

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.583.7551.583.13550.93550.423551.794

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИАРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ЗА ПОСЛЕДНЕЕ ТЫСЯЧЕЛЕТИЕ ПО ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ ДОННЫХ ОСАДКОВ ОЗЕРА ПЕЮНГДА (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ, ЭВЕНКИЯ)

© 2024 г. А. В. Дарьин¹, Д. Ю. Рогозин^{2,*}, В. С. Новиков¹, А. В. Мейдус³, В. В. Бабич,
Т. И. Маркович¹, Я. В. Ракшун⁴, Ф. А. Дарьин⁴, Д. С. Сороколетов⁴,
академик РАН А. Г. Дегерменджи²

Поступило 14.09.2023 г.

После доработки 24.10.2023 г.

Принято к публикации 30.10.2023 г.

С помощью сканирующего микро-рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения получены профили изменения по глубине разреза элементного состава ленточных глин озера Пеюнгда (Красноярский край, Эвенкия), расположенного в 30 км к юго-западу от эпицентра Тунгусской катастрофы 1908 года. Возрастная модель подтверждается наличием датированного слоя аномальной мощности, связанного с падением и взрывом Тунгусского космического тела (ТКТ). Изменения содержаний элементов по датированным слоям керна сопоставлены с данными инструментальных метеонаблюдений за последнее столетие, и найдена связь среднегодовой температуры региона и элементного состава одновозрастных слоев донных осадков (трансферная функция). Аппроксимация трансферной функции на глубину опробования осадочного разреза позволила реконструировать температуру воздуха в исследуемом регионе на протяжении последних 1000 лет. Сравнение полученной реконструкции среднегодовых температур района исследования с глобальными температурными реконструкциями для Арктического региона за этот же период показывает наличие общих трендов и экстремумов.

Ключевые слова: палеоклиматические реконструкции, геохимия, донные отложения, Тунгусский метеорит, озеро Пеюнгда, Красноярский край

DOI: 10.31857/S2686739724020192

Достаточно хорошо исследованная динамика среднегодовых температур воздуха северного полушария за последние 2000 лет складывается из набора локальных палеореконструкций, при этом пространственные закономерности остаются недостаточно определенными [1]. Многие исследования были сосредоточены на климатических изменениях в голоцене в Европе, Северной Америке, Гренландии и Китае [2, 3].

Недавняя реконструкция температуры в Арктике за 2000 лет показывает, что среднегодовая температура на протяжении последних тысячи лет была сопоставима или даже выше, чем в XIX–XX веках [3–8]. На сегодняшний день Арктика является регионом с самым быстрым повышением среднегодовой температуры поверхности [6, 8, 9], скорость которого в два раза выше, чем в среднем по миру. Данный феномен также известен, как “полярное усиление” [8, 10, 11].

Реконструкции высокого временного разрешения (год на тысячелетней шкале) с количественной калибровкой по современным инструментальным метеонаблюдениям являются наиболее объективными для понимания динамики региональных природных климатических изменений. В настоящем исследовании представлена первая климатическая реконструкция с высоким временным разрешением для района,

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск, Россия

²Институт биофизики Сибирского отделения
Российской Академии наук, Красноярск, Россия

³Красноярский Государственный Педагогический
Университет им. Астафьева, Красноярск, Россия

