

**ARCHIVE DATA ON CLIMATE CHANGES AND SEISMIC EVENTS IN GLACIAL CLAYS
OF LAKE KUCHERLA (ALTAI REGION, RUSSIA)**

A.V. Darin ¹✉, **G. Chu** ², **Q. Sun** ³, **V.V. Babich** ¹, **I.A. Kalugin** ¹, **T.I. Markovich** ¹,
V.S. Novikov ¹, **F.A. Darin** ⁴, **Y.V. Rakshun** ⁴

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 19 Beitucheng West Road, Chaoyang Dist, Beijing 100029, China

³ National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, 26 Baiwanzhuang Rd, Beijing 100037, China

⁴ Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 11, Academician Lavrentiev Ave, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. Core samples taken from the bottom sediments of the glacial Lake Kucherla (Gorny Altai, Russia) clearly show annual layers represented by glacial clays. In our study, age-depth modeling is based the varve chronology and Cs-137, Pb-210 and C-14 isotope data. Our model is a highly accurate and reliable demonstration of the annual sedimentation history within the past 1400 years. The time series of geochemical indicators of climate change were obtained by synchrotron radiation micro X-ray fluorescence (SR-μXRF) core scanning. Instrumental meteorological observations from 1940 to 2016 were used to construct transfer functions for the average annual temperatures and atmospheric precipitation amounts. A geochemical trace of a catastrophic seismic event, the Mongolian earthquake of 1761, was found in the cross-section of the bottom sediments.

KEYWORDS: glacial lake; varved clay; SR-μXRF scanning; climate reconstruction; seismic event

FUNDING: The study was supported by the RFBR grants No. 18-55-53016 and No. 19-05-50046 (Submicron XRF-SI) using the equipment of Siberian Center for Synchrotron and Terahertz Radiation, based on Complex VEPP-4 – VEPP- 2000 (project RFMEFI62119X0022 of the RF Ministry of Education and Science).

SHORT COMMUNICATION

Received: February 16, 2020

Revised: April 6, 2020

Accepted: April 14, 2020

Correspondence: Andrey V. Darin, darin@ngs.ru

FOR CITATION: Darin A.V., Chu G., Sun Q., Babich V.V., Kalugin I.A., Markovich T.I., Novikov V.S., Darin F.A., Rakshun Y.V., 2020. Archive of climate changes and tectonic events in the glacial clays of Lake Kucherla (Altai Region, Russia). *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (3), 624–631. doi:10.5800/GT-2020-11-3-0495

АРХИВ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В ЛЕДНИКОВЫХ ГЛИНАХ ОЗЕРА КУЧЕРЛИНСКОГО (АЛТАЙ)

А.В. Дарьин¹, Г. Чу², Ц. Сан³, В.В. Бабич¹, И.А. Калугин¹, Т.И. Маркович¹,
В.С. Новиков¹, Ф.А. Дарьин⁴, Я.В. Ракшун⁴

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Россия

² Институт геологии и геофизики КАН, Пекин, Китай

³ Национальный исследовательский центр геоанализа КАГН, Пекин, Китай

⁴ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 11, Россия

АННОТАЦИЯ. В керне донных осадков ледникового озера Кучерлинского (Алтай) видна годовая слоистость (ленточные глины). На основе данных варвохронологии (подсчет слоев) и изотопных исследований (Cs-137, Pb-210, C-14) была построена точная возрастная модель (глубина керна – возраст осадка) на 1400 лет назад. Методом сканирующего микрорентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения получены временные ряды геохимических индикаторов климатических изменений. Для временного интервала 1940–2016 гг. на основе инструментальных метеонаблюдений построены трансферные функции для среднегодовых значений температуры и количества атмосферных выпадений. В разрезе донных осадков найден геохимический след катастрофического сейсмического события – Монгольского землетрясения 1761 г.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: приледниковое озеро; ленточные глины; варвы; микрорентгенофлуоресцентный анализ; климатическая реконструкция; сейсмическое событие

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты №18-55-53016 и №19-05-50046 (суб-микронный РФА-СИ) с использованием оборудования ЦКП «СЦСТИ» (ИЯФ СО РАН) на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000», проект Министерства образования и науки РФ RFMEFI62119X0022.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование варвных отложений ледниковых озер дает возможность точной привязки всех интервалов осадка к временной шкале, что позволяет рассматривать ежегодно ламинированные осадочные последовательности как один из важнейших палеоархивов [Ojala et al., 2012], сохраняющих хорошо датированную запись непрерывных климатических изменений и региональных сейсмических событий.

