронным излучением // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 11. С. 1572–1575.
https://doi.org/10.1134/S0367676519110085

4. *Дарьин А.В., Калугин И.А., Бабич В.В., Маркович Т.И., Грачев А.М., Дарьин Ф.А., Ракшун Я.В., Сороколетов Д.С.* Поиск годично стратифицированных донных осадков в озерах Горного Алтая методом рентгенофлуоресцентного микроанализа с использованием синхротронного излучения // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 2. С. 243–246.
https://doi.org/10.1134/S0367676519020108
5. *Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракшун Я.В.* Сканирующий рентгеноспектральный микроанализ образцов донных осадков с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 2. С. 204.
https://doi.org/10.7868/S0367676513020105
6. *Дарьин А.В., Ракшун Я.В., Сороколетов Д.С., Дарьин Ф.А., Калугин И.А., Максимова Н.В., Маркович Т.И.* Исследование сезонного геохимического сигнала в годовых слоях донных осадков оз. Донгуз-Орун методом сканирующего РФА с использованием микрокапиллярной рентгеновской оптики // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 1. С. 137.
https://doi.org/10.7868/S036767651501010X
7. *Дарьин Ф.А., Ракшун Я.В., Сороколетов Д.С., Дарьин А.В., Калугин В.М.* Разработка методик микро-РФА на пучках синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 и их применение для исследования распределения элементов в природных образцах // Ядерная физика и инжиниринг. 2017. Т. 8. № 1. С. 86–90.
https://doi.org/10.1134/S2079562917010067
8. *Нарожный Ю.К., Осипов А.В.* Ороклиматические условия оледенения Центрального Алтая // Изв. РГО. 1999. Т. 131. Вып. 3. С. 49–57.
9. *Ненашева Г.И.* Растительность и климат голоцена межгорных котловин Центрального Алтая: монография. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013. 164 с.
10. *Рихванов Л.П., Окишев П.А., Соболева Н.П., Матаев Е.И.* Геохимическая характеристика ленточных глин Горного Алтая и возможности их использования при гляциологических исследованиях // Изв. Томск. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 2. С. 23–36.
11. *Сыромятина М.В., Москаленко И.Г., Чистяков К.В.* Тенденции изменения климата на Алтае на фоне глобальных климатических изменений (по инструментальным и дендрохронологическим данным) // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2010. № 3. С. 82–91.
https://doi.org/10.18551/rjoas.2015-07.01
12. *Федак С.И., Туркин Ю.А., Гусев А.И., Шокальский С.П. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Л. М-45. Горно-Алтайск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. 567 с.
13. *Alexandrin M., Dolgova E., Grachev A., Solomina O., Darin A., Kalugin I.* Annual sedimentary record from lake Donguz-orun (central Caucasus) constrained by high resolution SR-XRF analysis and its potential for climate reconstructions // Frontiers in Earth Sci. 2018. V. 6. P. 158.
https://doi.org/10.3389/feart.2018.00158
14. *Appleby P.* The use of 210Pb and 137Cs as tracers in modelling transport processes in lake catchment systems // Stud. in Env. Sci. 1997. V. 68. P. 441–448.
https://doi.org/10.1016/S0166-1116(09)70124-4
15. *Brauer A.* Annually laminated lake sediments and their paleoclimatic relevance // Fischer H. et al. (Eds.). The Climate in Historical Times. Berlin: Springer, 2004. P. 109–127.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-10313-5_7
16. *Butz C., Grosjean M., Fischer D., Wunderle S., Tylmann W., Rein B.* Hyperspectral imaging spectroscopy: A promising method for the biogeochemical analysis of lake sediments // J. App. Remote Sens. 2015. V. 9. № 1. 096031.
https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.096031
17. *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.
https://doi.org/10.5194/cp-8-765-2012
18. *Croudace I., Löwemark L., Tjallingii R., Zolitschka B.* Current perspectives on the capabilities of high resolution *XRF* core scanners // Quat. Int. 2019. V. 514. P. 5–15.
https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.04.002
19. *Darin A., Chu G., Maksimov M., Novikov V.* Layer counting and isotopic analysis of the recent bottom sediments of the glacial lake Kucherla (Russia, Gorny Altai) // 19th Int. Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM 2019. Sofia, 2019. P. 257–264.
https://doi.org/10.5593/sgem2019V/4.2/S06.035
20. *Darin F.A., Kalugin I.A., Darin A.V., Rakshun Ya.V.* The study internal structure of the annual layers in lake sediments using synchrotron radiation with x-ray focusing optics // Acta Geol. Sin. (Engl. Ed.). 2014. T. 88. № S1. P. 5–6.
https://doi.org/10.1111/1755-6724.12265_1
21. *Cook E.R., Krusic P.J., Anchukaitis K.J., Buckley B.M., Nakatsuka T., Sano M.* Tree-ring reconstructed summer temperature anomalies for temperate East Asia since 800 C.E. // Clim. Dyn. 2013. V. 41. P. 2957–2972.
https://doi.org/10.1007/s00382-012-1611-x
22. *Eichler A., Olivier S., Henderson K., Laube A., Beer J., Papina T., Heinz W., Schwikowski M.* Temperature response in the Altai region lags solar forcing // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L01808.
https://doi.org/10.1029/2008GL035930
23. *Feng S., Yang B., Mairesse A., Gunten L., Li J., Bräuning A., Yang F., Xiao X.* Northern Hemisphere temperature reconstruction during the last millennium using multiple annual proxies // Clim. Res. 2013. V. 56. P. 231–244.
https://doi.org/10.3354/cr01156
24. IPCC, 2013: 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, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.). Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324