⁴Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск, Россия

*E-mail: rogozin@ibp.ru

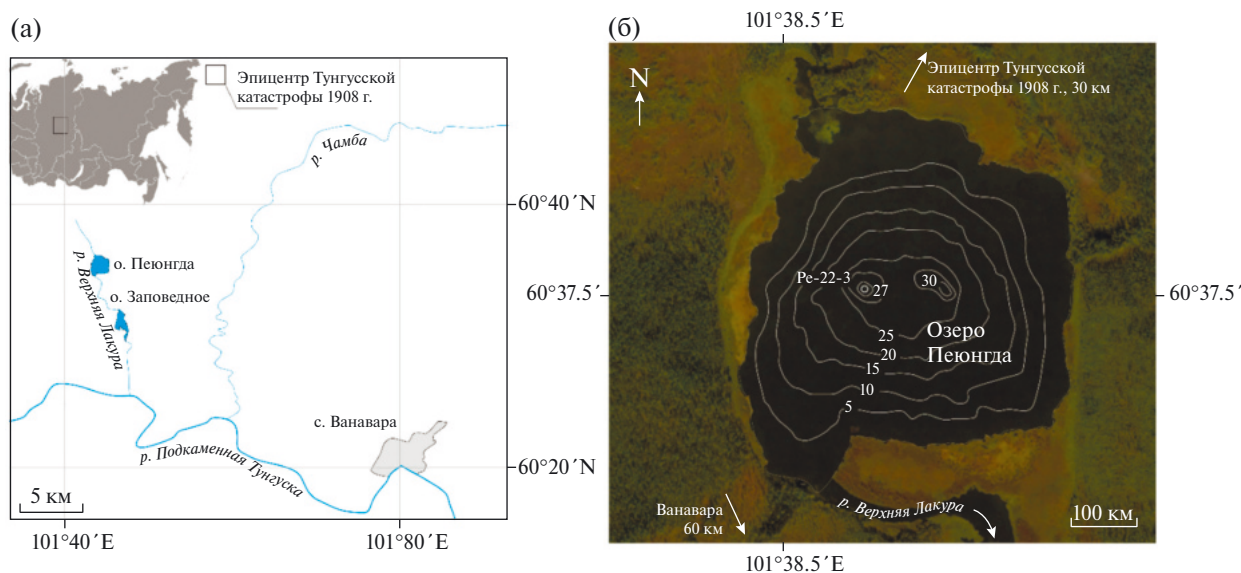


Рис. 1. а) Географическое положение озера Пеюнгда; б) данные батиметрии и место отбора керна [12].

расположенного в приарктической части Восточной Сибири.

Озеро Пеюнгда ($60^{\circ}37'30''$ с.ш., $101^{\circ}38'47''$ в.д.; 259 м н.у.м) находится на границе Государственного природного заповедника “Тунгусский” (Эвенкийский район Красноярского края), в 60 км от поселка Ванавара, и приблизительно в 30 км

к юго-западу от предполагаемого эпицентра взрыва Тунгусского космического тела (ТКТ) 1908 г. Через озеро протекает небольшая река Верхняя Лакура, приток реки Подкаменная Тунгуска. Озеро пресноводное, округлой формы диаметром более 800 м и максимальной глубиной 30 м [12]. Площадь составляет около 0.6 км^2 (рис. 1).

В сентябре 2022 года из озера Пеюнгда был отобран керн длиной 1187 мм (рис. 2). Отбор осуществлялся с помощью гравитационного пробоотборника UWITEC (Австрия) в центральной части озера. При отборе и последующей транспортировке особое внимание уделялось сохранности верхушки керна.

Донные отложения озера Пеюнгда представляют собой тонкодисперсные темно-коричневые и черные илы с большим содержанием органики и слабо выраженной слоистой структурой, в отложениях глубже 1 м характер осадка меняется на более плотный, с более выраженной слоистостью. На глубине 78 мм наблюдается наличие визуально выделяемого светлого слоя мощностью до нескольких мм (рис. 2).

Твердые препараты образцов донных отложений, отобранных по глубине керна, готовились по методике, предложенной в работе [13] и адаптированной для микро-РФА исследований [14]. Из твердого препарата готовились пластинки (толщиной 2 мм) для микро-РФА сканирования с плоскопараллельными полированными поверхностями и оптические шлифы для визуального подсчета годовых слоев.