Отдельные годовые слои образуются сезонными поставками взвешенных частиц. В случае ледниковых озер источником вещества являются водные потоки таяния ледников. Как правило, основное количество вещества поступает в водоем в период весенне-летнего паводка. Слоистость в осадке обусловлена неравномерным осаждением терригенного материала. Более крупные – алевритовые – частицы осаждаются в весенне-летний период, мелкие – глинистые – в осенне-зимний. Таким образом происходит формирование отдельных годовых слоев, состоящих из пары алеврит – глина. Керна варвных отложений выглядят как набор ритмично повторяющихся слоев разного цвета, что облегчает визуальный подсчет годовых слоев и позволяет создать точную возрастную модель (глубина керна – возраст слоя осадка).

Использование синхротронного излучения для рентгенофлуоресцентного анализа (микро-РФА-СИ) донных осадков позволяет значительно снизить предел обнаружения и определять одновременно до 30 пороодообразующих и следовых элементов [Dar'in et al., 2013].

Использование методик непрерывного сканирующего микроанализа твердых образцов донных отложений [Dar'in et al., 2013] дает возможность получать временные ряды изменения состава датированных слоев осадка на интервале последних десятилетий и провести сравнение с данными региональных инструментальных метеонаблюдений. Найденные зависимости можно использовать для построения на калибровочном интервале уравнений (трансферных функций), количественно связывающих основные региональные метеопараметры с составом донных отложений. Аппроксимация трансферных функций на всю глубину опробования керна позволяет создавать количественные палеоклиматические реконструкции по литолого-геохимическим прокси. При этом отдельные интервалы керна, существенно отличающиеся по литолого-геохимическим параметрам от интервала калибровки, должны рассматриваться как следы одномоментных катастрофических, погодно-климатических или сейсмотектонических событий.

Цель данной работы – датировка керна донных осадков приледникового озера Кучерлинского (Алтай) и выявление следов крупных сейсмических событий последнего тысячелетия.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются донные отложения высокогорного ледникового озера Кучерлинского (1790 м над уровнем моря), расположенного на северном склоне Катунского хребта в верховьях реки

Кучерла в котловине, обрамленной вершинами от 2700 до 3200 м. Озеро, длиной 5 км, шириной 1 км, при максимальной глубине 45 м, находится в труднодоступной местности и подвержено минимальному антропогенному воздействию (рис.1).

3. МЕТОДЫ

3.1. Отбор керна и подготовка образцов

Керн донных осадков озера Кучерлинского 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 112 см.

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 керна плотно был закрыт пробкой без деформации. Керн был доставлен в лабораторию Института геологии и минералогии (г. 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 статье [Dar'in et al., 2013]. Из твердых препаратов были изготовлены плоскопараллельные образцы для микро-РФА толщиной 2 мм и оптические шлифы.

3.2. Варвохронология

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. Пример подсчета для одного из шлифов представлен на рис. 2.

3.3. Изотопные исследования

Распределение активности изотопов Cs-137 и Pb-210 для верхнего интервала керна 0–200 мм сделано в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) с использованием гамма-спектрометрии по методике [Bobrov et al., 1999]. Результаты представлены на рис. 3.

Датировка образцов радиоуглеродным анализом проводилась в ЦКП «Геохронология кайнозоя» (г. Новосибирск) и Beta Analytic (г. Майями, США).

3.4. Сканирующий микроанализ образцов донных осадков

Для анализа были использованы 2-миллиметровые 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 (рис. 4). Это давало возможность дополнительного контроля точности привязки данных микро-РФА к датированным слоям донных осадков.

Сканирующий микро-РФА-СИ пластинок проводился в ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» по методике [Dar'in et al., 2013]. Сканирование осуществлялось с шагом 0.5 мм, что меньше ширины годовых слоев. Таким образом, полученные линейные (на миллиметровой шкале) профили



Рис. 1. Расположение озера Кучерлинского.

Fig. 1. Location of the Lake Kucherla.

изменения элементного состава донного осадка по глубине керна можно было пересчитать во временные ряды с годовым временным разрешением.