25. *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. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2014-7-1-16-29

26. *Mann M., Bradley R., Hughes M.* Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. P. 759–762. https://doi.org/10.1029/1999GL900070

27. *Mann M., Zhang Z., Rutherford S., Bradley R., Hughes M., Shindell D., Ammann C., Faluvegi G., Ni F.* Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly // Science. 2009. V. 326. № 5957. P. 1256–1260. https://doi.org/10.1126/science.1177303

28. *Moberg A., Sonechkin D., Holmgren K., Datsenko N., Karlén W.* Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low-and high-resolution proxy data // Nature. 2005. V. 433. № 7026. P. 613–617. https://doi.org/10.1038/nature03265

29. *Rothwell R., Croudace I.* Micro-XRF Studies of Sediment Cores: A Perspective on Capability and Application in the Environmental Sciences / I. Croudace, R. Rothwell (Eds.). Micro-XRF Studies of Sediment Cores. Developments in Paleoenvironmental Res. 2015. V. 17. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5_1

30. *Trachsel M., Kamenik C., Grosjean M., McCarroll D., Moberg A., Brázdil R., Büntgen U., Dobrovolný P., Esper J., Frank D., Friedrich M., Glaser R., Larocque-Tobler I., Nicolussi K., Riemann D.* Multi-archive summer temperature reconstruction for the European Alps, AD 1053–1996 // Quat. Sci. Rev. 2012. V. 46. P. 66–79. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.04.021

31. *Tylmann W., Zolitschka B.* Annually Laminated Lake Sediments–Recent Progress // Quaternary. 2020. V. 3. № 1. P. 5. https://doi.org/10.3390/quat3010005

32. *Yang B., Braeuning A., Johnson K.R., Yafeng S.* General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 9. P. 1324. https://doi.org/10.1029/2001gl014485

33. *Zolitschka B., Francus P., Ojala A.E., Schimmelmann A.* Varves in lake sediments – A review // Quat. Sci. Rev. 2015. V. 117. P. 1–41. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.019

Quantitative Reconstruction of the Altai Region Annual Air Temperatures over the Past 1400 Years According to Analytical Microstratigraphy of Lake Kucherla Varved Clays

A. V. Daryin[1, *], G. Chu[2], C. San[3], V. V. Babich[1], I. A. Kalugin[1], T. I. Markovich[1], V. S. Novikov[1], M. A. Maksimov[4], F. A. Daryin[5], D. S. Sorokoletov[5], Ya. V. Rakshun[5], A. A. Gogin[6], and R. A. Senin[6]