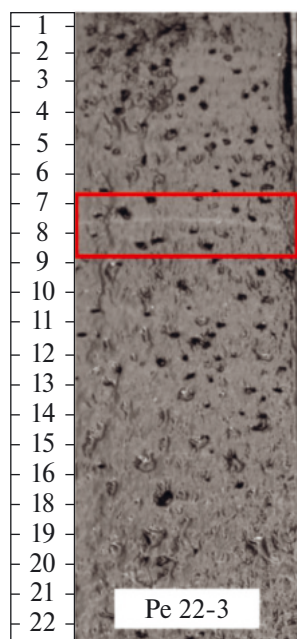


Рис. 2. Фрагмент керна донных отложений озера Пеюнгда, глубина в см от границы вода–осадок. Красным выделен слой, маркирующий взрыв ТКТ 1908 г.

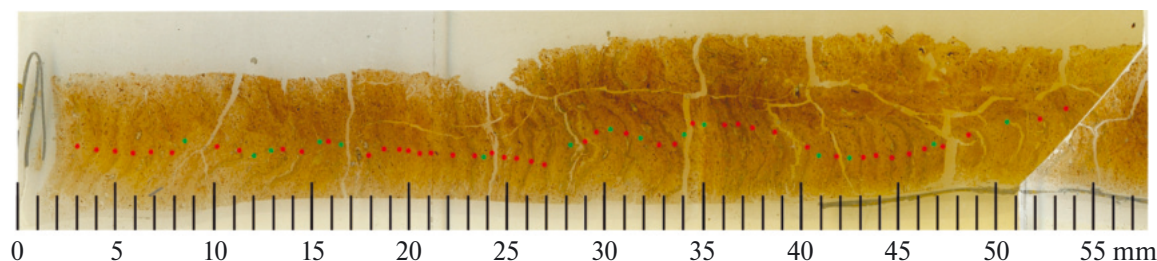


Рис. 3. Изображение шлифа Peu-22–3 без увеличения, полученное на оптическом сканере. Красными точками показаны минимально (надежно) выделяемые годовые слои, зелеными — дополнительные.

Сканирующий микро-РФА на пучках синхротронного излучения проводился в ЦКП “Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения” по методике [15]. Шаг сканирования составлял 1 мм, время измерения в точке — 30 сек. В каждой точке одновременно определялись следующие породообразующие и следовые элементы: К, Са, 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. Дополнительно регистрировалось отношение упруго/неупруго рассеянного на образце излучения — Co/Inc.

Подсчет проводился по визуально выделяемой паре слоев (весенне-летний и зимний), составляющей один годовой цикл осадкообразования. Перерывов в слоистости не наблюдалось, однако не во всех случаях годовые слои выделяются однозначно. Подсчет проводился по максимальному и минимальному количеству визуально выделенных пар слоев (рис. 3). Возрастная модель для

верхнего интервала керна 0–100 мм (рис. 4) была построена по данным 3-кратного независимого подсчета годовых слоев.

В 2015 г. в озере Заповедное в 15 км от озера Пеюнга был отобран керн, в котором наблюдался светлый слой толщиной до 8 мм, выделяющийся повышенным содержанием титана, рубидия, циркония и ряда других элементов. 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 [16]. Светлый слой в разрезе донных отложений озера Пеюнга также имеет похожие геохимические аномалии и, вероятно, маркирует взрыв ТКТ, поэтому был использован для верификации возрастной модели (рис. 4).

С использованием возрастной модели (глубина керна — возраст осадка) данные об элементном составе донного осадка были пересчитаны