Детальные исследования элементного состава отдельных годовых слоев и выделенных интервалов керна проводились в Шанхайском центре синхротронных исследований (SSRF <http://e-ssrf.sinap.cas.cn/>). Для сканирующего микро-РФА-СИ использовались оптические шлифы, что позволяло получить наиболее точную информацию об изменении состава донного осадка в процессе образования годового слоя. Использование фокусирующей рентгеновской оптики позволило увеличить разрешающую способность анализа до 25 мкм.

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.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Построение возрастной модели (глубина керна – возраст осадка)

Полученные изотопные данные позволяют оценить положение максимальной активности Cs-137 в 160–170 мм от границы вода – осадок (см. [рис. 3](#)). Это соответствует времени глобальных атмосферных выпадений после ядерных испытаний на Новоземельском

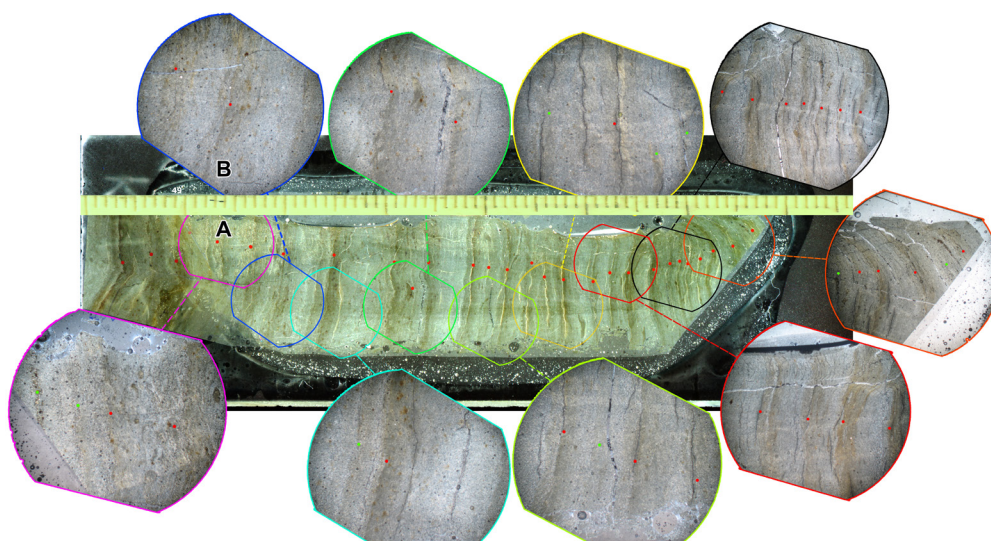


Рис. 2. Изображение шлифа без увеличения, полученное на оптическом сканере (A) и участки шлифа в оптическом микроскопе с 2.5-кратным увеличением (B).

Fig. 2. Image of a thin section without magnification made on an optical scanner (A) and parts of a thin section in an optical microscope with a 2.5x magnification (B).

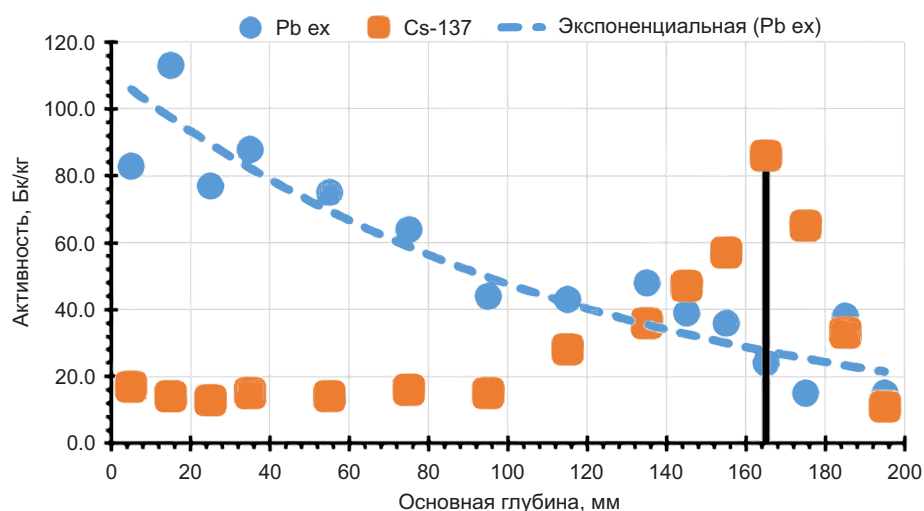


Рис. 3. Распределение активности изотопов Cs-137 и Pb-210 вдоль верхней части (0–200 мм) керна донных осадков озера Кучерлинского.

