

УДК 551.583.7
DOI: 10.18799/24131830/2025/12/4940
Шифр специальности ВАК: 1.6.5
Обзорная статья



Геохимическая индикация неоднородности плейстоцен-голоценовых донных отложений озера Тургойак (Южный Урал)

А.Р. Юсупова✉, Л.Р. Косарева, Н.Г. Нурғалиева

Казанский федеральный университет, Россия, г. Казань

✉i@ajusupova.ru

Аннотация. Озерные осадки характеризуются неоднородностью вещественного состава, связанного с условиями формирования, включая климатические. Как известно, Урал является климаторазделом, поэтому на данной территории особенно актуальны исследования условий озерного осадконакопления (включая климатические). Обзор литературных данных также показывает, что из многочисленных озер на территории Урала изучена лишь их малая часть. **Цель:** изучение элементного состава и геохимических показателей как индикаторов неоднородности состава и генетических особенностей донных отложений озера Тургойак. **Объект:** результаты геохимических исследований керн донных отложений озера Тургойак длиной 572 см, возраст которых составляет не менее 25 тыс. к.л.н. **Методы:** рентгенофлуоресцентный анализ проб донных отложений с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Bruker S8 Tiger. По результатам рентгенофлуоресцентного анализа производился расчет геохимических показателей по соотношению химических элементов с высококонтрастной геохимической специализацией (CIA, ICV, WIP, PIA, CIW и др.) Для выявления ведущих геохимических факторов был применен факторный анализ данных химического состава осадков методом главных компонент. **Результаты.** Выявлены наиболее информативные индикаторы геохимической зональности разреза озерных осадков (CIA; группы элементов (Al, Rb, Mg, Na), (Si, K, Fe, Ti), (Cu, Ni, Zn, Ba), (Br); Mn; LOI₉₅₀), отражающие изменение соотношения мобильных и иммобильных элементов, изменение привноса в озеро аллотигенного материала, биопродуктивности и минерализации водоема. **Выводы.** Установлена геохимическая неоднородность плейстоцен-голоценовых осадков озера Тургойак, отражающая эпохальную смену климата на рубеже плейстоцена и голоцена и основные этапы развития озера в голоцене.

Ключевые слова: озерные осадки, голоцен, неоплейстоцен, рентгенофлуоресцентный анализ, элементный состав, неоднородность, климат

Благодарности: Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023–0023 в сфере научной деятельности.

Для цитирования: Юсупова А.Р., Косарева Л.Р., Нурғалиева Н.Г. Геохимическая индикация неоднородности плейстоцен-голоценовых донных отложений озера Тургойак (Южный Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 12. – С. 190–203. DOI: 10.18799/24131830/2025/12/4940

UDC 551.583.7
DOI: 10.18799/24131830/2025/12/4940
Review paper



Geochemical indicators of heterogeneity in Pleistocene-Holocene sediments of lake Turgoyak (Southern Urals)

A.R. Yusupova✉, L.R. Kosareva, N.G. Nurgalieva

Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

✉i@ajusupova.ru

Abstract. Lake sediments exhibit compositional heterogeneity related to their formation conditions, including climatic factors. The Urals serve as a climate divide, therefore making research into lake sedimentation conditions (including climatic

aspects) particularly relevant in this region. A review of literature indicates that only a small fraction of the numerous lakes in the Urals has been studied. **Aim.** To analyze elemental composition and geochemical indicators as markers of compositional heterogeneity and genetic characteristics of Lake Turgoyak sediments. **Object.** Results of geochemical analysis conducted on a 572 cm sediment core from Lake Turgoyak, dating back at least 25000 years BP. **Materials and methods.** X-ray fluorescence analysis of sediment samples was performed using the Bruker S8 Tiger X-ray fluorescence spectrometer. X-ray fluorescence analysis results were used to calculate geochemical indices based on ratios of elements with high geochemical contrast (CIA, ICV, WIP, PIA, CIW, etc.). Principal component analysis was applied to the chemical composition data to identify key geochemical factors. **Results.** The study identified the most diagnostic indicators of geochemical stratification in the lake sediment (CIA; (Al, Rb, Mg, Na), (Si, K, Fe, Ti), (Cu, Ni, Zn, Ba), (Br); Mn; LOI₉₅₀), which reflect changes in mobile/immobile element ratios, variations in allogenic input, bioproductivity, and lake water mineralization. **Conclusion.** Geochemical heterogeneity was observed in the Pleistocene-Holocene sediments of Lake Turgoyak, reflecting the epochal climate transition at the Pleistocene-Holocene boundary and the main stages of lake development during the Holocene.

Keywords: lake sediments, Holocene, Late Pleistocene, X-ray fluorescence analysis, elemental composition, heterogeneity, climate

Acknowledgements: This work was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment project no. FZSM-2023-0023 in the sphere of scientific activities.