[1]*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

[2]*Institute of Geology and Geophysics CAS, Beijing, China*

[3]*National Research Center of Geoanalysis, Beijing, China*

[4]*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

[5]*Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

[6]*National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia*

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

The proglacial Lake Kucherla (Kucherlinskoe) in Altai contains annually laminated bottom sediments (glacial clay), which makes it possible to build accurate age models using layer counting (varve chronology). Age models (core dept–age of the sediment layer) were verified by isotopic data (Cs-137, Pb-210 and C-14) and analytical microstratigraphy techniques based on the use of scanning X-ray fluorescence analysis with synchrotron radiation beams (micro-XRF-SR). Time series of more than 20 rock-forming and trace elements were constructed over the entire core depth of Lake Kucherla bottom sediments. Comparison of geochemical data with regional instrumental meteorological observations in the interval 1940–2016 allowed us to identify climate indicators and build transfer functions–the annual air temperature as a function of the elemental composition of bottom sediments. The correlation coefficient for the average annual temperature is +0.59, which is a significant value ($n = 76$, $p = 0.99$), indicating the presence of a stable linear relationship between the variations of the meteorological parameter and the composition of bottom sediments formed under the influence of external weather and climate conditions. Using average 10-year values significantly increases the correlation coefficient (+0.84) and reduces the reconstruction error to ±0.52°C (for a 95% probability). By approximating the transfer function to the entire sampling depth, a reconstruction of the regional temperature change over the time interval of the last 1400 years was constructed with an estimated error of reconstructed parameter. A comparison of the reconstruction with the data of regional studies and global reconstructions for the Northern Hemisphere shows the presence of general trends and extremes and minimal discrepancies in time scales and reconstructed temperatures.

Keywords: Altai, Lake Kucherla, bottom sediments, geochemistry, micro-XRF, synchrotron radiation, temperature reconstruction