Fig. 3. Distribution of the activity of the Cs-137 and Pb-210 isotopes along the upper part (0–200 mm) of the core of bottom sediments of Lake Kucherla.

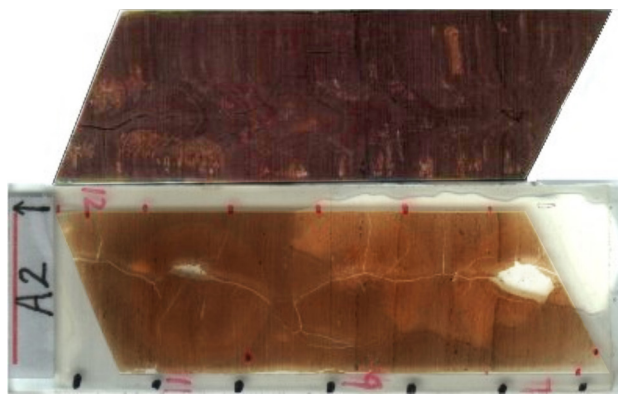


Рис. 4. Плоскопараллельная пластинка толщиной 2 мм (вверху), используемая для проведения микро-РФА-СИ и оптический шлиф (внизу), соответствующий анализируемой поверхности, изготовлены из твердого препарата донного осадка.

Fig. 4. A plane-parallel plate with a thickness of 2 mm (top) used to micro-XFA SR and an optical thin section (bottom) corresponding to the analyzed surface were cut out from a solid sample of bottom sediment.

полигоне 1961–1962 гг. [Appleby, 1997]. 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 верхнего интервала керна 0–200 мм (рис. 5, б) 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 [Dar'in et al., 2019a, 2019b].

Построение возрастной модели на интервале керна 200–1120 мм (рис. 5, а) выполнено по данным подсчета визуально выделяемых слоев на фото исходного (влажного) керна и исследования шлифов на интервалах 480–650 мм и 940–1110 мм. Полученные данные были усреднены и аппроксимированы экспоненциальной функцией. Правильность модели подтверждается совпадением с датировками образцов, взятых с глубин 1050–1060 мм (анализ выполнен в ЦКП «Геохронология кайнозоя») и 1000–1010 мм (анализ выполнен в Beta Analytic Inc.).

4.2. Построение временных рядов геохимических данных

С использованием возрастной модели был проведен пересчет линейной глубины керна в возрастную (лет назад). После этого дробные значения возраста были переведены в целочисленные. 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, начало временной шкалы (верх керна) датируется 2017 г. Таким образом были построены временные ряды для всех анализируемых элементов. Пример временного ряда для отношения Rb/Sr представлен на рис. 6, а.

4.3. Выделение климатических индикаторов. Построение трансферных функций

Для поиска климатически коррелированных геохимических индикаторов были использованы инструментальные данные ближайшей метеостанции Кара-Тюрек, расположенной в 10 км от озера Кучерлинского. Доступны метеоданные за временной интервал 1940–2016 гг. (<http://meteo.ru/data>). С использованием методических приемов, подробно описанных в статье [Babich et al., 2015], методом множественной регрессии построены функции, связывающие региональные погодноклиматические параметры (среднегодовая температура – Т и количество атмосферных осадков – Pr) с литолого-геохимическими данными.

Функция для среднегодовой температуры выглядит следующим образом:

$$T = 1.103 \cdot Ti + 0.131 \cdot Ni - 0.939 \cdot Sr + 1.535 \cdot Y + 2.920 \cdot Nb - 1.623 \cdot Mo - 7.505.$$

Функция для атмосферных выпадений выглядит следующим образом:

$$Pr = 55.964 \cdot Mn + 93.354 \cdot Fe + 72.755 \cdot Ni - 179.487 \cdot Cu - 111.561 \cdot As - 143.347 \cdot Sr - 54.758 \cdot Y + 272.812 \cdot Mo + 642.349.$$

Коэффициенты корреляции на годовой шкале равны: для температуры +0.59, для атмосферных выпадений +0.51. Для 76 точек это значимые коэффициенты ($p=0.99$), свидетельствующие о наличии устойчивой линейной связи между вариациями региональных метеопараметров и составом донных осадков, формирующихся под воздействием внешних погодноклиматических условий.