For citation: Yusupova A.R., Kosareva L.R., Nurgalieva N.G. Geochemical indicators of heterogeneity in Pleistocene-Holocene sediments of lake Turgoyak (Southern Urals). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 12, pp. 190–203. DOI: 10.18799/24131830/2025/12/4940

Введение

Ценными архивами, хранящими информацию об изменениях окружающей среды в позднечетвертичное время, выступают донные отложения современных озер. Озерные отложения образуются в результате различных процессов (физических, химических, биологических, климатических, гидрологических), происходящих на водосборной площади и непосредственно в озере. Эти процессы определяют образование, поступление и аккумуляцию осадочного материала в озере, а также формирование аутигенного органического вещества, перемешивание и осаждение смеси аллотигенного и аутигенного вещества на дне озера, захоронение осадков под новыми осадочными слоями и их непрерывное диагенетическое преобразование. Все эти процессы отражаются в особенностях вещественного состава озерных осадков.

В комплексе исследований озерных осадков анализ геохимических индикаторов донных отложений играет важную роль при реконструкции геохимической зональности неоплейстоцена и голоцена. При этом в качестве ведущих геохимических индикаторов неоднородности исследуемого разреза осадков используются показатель химической изменчивости CIA (Chemical Index of Alteration) [1], индекс изменчивости ICV (Index of Compositional Variability) [2], индекс выветривания Паркера WIP (Weathering Index of Parker) [3], индекс изменения плагиоклазов PIA (Plagioclase Index of Alteration) [4], индекс химического выветривания CIW (Chemical Index of Weathering) [4], отражающие интенсивность химического выветривания и палеоклиматические условия осадконакопления, в том числе и озерного осадконакопления [6–8].

Озера Южного Урала, выступающего в качестве климатораздела [9], рассматриваются как уникальные объекты исследований для палеогеографических реконструкций. Озеро Тургойак является уникальным природным объектом, одним из крупных резервуаров питьевой воды в регионе и хорошо изученным в различных аспектах: гидрографии, экологии, геологии [10–17 и др.].

Сейсмоакустическое профилирование акватории позволило выявить сложное строение озерного дна и различную степень распределения мощностей стратифицированной осадочной толщи [18].

В работе [19] представлены результаты литологических и геохимических исследований, а также диатомового анализа керн донных отложений длиной 265 см, охватывающего 12 тыс. лет. Авторами выделено шесть литологических единиц U1–U6, представленных глиной (U6) и сапропелем черным торфянистым (U5) в неплейстоцене, и сапропелем контрастно-слоистым карбонатным с раковинами (U4), неясно-слоистым (U3), серым (U2) и буровато-оливковым (U1) в голоцене. Установлено, что литологические особенности озерных отложений отражаются в изменениях концентраций трех групп химических элементов. Первая ассоциация (Al₂O₃, TiO₂, K₂O, Na₂O, SiO₂, Fe₂O₃ и S) связана с терригенным сносом, вторая (CaO, MgO, MnO и сера сульфатов) – с карбонатонакоплением, третья характеризует изменение содержания P₂O₅. Предложенный показатель содержания органического вещества (ОВ) и модуль минерализации озерной воды (ММ) послужили основой для палеоклиматических реконструкций.

На основе анализа полученных результатов реконструировано четыре основных этапа развития

озера: 1) начало озерного осадконакопления (>12,1 тыс. к.л.н.); 2) этап мелководного озера с повышенной минерализацией (12,1–11,2 тыс. к.л.н.); 3) этап возрастания глубины и снижения минерализации (11,2–8,0 тыс. к.л.н.); 4) этап устойчивого увеличения содержания органического вещества в воде (<8,0 тыс. к.л.н.). На основе оценки значений модуля минерализации и концентраций диатомей-мезогалобов в колонке донных отложений сделан вывод о резком возрастании минерализации воды озера в результате потепления климата в раннем голоцене (11,8–11,2 тыс. к.л.н.). С помощью анализа показателя содержания ОВ и индекса сапробности Пантле–Букка установлено начало возрастания содержания ОВ в воде в ответ на потепление климата, начавшееся около 9–8 тыс. к.л.н.

В работе [18] описаны петромагнитные исследования керна длиной 572 см, охватывающего более 25 тыс. лет. Петромагнитные данные отражают изменения климатических условий и структуры агентов переноса обломочного материала, соотношения аутигенного и аллотигенного вещества в осадочной озерной системе и указывают на их важную роль при маркировании плейстоцен-голоценового рубежа.

Целью настоящей работы является рассмотрение элементного состава и геохимических индикаторов неоднородности озерных осадков в поздне-четвертичное время по отложениям озера Тургояк,

являющимся объектом пристальных экологических и геологических исследований.

Полученные данные позволяют развить и дополнить общие и региональные представления о строении и условиях формирования озерных осадков.

Характеристика объекта исследования

Объектом исследования послужила керновая колонка № 5 (53° 35'22,36" с.ш.; 58° 37'28,22" в.д.) длиной 572 см, отобранная из донных отложений озера Тургояк (рис. 1) в 2017 г. при глубине воды 31 м [18].

Озеро Тургояк расположено на восточном склоне Южного Урала в узкой межгорной впадине, зажатой между хребтами Урал-Тау и Ильменский. Озерная котловина тектонического происхождения приурочена к Тургоякскому гранитоидному массиву, представляющему собой шток округлой формы, который обнажается по берегам озера. Значительная его часть скрыта озерными водами. Тургоякский массив относится к тургоякско-сыростанскому комплексу ($\gamma\delta C_{1-2ts}$) монцодиорит-гранитной формации [Ошибка! Источник ссылки не найден.–22]. Основные морфометрические параметры: высота над уровнем моря 320 м, площадь водной поверхности 26,4 км², средняя глубина 19,2 м, максимальная глубина – 32,5 м [10, 14].