REFERENCES

1. Babich V.V., Rudaya N.A., Kalugin I.A., Darin A.V. Complex use of the geochemical features of bottom deposits and pollen records for paleoclimate reconstructions (with lake Teletskoe, Altai Republic, as an example). *Contemp. Probl. Ecol.*, 2015, vol. 8, no. 4, pp. 405–413. doi 10.1134/S1995425515040022
2. Darin A.V., Alexandrin M.Yu., Kalugin I.A., Solomina O.N. Connection of meteorological data with geochemical characteristics of modern bottom sediments of Lake Donguz-Orun, Caucasus. *Dokl. Akad. Nauk.,* 2015, vol. 463, no. 5. pp. 602–606. (In Russ.). doi 10.7868/S0869565215230176
3. Darin A.V., Babich V.V., Kalugin I.A., Markovich T.I., Rogozin D.Yu., Meidus A.V., Darin F.A., Rakshun Ya.V., Sorokoletov D.S. Geochemical features of annual layers of bottom sediments of freshwater lakes, studied via synchrotron radiation–induced XRF microanalysis. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2019, vol. 83, no. 11, pp. 1437–1440. doi 10.3103/S106287381911008X
4. Darin A.V., Kalugin I.A., Babich V.V., Markovich T.I., Grachev A.M., Darin F.A., Rakshun Y.V., Sorokoletov D.S. Searching for annually stratified bottom sediments in Altai Mountain lakes by means of XRF microanalysis using synchrotron radiation. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.,* 2019, vol. 83, no. 2, pp. 194–197. doi 10.3103/S1062873819020102
5. Darin A.V., Kalugin I.A., Rakshun Y.V. Scanning X-ray microanalysis of bottom sediments using synchrotron radiation from the BINP VEPP-3 storage ring. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.,* 2013, vol. 77, no. 2, pp. 182–184. doi 10.3103/S106287381302010X
6. Darin A.V., Rakshun Y.V., Sorokoletov D.S., Darin F.A., Kalugin I.A., Maksimova N.V., Markovich T.I. Seasonal geochemical signals in varves of the lake Donguz-Orun bottom sediments from scanning X-ray fluorescence with the use of microcapillary X-ray optics. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.,* 2015, vol. 79, no. 1, pp. 122–125. doi 10.3103/S1062873815010104
7. Darin F.A., Rakshun Y.V., Sorokoletov D.S., Darin A.V., Kalugin V.M. Development of micro-X-ray fluorescence methods with synchrotron beams from the VEPP-3 storage ring and their use to study the distribution of elements in natural samples. *Yadernaya Fizika i Inzhiniring*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 86–90. (In Russ.). doi 10.1134/S2079562917010067
8. Narozhnyi Yu.K., Osipov A.V. Oroclimatic conditions of glaciation in Central Altai. *Izv. Russ. Geogr. O-va*, 1999, vol. 131, no. 3, pp. 49–57. (In Russ.).
9. Nenasheva G.I. *Rastitel'nost' i klimat golotsena mezhgornykh kotlovin Tsentral'nogo Altaya* [Vegetation and Climate of the Holocene of Intermountain Basins of Central Altai]. Barnaul: Altai. Univ., 2013. 164 p.
10. Rikhvanov L.P., Okishev P.A., Soboleva N.P., Mataev E.I. Geochemical characteristics of varved clays of the Altai Mountains and the possibility of their use in glaciological studies. *Izv. Tomsk. Politekh. Univ., Inzhiniring Georesur.,* 2015, vol. 326, no. 2, pp. 23–36. (In Russ.).
11. Syromyatina M.V., Moskalenko I.G., Chistyakov K.V. Tendencies of climate change in the Altai mountains against the background of global climate changes derived from instrumental and dendrochronological data. *Vestn. S.-Peterb. Univ., Ser. 7: Geol. Geogr.*, 2010, no. 3, pp. 82–91. (In Russ.). doi 10.18551/rjoas.2015-07.01
12. Fedak S.I., Turkin Yu.A., Gusev A.I., Shokalsii S.P. et al. *State Geological Map of the Russian Federation*. Scale 1 : 1000000 (third generation). *Ser. Altae-Sayanskaya* [Series Altai-Sayan]. Sheet: M-45: *Gorno-Altaysk. Ob"yasnitel'naya zapiska* [Gorno-Altaysk. Explanatory Letter]. St. Petersburg: VSEGEI, 2011. 576 p.
13. Alexandrin M.Y., Darin A.V, Kalugin I.A., Dolgova E.A., Grachev A.M, Solomina O.N. Annual sedimentary record from lake Donguz-orun (central Caucasus) constrained by high resolution SR-XRF analysis and its potential for climate reconstructions. *Front. Earth Sci.*, 2018, vol. 6, p. 158. doi 10.3389/feart.2018.00158
14. Appleby P. The use of 210Pb and 137Cs as tracers in modelling transport processes in lake catchment systems. *Stud. Environ. Sci.*, 1997, vol. 68, pp. 441–448. doi 10.1016/S0166-1116(09)70124-4
15. Brauer A. Annually laminated lake sediments and their paleoclimatic relevance. In *The Climate in Historical Times.* Fischer H. et al., Eds. Berlin: Springer, 2004, pp. 109–127. doi 10.1007/978-3-662-10313-5_7
16. Butz C., Grosjean M., Fischer D., Wunderle S., Tylmann W., Rein B. Hyperspectral imaging spectroscopy: A promising method for the biogeochemical analysis of lake sediments. *J. Appl. Remote Sens.*, 2015, vol. 9, no. 1, 096031. doi 10.1117/1.JRS.9.096031
17. Christiansen B., Charpentier Ljungqvist F. The extra-tropical Northern Hemisphere temperature in the last two millennia: Reconstructions of low-frequency variability. *Climate of the Past*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 765–786. doi 10.5194/cp-8-765-2012
18. Croudace I., Löwemark L., Tjallingii R., Zolitschka B. Current perspectives on the capabilities of high resolution *XRF* core scanners. *Quat. Int.,* 2019, vol. 514, pp. 5–15. doi 10.1016/j.quaint.2019.04.002
19. Darin A., Chu G., Maksimov M., Novikov V. Layer counting and isotopic analysis of the recent bottom sediments of the glacial lake Kucherla (Russia, Gorny Altai). In *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*. Sofia, 2019, pp. 257–264. doi 10.5593/sgem2019V/4.2/S06.035
20. Darin F., Kalugin I., Darin A., Rakshun Y. The study internal structure of the annual layers in lake sediments using synchrotron radiation with x-ray focusing optics. *Acta Geol. Sin.,* 2014, vol. 88, no. 1, pp. 5–6. doi 10.1111/1755-6724.12265_1
21. Cook E.R., Krusic P.J., Anchukaitis K.J., Buckley B.M., Nakatsuka T., Sano M. Tree-ring reconstructed summer temperature anomalies for temperate East Asia since 800 C.E. *Clim. Dyn.*, 2013, vol. 41, nos. 11–12, pp. 2957–2972. doi 10.1007/s00382-012-1611-x
22. Eichler A., Olivier S., Henderson K., Laube A., Beer J., Papina T., Heinz W., Schwikowski M. Temperature response in the Altai region lags solar forcing. *Geophys.*