4.4. Поиск следов катастрофических событий

Прежде чем использовать построенные трансферные функции для создания климатических реконструкций на весь временной интервал, перекрываемый керном, необходимо оценить качество временных рядов литолого-геохимических данных. В процессе осадкообразования возможны нарушения, связанные с резким изменением внешних условий, в первую очередь погодноклиматическими и сейсмическими катастрофическими событиями.

Событийный след в донных отложениях связан с нарушением скорости осадкообразования и обусловлен одномоментным вбросом большого количества вещества аллохтонного или автохтонного происхождения в виде оползней или турбидитов [Shanmugam, 2019; Kremer et al., 2017]. В ритмично-слоистых осадках след катастрофического события выделяется визуально в виде прослая, сильно отличающегося по толщине. Такой слой, имеющий мощность более 20 мм, был обнаружен в исследуемом разрезе на глубине 50 см (рис. 6, б, в).

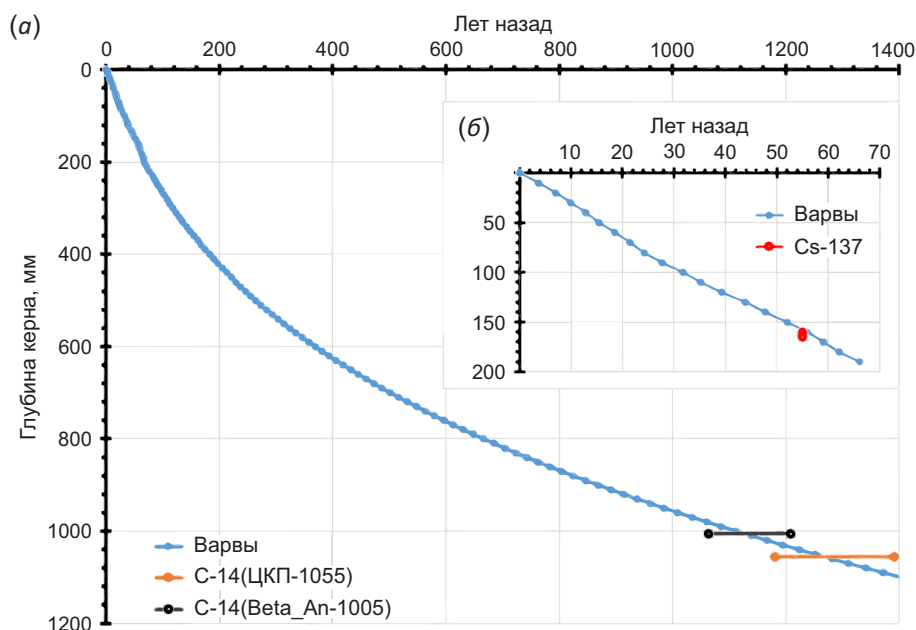


Рис. 5. Возрастные модели (глубина керна – возраст слоя осадка) для керна донных осадков Куч_2018.

(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 С-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.

Fig. 5. Age models (core depth – sediment layer age) for bottom sediment core Kuch_2018.

(а) – age model (core depth – age of the sediment layer) for core Kuch_2018 to the full depth of sampling. The model is built according to the data of varve chronology and verified by dating according to C-14. «ЦКП-1055» – analysis of a sample from a depth of 1050–1060 mm made in the «Cenozoic Geochronology». Beta_An-1005 – analysis of the sample from a depth of 1000–1010 mm made by «Beta Analytic Inc.». (б) – age model for the upper core interval of 0–200 mm according to the data of varve chronology and isotope analyzes of Cs-137.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Нахождение геохимических климатических индикаторов, имеющих устойчивую связь с основными метеопараметрами (среднегодовые T и Pr), дает основание рассматривать вариации элементного состава по глубине разреза донных осадков как реакцию на погодноклиматические изменения. При этом размах варьирования содержаний большинства породообразующих и микроэлементов на всем интервале керна не выходит за пределы, фиксируемые на интервале калибровки (1940–2016 гг.). Таким образом, можно сделать вывод, что вариации внешних погодноклиматических условий на протяжении последних 1400 лет не отличались принципиально от экстремальных значений последних десятилетий, хотя и проявляют известные глобальные тренды и цикличности.

Единственный геохимический индикатор, выделяющийся во временных рядах аналитических данных, – это отношение Rb/Sr на интервале 496–522 мм (рис. 6, б). Изменение отношения Rb/Sr в современных озерных отложениях в первую очередь связано с изменением скорости выветривания стронция в частицах разных размеров [Zeng et al., 2013; Chang et al., 2013]. Наличие устойчивой связи размера частиц в осадке и рубидий-стронциевого отношения было показано авторами статьи в работах 2013–2015 гг. на примере

донных отложений озера Телецкого (Алтай) [Dar'in et al., 2013] и приледникового озера Донгуз-Орун (Кавказ) [Darin et al., 2015].