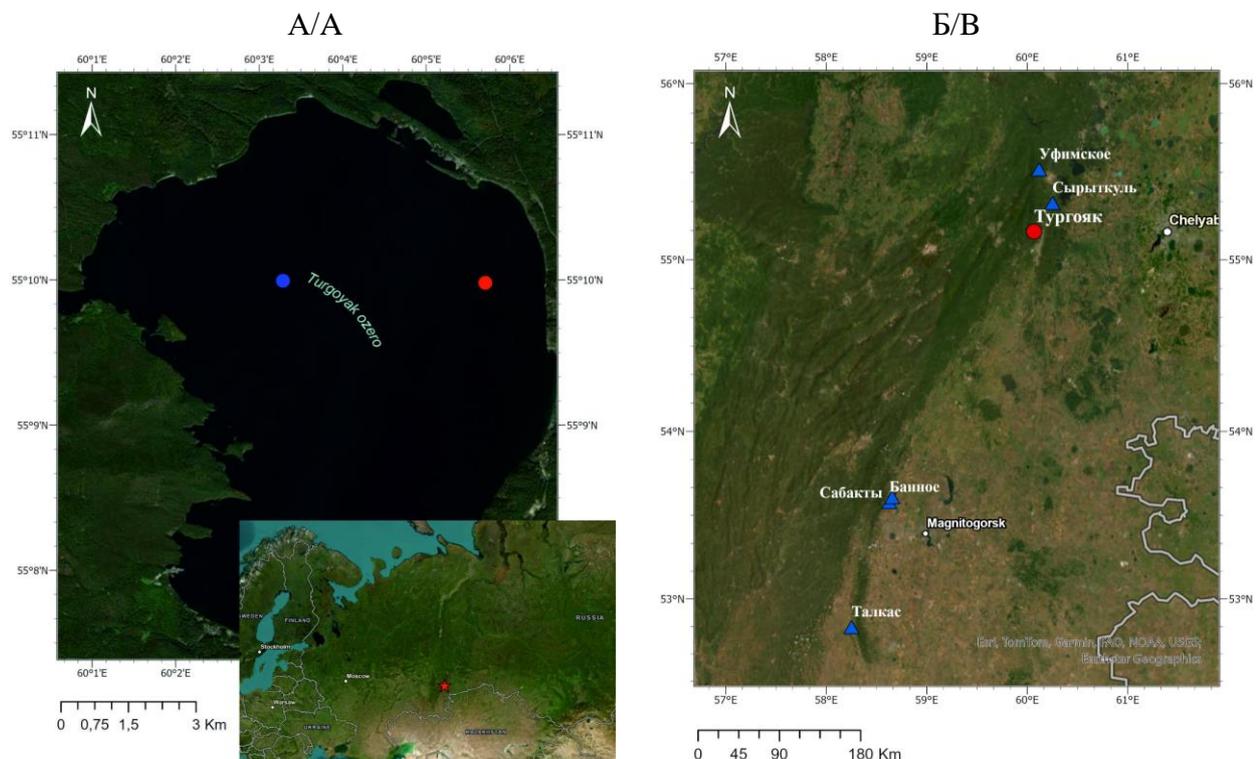


Рис. 1. А) карта озера Тургояк. Расположение места отбора керновой колонки указано красной точкой [18], синей точкой – примерное место отбора керновой колонки по [19]; Б) расположение озер Южного Урала

Fig. 1. A) map of Lake Turgoyak. The location of the core sampling site is marked with the red dot [18], the blue dot indicates the approximate location of core sampling according to [19]; B) Location of Southern Urals' Lakes

Гидрографическая сеть озера развита слабо и представлена небольшими речками и ручьями, стекающими с окрестных хребтов. Озеро является проточным, из юго-восточной части вытекает река Исток, соединяющая озеро с рекой Миасс. Основную роль в питании озера играют грунтовые воды, так как поверхностный сток в озеро невелик в связи с малым размером водосбора – 52,5 км² [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Озеро относится к олиготрофным. Вода пресная, гидрокарбонатного класса сульфатно-натриевого (II) типа группы кальция (по О.А. Алекину). Минерализация воды составляет 127 мг/л, прозрачность варьирует от 8 до 10,2 м [14, 17].

Согласно данным радиоуглеродного датирования возраст изучаемых отложений составляет не менее 25 тыс. лет [18].

Материал и методы исследования

Для геохимических исследований была создана коллекция образцов с шагом 10 см состоящая из 56 проб. Литологически нижняя часть разреза (572–330 см) представлена переслаиванием илов серых и зеленовато-серых глинистых и песчанистых консолидированных. Верхняя часть разреза (330–2 см) представлена илом зеленовато-коричневым, слабо консолидированным со значительным содержанием ОВ.