Res. Lett., 2009, vol. 36, L01808. doi 10.1029/2008GL035930

23. Shi F., Yang B., Mairesse A., Gunten L., Li J., Bräuning A., Yang F., Xiao X. Northern Hemisphere temperature reconstruction during the last millennium using multiple annual proxies. *Clim. Res.*, 2013, vol. 56, pp. 231–244. doi 10.3354/cr01156
24. IPCC. Climate Change 2013: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovern- mental Panel on Climate Change*. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., Eds. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
25. Klimenko V., Matskovsky V., Dahlmann D. Multi-archive temperature reconstruction of the Russian Arctic for the past two millennia. *Geogr. Environ. Sustain.*, 2014, vol. 7, no. 1, pp. 16–29. doi 10.24057/2071-9388-2014-7-1-16-29
26. Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, vol. 26, pp. 759–762. doi 10.1029/1999GL900070
27. Mann M., Zhang Z., Rutherford S., Bradley R., Hughes M., Shindell D., Ammann C., Faluvegi G., Ni F. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science,* 2009, vol. 326, no. 5957, pp. 1256–1260. doi 10.1126/science.1177303
28. 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, vol. 433, no. 7026, pp. 613–617. doi 10.1038/nature03265
29. Rothwell R., Croudace I. Micro-XRF studies of sediment cores: A perspective on capability and application in the environmental sciences. In *Micro-XRF Studies of Sediment Cores. Developments in Paleoenvironmental Research*. Croudace I., Rothwell R., Eds. Dordrecht: Springer, 2015, vol. 17, pp. 1–21. doi 10.1007/978-94-017-9849-5_1
30. Trachsel M., Kamenik C., Grosjean M., McCarroll D., Moberg A., Brázdil R., Büntgen U., Dobrovolný P., Esper J., Frank D., Friedrich M., Glaser R., Larocque-Tobler I., Nicolussi K., Riemann D. Multi-archive summer temperature reconstruction for the European Alps, AD 1053–1996. *Quat. Sci. Rev.*, 2012, vol. 46, pp. 66–79. doi 10.1016/j.quascirev.2012.04.021
31. Tylmann W., Zolitschka B. Annually laminated lake sediments—recent progress. *Quaternary*, 2020, vol. 3, no. 1, pp. 1–3. doi 10.3390/quat3010005
32. Yang B., Braeuning A., Johnson K.R., Yafeng S. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, vol. 29, no. 9, pp. 1324–1328. doi 10.1029/2001gl014485
33. Zolitschka B., Francus P., Ojala A.E., Schimmelmann A. Varves in lake sediments – a review. *Quat. Sci. Rev.*, 2015, vol. 117, pp. 1–41. doi 10.1016/j.quascirev.2015.03.019