Таким образом, как исследование шлифов, так и данные сканирующего микроанализа показывают наличие в интервале 496–522 мм (рис. 6, б, в) следов одномоментного вброса большого количества вещества, близкого по составу, но имеющего частицы разного размера – от алевритовых до глинистых. Дифференциация вещества в процессе осаждения привела к наблюдаемым изменениям структуры осадка и отношения Rb/Sr как индикатора среднего размера частиц.

Датировка исследуемого интервала по возрастной модели дает величину в 1764 г.н.э. (рис. 6, а), что в пределах погрешности модели совпадает с датой знаменитого Монгольского землетрясения, произошедшего 9 декабря 1761 г. на восточных склонах Монгольского Алтая. Землетрясение с магнитудой 8 и интенсивностью порядка 11 баллов произошло в пределах крупного северо-западного разлома Ар-Хутел. В литературе подробно описаны вышедшие на поверхность сейсморазрывы вдоль Кобдинского разлома (Ховд) – Чихтэйн и АрХутэл, длиной более 200 км [Solonenko, Florensov, 1985].

Полученные результаты показывают, что разрез донных осадков озера Кучерлинского представляет

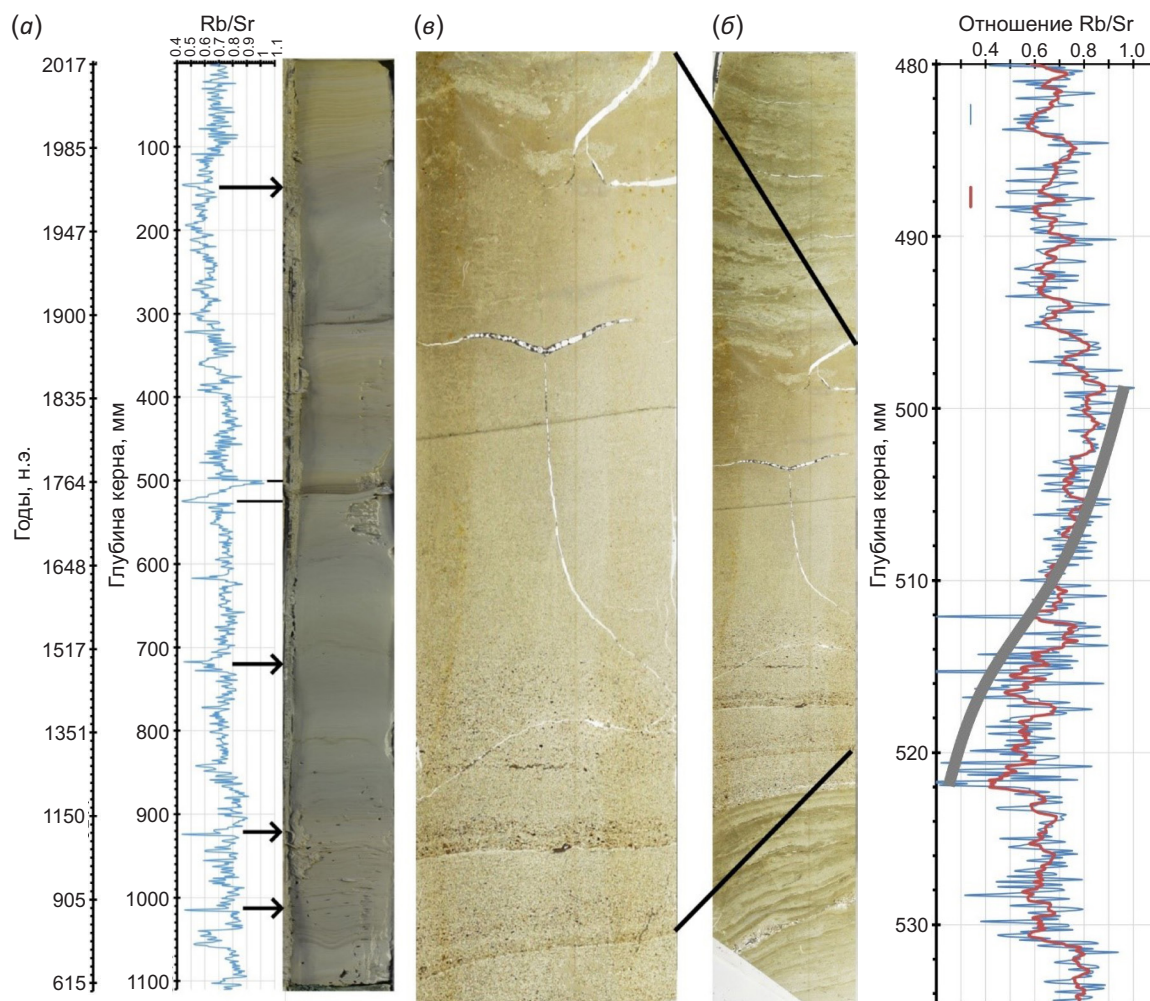


Рис. 6. Изменение отношения Rb/Sr по глубине керн Куч_2018.

(а) – фотография поверхности влажного керн Куч_2018 и профиль распределения отношения Rb/Sr на линейной и временной шкалах; (б) – фотография шлифа Кч-10 (интервал 480–530 мм) и профиль распределения отношения Rb/Sr на линейной шкале; (в) – увеличенный фрагмент интервала 496–520 мм шлифа Кч-10.

Fig. 6. Change in the Rb / Sr ratio along the core depth Kuch_2018.

(а) – photograph of the surface of the wet core Kuch_2018 and the profile of the ratio Rb/Sr on the linear and time scales; (б) – photograph of the Kch-10 thin section (interval 480–530 mm) and the profile of the Rb/Sr ratio on a linear scale; (в) – an enlarged fragment of the interval 496–520 mm thin section Kch-10.

собой хорошо датированный архив непрерывных региональных климатических изменений последних тысячелетий, в котором также можно выделить сейсмические события на основе детальных литолого-геохимических исследований. Кроме найденных следов Монгольского землетрясения 1761 г., следует внимательно рассмотреть еще несколько временных интервалов, имеющих характерные признаки нарушений стабильного осадконакопления (рис. 6, а), с возможным выделением дополнительных литолого-геохимических индикаторов внешних воздействий сеймотектонического или погодно-климатического типа.