Определение элементного состава озерных отложений проводилось с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Bruker S8 Tiger. Пробоподготовка включала измельчение пробы до частиц с размерами 40–50 мкм и прессование (усилие 20 т) с борной кислотой для получения таблетки с ровной поверхностью. Калибровка прибора проводилась с использованием стандартных образцов, матрицей для которых служит SiO₂. Это позволяет учитывать влияние матричных эффектов при анализе всех остальных элементов. Керновая колонка охарактеризованы содержанием 28 химических элементов, начиная с атомного номера 11 (Na), вплоть до Nb, Ba и La.

В качестве прокси содержания органического вещества использовался параметр LOI₉₅₀ (например, [22]). Навески проб (0,5–1 г) помещались в керамические тигли и заливались 10 % раствором соляной кислоты на 1 сутки. В течение этого времени ход реакции прекращался. Далее тигли прокаливались в муфельной печи SNOL1100 до температуры 950 °С в течение 4-х часов. После остывания осадок взвешивался, определялись потери при прокаливании.

Образцы классифицировались в треугольной диаграмме Si-Al+K-Ca [1], учитывающей соотно-

шение резидюатов, гидролизатов и карбонатов в тонкозернистых осадках [4, 25–29].

Для оценки интенсивности химических изменений состава озерных осадков были рассчитаны показатели химической изменчивости CIA [1, 30]; индекс изменения плагиоклазов PIA [Ошибка! Источник ссылки не найден.]; индекс химического выветривания CIW [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Для проверки влияния на указанные показатели таких факторов, как питающая провинция, размер зерен, осадочный рециклинг, сортировка осадочного материала, проверялись связи CIA с показателями Zr/Ti (индикация влияния питающей провинции) [28, 31], Al/Si (индикация влияния размера зерен) [25], индексы ICV [2] и WIP [3] (индикация влияния рециклинга и сортировки). Для индикации и учета К-метасоматоза использовалось соотношение A–CN–K [26, 27, 32, 33].

Для выявления ведущих геохимических факторов неоднородности строения и формирования озерных осадков применялся факторный анализ методом главных компонент способом «Варимакс нормализованный» в пакете программ STATISTICA. Факторный анализ проведен для разрешенных переменных, имеющих статистически достоверный объем выборки и подчиняющийся нормальному и логнормальному распределению со значимыми нагрузками не менее 0,7.

Хронологическая привязка геохимических данных осуществлялась на основе данных AMS¹⁴C датирования. Исследования по 8 образцам были проведены на факультете наук о Земле Национального университета Тайваня (NTUAMS Lab) с использованием ускорительного масс-спектрометра 1,0 MV Tandetron (HVE, Нидерланды). Данные опубликованы в работе [18].

Результаты и их обсуждение

Согласно геохимической классификации [1], образцы оз. Тургойак принадлежат к различным классам (рис. 2).

Приоритетными для оценки интенсивности химического выветривания и климатических изменений по изучаемым отложениям выступают образцы, принадлежащие к классу I (гидролизат-резидюатная композиция) [4, 25–29], данные по которому используются для обработки статистическими методами и интерпретации.

В табл. 1 представлены элементарные статистические выборки содержаний оксидов главных элементов осадков озера Тургойак.

Главные элементы представлены в основном литофильными элементами, за исключением сидерофильного железа и халькофильной серы. Содержание LOI_{950} изменяется в широком диапазоне от 12,12 до 39,91 мас. % и характеризуется средним значением 25,06 мас. %. При сопоставлении наших данных и данных по [19] (через дробь) среднее содержание оксидов наиболее распространенных элементов составляет: SiO_2 (46,65/40,80 мас. %), Al_2O_3 (9,31/10,46 мас. %), Fe_2O_3 (5,93/5,99 мас. %), CaO (2,93/3,21 мас. %). Среднее содержание оксидов менее распространенных элементов составляет: SO_3 (0,85/0,46 мас. %), MgO (1,97/2,06 мас. %), K_2O (1,55/1,59 мас. %), P_2O_5 (0,30/0,24 мас. %), Na_2O (0,55/0,88 мас. %), TiO_2 (0,52/0,55 мас. %), MnO (0,11/0,10 мас. %).

В группе рассеянных элементов наиболее распространены BaO , SrO , ZnO , Cr_2O_3 , NiO , $ZrO_2 \cdot CuO$, Rb_2O (средние содержания 0,066; 0,025; 0,015; 0,014; 0,012; 0,011; 0,010; 0,007 мас. % соответственно). Менее распространены V_2O_5 , Cl , Br , Ga_2O_3 , As_2O_3 , Nb_2O_5 , La_2O_3 , (средние содержания 0,0251; 0,0241; 0,0108; 0,0018; 0,0017; 0,0014; 0,0195 мас. % соответственно), а также в восьми образцах зафиксирован Y_2O_3 (среднее содержание 0,0026 мас. %), в пяти образцах – CoO (среднее содержание 0,0006 мас. %).

Содержание в осадках основных и примесных элементов было сопоставлено с данными по другим озерам Южного и Среднего Урала (рис. 1, 3, 4) [9, 19, 34, 34]. По рис. 3, 4 видно, что голоценовые осадки озера Тургойак в среднем соответствуют элементному составу донных отложений озер Уральского региона.