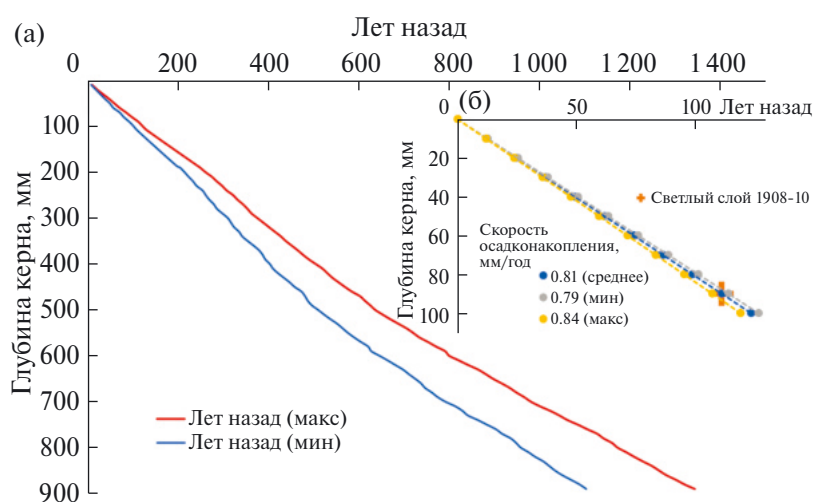


Рис. 4. Возрастная модель: а) для верхнего интервала керна Peu-22–3 (0–100 мм) по данным варвохронологии и положению визуально выделяемого слоя 1908–1910 гг.; б) на полную глубину опробования. Макс — подсчет только надежно выделяемых слоев, мин — надежных и предполагаемых.

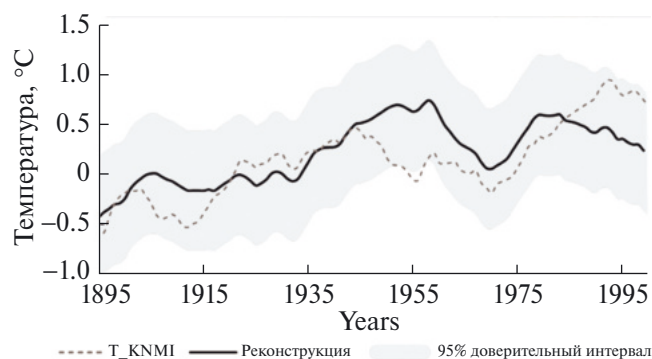


Рис. 5. Сглаженные 10-летние температуры на интервале 1895–2003 гг. (<https://climexp.knmi.nl>) и реконструкция по геохимическим данным, 95%-ный интервал погрешности реконструкции.

из линейной шкалы (глубина керна от границы вода–осадок) в целочисленный временной ряд и усреднены с шагом в 3 года. При поиске

взаимосвязи между геохимическими параметрами и метеопараметрами использовались данные ближайшей метеостанции в пос. Ванавара, доступные с 1895 по 2000 гг. (<https://climexp.knmi.nl>; <http://meteo.ru/data/156-temperature>). Методом множественной регрессии [17], была построена трансферная функция, связывающая региональную среднегодовую температуру с литолого-геохимическими данными:

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

где Br, Rb – концентрации брома и рубидия в г/т (ppm), Co/Inc – отношение упруго/неупруго рассеянного на образце возбуждающего излучения.

Не останавливаясь детально на обсуждении вопроса о связи температуры и литолого-геохимических параметров датированных слоев, входящих в представленное уравнение, и рассматривая всю процедуру математической обработки как “черный ящик”, отметим только, что