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отработан метод сканирующего микро-РФА с использованием синхротронного излучения для исследования кернов донных осадков, содержащих ежегодно

ламинированные слои. Получены данные о распределении ряда породообразующих и следовых элементов по глубине керн с высоким пространственным разрешением. На основе данных варвохронологии и изотопных исследований была построена точная возрастная модель (глубина керн – возраст осадка) на 1400 лет назад. Показано, что изменения элементного состава донных отложений в озере Кучерлинском контролируются погодно-климатическими условиями и сейсмическими событиями. В разрезе донных осадков найден геохимический след катастрофического сейсмического события – Монгольского землетрясения 1761 г.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 18-55-53016 и № 19-05-50046 (субмикронный РФА-СИ), с использованием оборудования ЦКП «СЦСТИ»

(ИЯФ СО РАН) на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000», проект Министерства образования и науки РФ RFMEFI62119X0022.

8. ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Appleby P.G., 1997. The Use of ^{210}Pb and ^{137}Cs as Tracers in Modelling Transport Processes in Lake Catchment Systems. *Studies in Environmental Science* 68, 441–448. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(09\)70124-4](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(09)70124-4).

Babich V.V., Rudaya N.A., Kalugin I.A., Dar'in A.V., 2015. Complex Use of Geochemical Features of Bottom Deposits and Pollen Records for Paleoclimate Reconstructions (on the Example of Lake Teletskoye, the Altai Republic). *Siberian Journal of Ecology* 22 (4), 497–506 (in Russian) [Бабич В.В., Рудая Н.А., Калугин И.А., Дар'ин А.В. Опыт комплексного использования геохимических особенностей донных отложений и палинологических записей для палеоклиматических реконструкций (на примере оз. Телецкое, Российский Алтай) // Сибирский экологический журнал. 2015. Т. 22. № 4. С. 497–506]. <http://dx.doi.org/10.15372/SEJ20150401>.