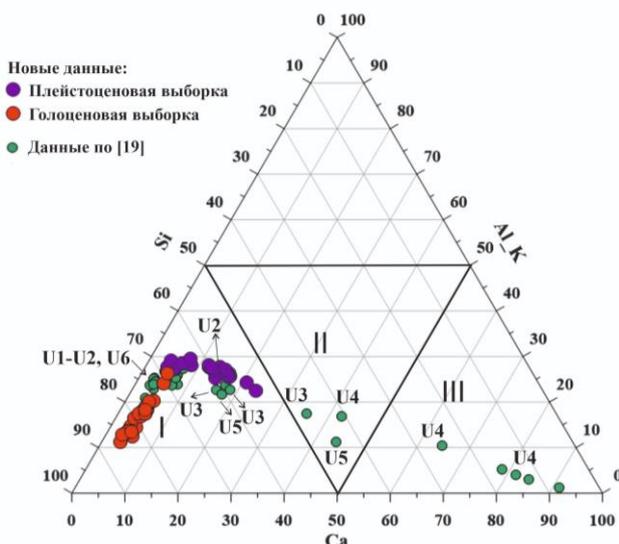


Рис. 2. Положение изучаемых образцов озера Тургойак в геохимической классификации по [1]. Области геохимических классов обозначены цифрами

I–III: I – кремниевые глинисто-алевритовые образования, II – глинисто-алевритовые образования с повышенным содержанием кальция, III – карбонатные образования. U1–U6 – литологические единицы по [19]

Fig. 2. Position of the studied samples from Lake Turgoyak in the geochemical classification according to [1]. The geochemical class areas are labeled with numbers I–III: I – siliceous clay-silt formations, II – clay-silt formations with elevated calcium content, III – carbonate formations. U1–U6 represent lithological units according to [19]

Таблица 1. Элементарные статистики содержаний оксидов главных элементов ($\geq 0,1$ мас. %) и геохимических показателей осадков озера Тургойак. Через дробь представлены данные по [19]

Table 1. Elementary statistics for the content of major element oxides ($\geq 0,1$ wt %) and geochemical indicators in Lake Turgoyak sediments. Data from [19] is presented below the fraction bar

Компоненты, % Components, %	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Среднее Average	Стандартное отклонение Standard deviation	Число образцов (шт) Number of samples (pcs)
Компоненты, мас. % / Components, wt %					
SiO_2	32,03 28,79	52,10 63,11	46,65 42,59	3,55 8,42	56 20
TiO_2	0,30 0,25	0,83 0,77	0,52 0,55	0,19 0,12	56 20
Al_2O_3	4,71 6,96	16,29 14,86	9,31 10,77	3,94 2,07	56 20
Fe_2O_3	3,77 2,89	8,46 8,89	5,93 5,72	1,37 1,28	56 20
MnO	0,07 0,02	0,28 0,23	0,11 0,1	0,04 0,07	56 20
MgO	0,86 0,98	3,87 2,73	1,97 1,98	1,01 0,46	56 20
CaO	1,20 1,01	11,19 8,55	2,93 2,97	2,99 2,30	56 20
Na_2O	0,24 0,55	1,12 2,60	0,55 1,09	0,26 0,57	56 20
K_2O	0,78 1,15	2,80 2,56	1,55 1,68	0,77 0,37	56 20
P_2O_5	0,14 0,12	0,92 0,43	0,30 0,24	0,23 0,06	56 20
Геохимические отношения / Ratios of geochemical parameters					
CIA	68,54 50,90	76,01 74,49	72,03 66,95	1,74 5,95	56 20
CIA _{corr}	79,07 56,75	88,12 83,48	82,73 75,38	1,81 6,92	56 20
CIW	79,16 56,81	88,22 83,57	82,83 75,47	1,18 6,92	56 20
PIA	75,34 51,13	85,97 81,29	79,80 71,94	2,11 7,74	56 20
ICV	1,15 1,02	1,66 1,49	1,33 1,23	0,093 0,13	56 20
Zr/Ti	0,013	0,053	0,024	0,007	56
Al/Si	0,103 0,22	0,365 0,34	0,246 0,28	0,095 0,03	56 20

В табл. 1 также представлены значения CIA и других геохимических показателей неоднородности и генезиса осадков.

Использование CIA в реконструктивных целях возможно при проверке влияния на CIA таких факторов, как питающая провинция, размер зерен, осадочный рециклинг, сортировка осадочного матери-

ала. Проверялись корреляционные связи CIA с показателями Zr/Ti (индикация влияния питающей провинции) [28, 31], Al/Si (индикация влияния размера зерен) [25], индексы ICV [2] и WIP [3] (индикация влияния рециклинга и сортировки). Для индикации и учета К-метасоматоза использовалось соотношение A-CN-K [26, 27, 32, 33].