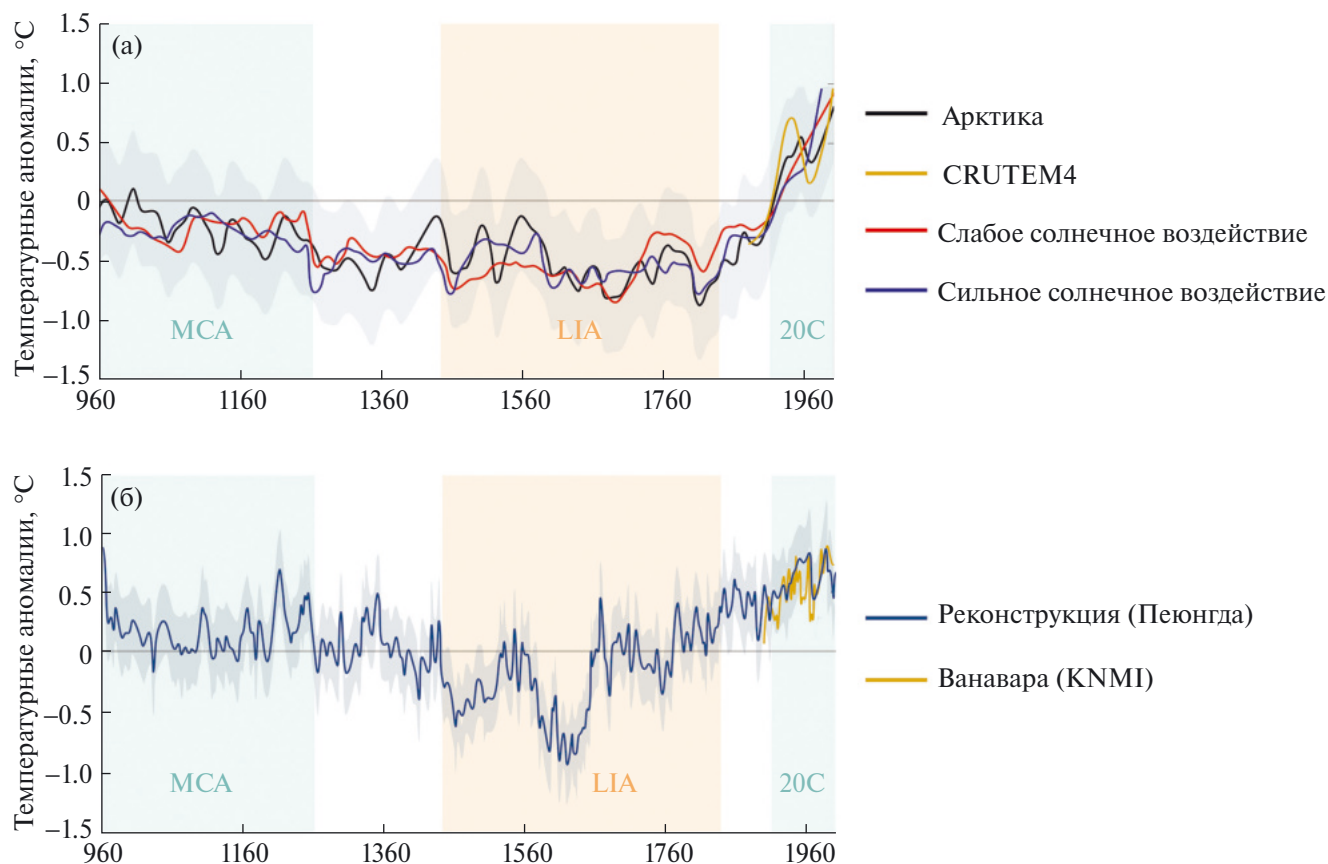


Рис. 6. Региональные температурные реконструкции: а – сравнение литературных метеоданных (CRUTEM4 – набор данных глобальных исторических аномалий температуры воздуха с 1850 года) и реконструированных изменений температуры Арктики [9, 19]; б – сравнение средних десятилетних инструментальных метеоданных (п. Ванавара) и полученной нами температурной реконструкции в районе озера Пеюнгда. Серым показан 95%-ный интервал неопределенности.

содержание брома может рассматриваться как мера органической компоненты донного осадка как аллохтонного, так и автохтонного происхождения, а содержание рубидия как мера вещества терригенного сноса. Отношение Co/In определяется рентгеновской плотностью вещества в точке измерения и в ряде случаев коррелирует с климатическими параметрами [18].

Для полученной функции коэффициент корреляции между исходными метеоданными, используемыми для обучения (1895–2000 гг.) и расчетными величинами составил $+0.58$ ($n = 105$, $p = 0.01$). На рис. 5 представлен сглаженный 10-летний метеоярд температур на интервале обучения, реконструкция по трансферной функции и интервал погрешности. С помощью полученной трансферной функции была реконструирована температура для всего исследованного интервала (до глубины 900 мм), что соответствует периоду 2003–967 гг.н.э. (рис. 6).