Bobrov V.A., Kalugin I.A., Klerkx J., Duchkov A.D., Shcherbov B.L., Stepin A.S., 1999. The Rate of Recent Sedimentation in Lake Teletskoe According to Gamma-Spectroscopy (^{137}Cs) Data. *Geology and Geophysics* 40 (4), 530 (in Russian) [Бобров В.А., Калугин И.А., Клеркс Ж., Дучков А.Д., Щербов Б.Л., Степин А.С. Современная скорость осадконакопления в Телецком озере по данным гамма-спектрометрии (^{137}Cs) // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 4. С. 530].

Chang H., An Z., Wu F., Jin Z., Song A.Y., 2013. Rb/Sr Record of the Weathering Response to Environmental Changes in Westerly Winds across the Tarim Basin in the Late Miocene to the Early Pleistocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 386, 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.06.006>.

Darin A.V., Alexandrin M.Yu., Kalugin I.A., Solomina O.N., 2015. Influence of Meteorological Conditions on the Geochemistry of Modern Bottom Sediments Exemplified by Deposits of Donguz–Orun Lake, Caucasus. *Reports of the Academy of Sciences* 463 (5), 602 (in Russian) [Дар'ин А.В., Александрин М.Ю., Калугин И.А., Соломина О.Н. Связь метеорологических данных с геохимическими характеристиками современных донных осадков оз. Донгуз-орун, Кавказ // Доклады Академии наук. 2015. Т. 463. № 5. С. 602]. <https://doi.org/10.7868/S0869565215230176>.

Dar'in A.V., Babich V.V., Kalugin I.A., Markovich T.I., Rogozin D.Yu., Meidus A.V., Dar'in F.A., Rakshun Ya.V., Sorokoletov D.S., 2019a. Study of Geochemical Features of Annual Layers in Bottom Sediments of Freshwater Lakes by X-Ray Fluorescence Microanalysis with Excitation by Synchrotron Radiation. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics* 83 (11), 1572–1575 (in Russian) [Дар'ин А.В., Бабич В.В., Калугин И.А., Маркович Т.И., Рогозин Д.Ю., Мейдус А.В., Дар'ин 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 // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019а. Т. 83. № 11. С. 1572–1575]. <https://doi.org/10.1134/S0367676519110085>.

Dar'in A.V., Chu G., Maksimov M., Novikov V., 2019b. Layer Counting and Isotopic Analysis of the Recent Bottom Sediments of the Glacial Lake Kucherla (Russia, Gorny Altai). *Proceedings of 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM (December 9–11, 2019). Vol. 19. Iss. 4.2. Sofia – Bulgaria, p. 257–264.* <https://doi.org/10.5593/sgem2019V/4.2/S06.035>.

Dar'in A.V., Kalugin I.A., Rakshun Ya.V., 2013. Application of Scanning X-Ray Fluorescence Microanalysis Using Synchrotron Radiation to Study Variations in the Elemental Composition of Annual Layers in Thin Sections of Bottom Sediments of Lake Teletskoe. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics* 77 (2), 210 (in Russian) [Дар'ин А.В., Калугин И.А., Ракшун Я.В. Применение сканирующего рентгенофлуоресцентного микроанализа с использованием синхротронного излучения для изучения вариаций элементного состава годовых слоев в шлифах донных осадков оз. Телецкое // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 2. С. 210]. <https://doi.org/10.7868/S0367676513020129>.

Kremer K., Stefanie B. W., Reusch A., Fäh D., Strasser M., 2017. Lake-Sediment Based Paleoseismology: Limitations and Perspectives from the Swiss Alps. *Quaternary Science Reviews* 168, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.04.026>.

Ojala A.E.K., Francus P., Zolitschka B., Besonen M., Lamoureux S.F., 2012. Characteristics of Sedimentary Varve Chronologies – A Review. *Quaternary Science Reviews* 43, 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.04.006>.

Shanmugam G., 2019. Slides, Slumps, Debris Flows, Turbidity Currents, Hyperpycnal Flows, and Bottom Currents. *Encyclopedia of Ocean Sciences (Third Edition)* 4, 228–257. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10884-X>.

Solonenko V.P., Florensov N.A. (Eds), 1985. *Earthquakes and Foundations of Seismic Zoning of Mongolia*. Nauka, Moscow, 224 p. (in Russian) [Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии / Ред. В.П. Солоненко, Н.А. Флоренсов. М.: Наука, 1985. 224 с.].

Zeng Y., Chen J., Xiao J., Qi L., 2013. Non-Residual Sr of the Sediments in Daihai Lake as a Good Indicator of Chemical Weathering. *Quaternary Research* 79 (2), 284–291. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2012.11.010>.