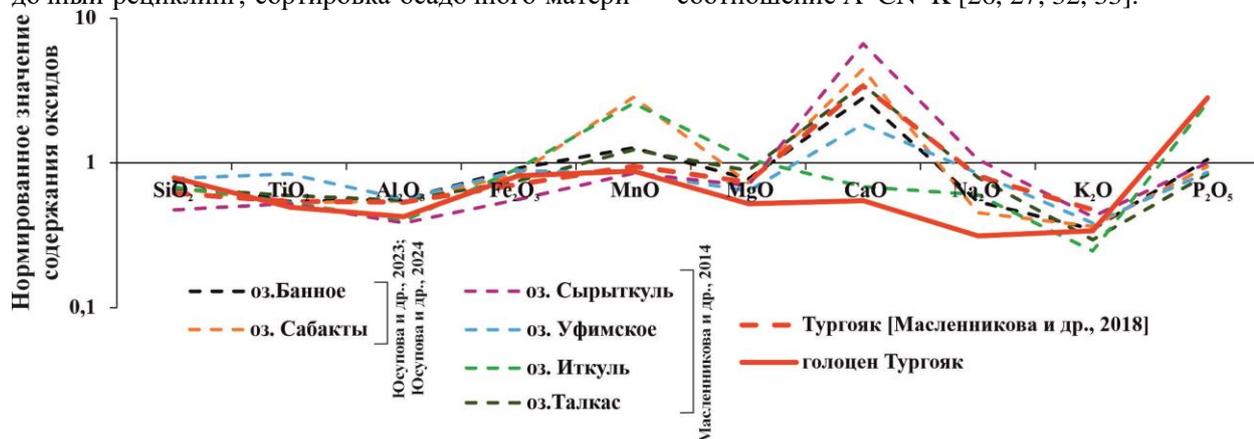


Рис. 3. Сравнительный график содержания основных оксидов осадков озера Тургояк с литературными данными по озерам Южного и Среднего Урала, а также Предуралья [9, 19, 34, 34]

Fig. 3. Comparative graph of major oxides content in Turgoyak Lake sediments compared to published data on lakes of South and Middle Urals, as well as in the Cis-Urals [9, 19, 34, 34]

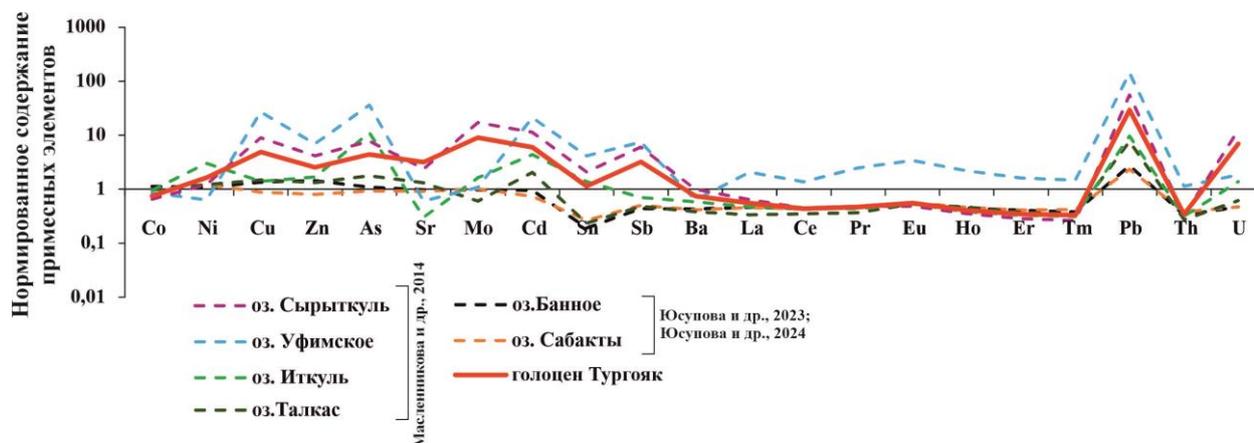


Рис. 4. Сравнительный график содержания примесных элементов озера Тургояк с литературными данными по озерам Южного и Среднего Урала, а также Предуралья [9, 19, 34, 34]

Fig. 4. Comparative graph of trace elements content in Turgoyak Lake sediments compared to published data on lakes of South and Middle Urals, as well as in the Cis-Urals [9, 19, 34, 34]

Индикатор влияния питающей провинции Zr/Ti характеризуется довольно стабильными значениями (среднее значение равно 0,024 при стандартном отклонении 0,007), за исключением образца с глубины 213 см, и не коррелирует с показателем CIA, что ограничивает влияние фактора питающей провинции на CIA (табл. 2) [28, 31].

Влияние размера зерен на показатель CIA можно оценить через связь с отношением Al/Si. Из табл. 2 видно, что эта связь слабо отрицательная, что, в свою очередь, указывает на ограниченное

влияние размера зерен на значения CIA [25]. По данным [19] также отмечается отсутствие корреляции между показателем Al/Si и CIA.

Некоторые образцы отличаются повышенными содержаниями CaO из-за присутствия карбонатной фракции, однако слабая отрицательная связь между содержаниями CaO и значениями CIA (табл. 2) свидетельствует об ограниченном влиянии карбонатной фракции на CIA. Ограниченное влияние CaO на CIA устанавливается и по данным [19] (табл. 2).