Выделяется средневековое потепление (X–XIII вв.), а также, несмотря на имеющиеся наибольшие отличия, на всех реконструкциях отчетливо проявлен малый ледниковый период (XIV–XIX вв.) и современное потепление с начала XX в. Реконструированные температурные тренды имеют схожие периоды цикличности. Для большинства временных интервалов структура температурных вариаций совпадает (рис. 6). Представленные реконструкции совпадают в пределах 95%-ного интервала погрешности, что позволяет говорить о правильности использованного методического подхода и полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Донные отложения озера Пеюнгда представляют собой тонкослоистый осадок, содержащий ритмично-переслаивающиеся отдельные годовые слои (ленточные глины), что позволяет строить надежную возрастную модель глубина керна — возраст слоя осадка подсчетом отдельных пар-слоев.

2. В озере Пеюнгда и ряде других озер региона визуально и по геохимическим аномалиям выделяется слой, связанный со взрывом ТКТ в 1908 г., что позволяет верифицировать возрастные модели на интервале последнего столетия.

3. 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 временным разрешением (год, сезон).

4. Значимая корреляция элементного состава датированных слоев донного осадка с региональными инструментальными метеоданными позволяет строить трансферные функции и получать климатические палеорекострукции на интервале последних тысячелетий.

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

6. 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.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Подготовка твердых препаратов (Т.И. Маркович, В.С. Новиков), микро-РФА-СИ (Я.В. Ракшун, Ф.А. Дарьин, Д.С. Сороколетов) 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 Д.Ю. Рогозиным и А.В. Мейдусом за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 22-17-00185.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shi F. Multiproxy surface air temperature field reconstruction for the Arctic covering the past millennium // *Quaternary International*. 2012. № 279–280. P. 446.
2. Jones P.D., Briffa K.R., Osborn T.J., Lough J.M., Van Ommen T.D., Vinther B.M., Luterbacher J., Wahl E.R., Zwiers F.W., Mann M.E., Schmidt G.A., Ammann C.M., Buckley B.M., Cobb K.M., Esper J., Goosse H., Graham N., Jansen E., Kiefer T., Kull C., Küttel M., Mosley-Thompson E., Overpeck J.T., Riedwyl N., Schulz M., Tudhope A.W., Villalba R., Wanner H., Wolff E., Xoplaki E. High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: A review of current status and future prospects // *Holocene*. 2009. № 19. P. 3–49.
3. Melles M., Svendsen J.I., Fedorov G., Brigham-Grette J., Wagner B. Quaternary environmental and climat-