Значения $ICV > 1$ (от 1,15 до 1,66 со средним 1,33 и стандартным отклонением 0,093 (табл. 1)) указывают на то, что изучаемые отложения являются продуктом первичного сноса (первичного цикла осадконакопления от эрозии до седиментации), то есть влияние рециклинга и сортировки осадочного материала на значения CIA ничтожно. Это дополнительно подтверждается обратной линейной связью между CIA и WIP (табл. 2) [33]. По данным [19] значения ICV изменяются от 1,02 до 1,49 (среднее 1,23, стандартное отклонение 0,13, табл. 1), а CIA и WIP имеют обратную линейную связь (табл. 2), что исключает влияние рециклинга и сортировки осадочного материала на значения CIA.

Таблица 2. Характеристики регрессионных зависимостей CIA от различных показателей для образцов класса I (рис. 2) для проверки пригодности данного показателя для интерпретации выветривания и климата. Величины R^2 являются значимыми при их абсолютном значении не менее 0,31

Table 2. Characteristics of regression dependencies of CIA on various indicators for class I samples (Fig. 2) to test the suitability of this indicator for interpreting weathering and climate. R^2 values are considered significant when their absolute value is at least 0,31

Показатели Indicators	Новые данные New data		Данные по [19] Data according to [19]	
	Уравнение (56 точек) Equation (56 points)	R^2	Уравнение (20 точек) Equation (20 points)	R^2
Zr/Ti	$-0,0015x+0,13$	0,15	-	-
Al/Si	$-0,02x+1,93$	0,19	$0,001x+0,204$	0,07
CaO	$0,80x+61,42$	0,22	$-1,114x+83,2$	0,34
WIP	$-3,68x+292,8$	0,27	$-0,88x+91,33$	0,34
PIA	$1,11x+0,12$	0,83	$1,30x-15,02$	0,99
CIW	$0,86x+20,98$	0,68	$1,16x-2,07$	0,99
K_2O	$-0,22x+17,44$	0,24	$-0,017x+2,76$	0,06
A-CN-K	$1,55x-4,04$	0,83	$2,03x-21,92$	0,98

Установлены тесные прямые связи между CIA и показателями PIA и CIW (табл. 2), что свидетельствует об информативности показателя CIA для установления интенсивности химического выветривания [4, 3]. Тесная прямая связь между CIA и показателями PIA и CIW также устанавливается и по данным [19] (табл. 2).

По соотношению A-CN-K (табл. 2) и связи между CIA и K_2O (табл. 2) согласно [30, 32, 36] необходимо учитывать эффект К-метасоматоза [33]. Средняя разница значений CIA_{corr} и CIA составляет 10,7 по нашим данным и 8,5 по данным [19] (табл. 1).

Таким образом, на основе табл. 2 устанавливается пригодность CIA_{corr} для оценки интенсивности

химических изменений озерных осадков в реконструктивных целях.

Значения CIA_{corr} (табл. 1, рис. 5) находятся в интервале, свидетельствующем о теплом и влажном климате [32] на протяжении всей исследуемой стратиграфической записи. Вероятно, разрешающая способность данного индикатора как показателя климатических флуктуаций для рассматриваемого временного интервала длительностью ~25 тыс. лет требует дополнительных исследований. Так или иначе, показатель CIA_{corr} выступает как показатель собственно химической изменчивости состава осадка в связи с контрастным участием иммобильного Al и мобильных Na, K, Ca в водообменных процессах. Наибольшие значения CIA_{corr} (от 82,22 до 88,12) характерны для субатлантической стадии, в течение которой водообменные процессы протекали, вероятно, наиболее активно, в том числе из-за более выраженного увлажнения климата.

В табл. 3 представлены результаты факторного анализа разрешенных геохимических переменных, со значимыми нагрузками более 0,7 (выделены красным в табл. 3).

Самым значимым является фактор F1 (доля 0,34), далее с меньшими долями располагаются факторы F2 (0,27), F3 (0,08), F4 (0,08), F5 (0,07) и F6 (0,06).

Фактор F1 коррелирует с увеличением содержания MgO , Na_2O , Al_2O_3 , SO_3 , Rb_2O .

Фактор F2 отражает увеличение содержания CuO , NiO , ZnO , BaO .

Фактор F3 коррелирует с увеличением содержания Br, а фактор F4 отражает увеличение содержания Cl.

Фактор F5 коррелирует с увеличением содержания MnO , а фактор F6 отражает уменьшение содержания потерь при прокаливании LOI_{950} .

Таблица 3. Результаты факторного анализа геохимической выборки осадков озера Тургойак голоценового возраста, со значимыми нагрузками более 0,7 (выделены красным)

Table 3. Factor analysis results for the geochemical dataset derived from samples of Holocene-age sediments from Lake Turgoyak, with significant loadings more than 0.7 (highlighted in red)

Параметр Parameter	Фактор, нагрузки (Варимакс нормализ.) Выделение: Главные компоненты (Отмечены нагрузки >0,7) Factor Analysis Results (Varimax normalized) Extractions: Principal Components (Marked loadings are >0.7)					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
LOI_{950}	-0,49	-0,10	0,33	0,15	0,12	-0,77
MgO	0,96	0,21	0,05	0,05	-0,06	0,11