- ic history of the northern high latitudes – recent contributions and perspectives from lake sediment records // *Journal of Quaternary Science*. 2022. № 37. P. 721–728.
4. ACIA. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report. Cambridge University Press. 2004P. 140.
 5. *Hanhijärvi S., Tingley M.P., Korhola A.* Pairwise comparisons to reconstruct mean temperature in the Arctic Atlantic Region over the last 2,000 years // *Climate Dynamics*. 2013. № 41(7–8). P. 2039–2060.
 6. PAGES2k Consortium: Continental-scale temperature variability during the last two millennia // *Nature Geoscience*. 2013. № 6. P. 339–346.
 7. *Sundqvist H.S., Kaufman D.S., McKay N.P., Balascio N.L., Briner J.P., Cwynar L.C., Sejrup H.P., Seppä H., Subetto D.A., Andrews J.T., Axford Y., Bakke J., Birks H.J.B., Brooks S.J., de Vernal A., Jennings A.E., Ljungqvist F.C., Rühland K.M., Saenger C., Smol J.P., Viau A.E.* Arctic Holocene proxy climate database – New approaches to assessing geochronological accuracy and encoding climate variables // *Climate of the Past*. 2014. № 10. P. 1605–1631.
 8. *Zi-Chen L.I., Wen-Bin S.U.N., Liang C.X., Xu-Huang X.I.N.G., Qing-Xiang L.I.* Arctic warming trends and their uncertainties based on surface temperature reconstruction under different sea ice extent scenarios // *Advances in Climate Change Research*. 2023. № 14 (3). P. 335–346.
 9. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis // Cambridge University Press, Cambridge and New York.
 10. *Screen J.A., Simmonds I.* The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification // *Nature*. 2010. № 464 (7293). P. 1334–1337.
 11. *Serreze M.C., Barry R.G.* Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis // *Global Planet Change*. 2011. № 77 (1–2). P. 85–96.
 12. *Рогозин Д.Ю., Крылов П.С., Даутов А.Н., Дарьин А.В., Калугин И.А., Мейдус А.В., Дегерменджи А.Г.* Морфология озер Центрально-Тунгусского плато (Красноярский край, Эвенкия): новые сведения по проблеме Тунгусской катастрофы 1908 года // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. № 510 (1). С. 81–85.
 13. *Boës X., Fagel N.* Relationships between southern Chilean varved lake sediments, precipitation and ENSO for the last 600 years // *Journal of Paleolimnology*. 2008. № 39 (2). P. 237–252.
 14. *Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракишун Я.В.* Сканирующий рентгеноспектральный микроанализ образцов донных осадков с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2013. № 77 (2). С. 204.
 15. *Дарьин А.В., Ракишун Я.В.* Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2013. № 2 (51). С. 112–118.
 16. *Дарьин А.В., Рогозин Д.Ю., Мейдус А.В., Бабич В.В., Калугин И.А., Маркович Т.И., Ракишун Я.В., Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С., Гогин А.А., Сенин Р.А., Дегерменджи А.Г.* Следы тунгусского события 1908 г. в донных осадках озера заповедное по данным сканирующего РФА-СИ // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. № 492 (2). С. 61–65.
 17. *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) // Сибирский экологический журнал. 2015. № 22 (4). С. 497–506.
 18. *Дарьин А.В., Гольдберг Е.Л., Калугин И.А., Федорин М.А., Золотарев К.В., Максимова Н.В.* 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. 2003. № 12. С. 53–55.
 19. *Praetorius S., Rugenstein M., Persad G., Caldeira K.* Global and Arctic climate sensitivity enhanced by changes in North Pacific heat flux // *Nature Communications*. 2018. № 9 (1). P. 3124.

CLIMATIC CHANGES IN THE ARCTIC TERRITORIES OF EASTERN SIBERIA OVER THE LAST MILLENNIUM ACCORDING TO LITHOLOGICAL-GEOCHEMICAL DATA OF BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE PEYUNGDA (KRASNOYARSK REGION, EVENKIA)

A. V. Dar'in^a, D. Yu. Rogozin^{b, #}, V. S. Novikov^a, A. V. Meydus^c, V. V. Babich^a, T. I. Markovich, Ya. V. Rakshun^d, F. A. Dar'in^d, D. S. Sorokoletov^d, Academician of the RAS A. G. Degermendzhi^b

^a*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

^b*Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

^c*Astafiev Krasnoyarsk State Pedagogical University, Krasnoyarsk, Russian Federation*

^d*Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: rogozin@ibp.ru*

Using scanning micro-X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation, profiles of changes in the depth of the section in the elemental composition of the banded clays of Lake Peyungda (Krasnoyarsk Territory, Evenkia), located 30 km southwest of the epicenter of the Tunguska event (1908), were obtained. The age model is confirmed by the presence of a dated layer of anomalous thickness associated with the fall and explosion of the Tunguska cosmic body (TCB). Changes in element contents in dated core layers are compared with instrumental meteorological observation data over the last century, and a relationship is found between the average annual temperature of the region and the elemental composition of coeval layers of bottom sediments (transfer function). Approximation of the transfer function to the sampling depth of the sedimentary section made it possible to reconstruct the air temperature in the studied region over the past 1000 years. Comparison of the resulting reconstruction of average annual temperatures in the study area with global temperature reconstructions for the Arctic region for the same period shows the presence of general trends and extremes.

Keywords: paleoclimatic reconstructions, geochemistry, bottom sediments, Tunguska Cosmic body, Lake Peyunda, Krasnoyarsk region