SiO ₂	-0,56	-0,44	-0,39	-0,19	-0,21	0,45
Cl	0,10	0,08	0,09	0,98	0,02	-0,09
CaO	0,45	0,58	0,26	-0,01	0,10	0,04
NiO	0,38	0,84	0,08	-0,08	0,06	0,02
CuO	0,05	0,96	0,08	0,13	0,10	-0,09
Br	0,13	0,15	0,96	0,09	-0,07	-0,17
ZnO	0,43	0,76	0,11	0,31	0,04	0,13
Na ₂ O	0,95	0,06	0,02	-0,02	-0,11	0,06
Al ₂ O ₃	0,89	0,37	0,10	0,12	-0,08	0,04
SO ₃	0,81	0,03	0,21	0,03	-0,19	0,15
TiO ₂	0,70	0,63	0,00	0,06	0,01	0,11
MnO	-0,19	0,14	-0,05	0,02	0,97	-0,08
Rb ₂ O	0,76	0,53	0,07	0,21	-0,09	0,13
BaO	0,12	0,81	0,09	-0,12	0,09	0,03
Общая дисперсия Total variance	5,51	4,30	1,35	1,23	1,10	0,94
Доля общей дисперсии Part of total variance	0,34	0,27	0,08	0,08	0,07	0,06

Таким образом, по данным факторного анализа (табл. 3) ведущим выступает фактор F1, коррелирующий с увеличением содержаний элементов терригенного сноса. Аналогичные результаты были получены по озерам Банное и Сабакты [34, 35]. Следует заметить, что в последнее время для палеоклиматических реконструкций все чаще используются петромагнитные характеристики донных отложений современных озер [34, 35, 37–401]. И в качестве индикатора изменения привноса терригенного материала в бассейн осадконакопления выступает диа/парамагнитная компонента магнитной восприимчивости χ_p , отражающая изменения в составе осадка парамагнитных минералов, например хлорита, слюды, железосодержащих силикатов, пирита, а также диамагнитных, таких как кварц, кальцит, галит, указывая на изменение солености. Анализ предварительных магнитно-минералогических данных по образцам исследуемого керна представлен в работе [18].

Установленная высокая корреляционная связь между χ_p и F1 (табл. 4) указывает на χ_p как показатель увеличения/уменьшения привноса аллотигенного вещества в бассейн седиментации.

Таблица 4. Корреляционная матрица магнитных параметров с факторными нагрузками

Table 4. Correlation matrix of magnetic parameters with factor loadings

Параметр Parameter	Корреляции Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,05$ N=32 (Построчное удаление ПД) Correlations Correlation notes are significant at the $p < 0,05$ level of significance N=32 (Delete lines by line)					
	χ_p	F1	F2	F4	F6	
	χ_p	1,00				
F1	0,77	1,00				
F2	0,45	0,00	1,00			
F4	0,14	0,00	0,00	1,00		
F6	-0,01	0,00	0,00	0,00	1,00	

Фактор F2 отражает увеличение содержаний CuO, NiO, ZnO, BaO. Вероятно, привнос данной группы элементов связан с размывом гранитоидов Тургойского массива, обрамляющего значительную часть озера Тургойак. По данным [42] в гранитоидах содержание Ni, Cr, V, Cu, Zn, Pb, Mo, Ba, Sr, Sn выше кларков.

Фактор F3 коррелирует с увеличением содержания Br, который, как известно, является индикатором потепления климата. Установлено, что для голоцена значения изменяются в интервале 0,0088–0,0146 %, а в плейстоцене – 0,0023–0,0119 % [43–45].

Фактор F4 отражает увеличение содержания Cl, источником которого может быть разрушение горных пород, содержащих небольшие включения хлоридных солей в порах и трещинах [46]. Хлоридная аномалия, приуроченная к площади развития гранитоидов, связана с хлорированием воды в колодцах вблизи заболоченных участков [20].

Фактор F5 коррелирует с увеличением содержания MnO. Присутствие Mn в осадочных отложениях озер отражает биохомогенное накопление карбонатного вещества [42, 46].

Фактор F6 характеризует содержание LOI₉₅₀, что указывает на уменьшение количества органического вещества в осадках.

Факторный анализ проведен нами и по данным [19]. Он позволил установить три фактора со значимыми нагрузками больше 0,7 (табл. 5). Первый фактор коррелирует с уменьшением содержания элементов терригенного сноса, второй – с уменьшением содержания серы, а третий – с уменьшением натрия.

Таблица 5. Результаты факторного анализа геохимической выборки осадков озера Тургойак голоценового возраста по [19] для образцов I класса. Значимые нагрузки выделены красным

Table 5. Factor analysis results for the geochemical dataset derived from class I samples of Holocene age sediments from Lake Turgoyak, according to [19]. Significant loads are highlighted in red

Параметр Parameter	Фактор, нагрузки (Варимакс нормализ.) Выделение: Главные компоненты (Отмечены нагрузки >0,7) Factor Analysis Results (Varimax normalized) Extractions: Principal Components (Marked loadings are >0.7)		
	F1	F2	F3
SiO ₂	0,77	-0,14	0,18
Al ₂ O ₃	0,96	0,02	0,03
Na ₂ O	0,00	0,25	-0,97
K ₂ O	0,90	0,32	-0,19
Fe ₂ O ₃	0,92	-0,20	-0,04
TiO ₂	0,98	0,04	0,03
SO ₃	0,07	0,96	-0,26
MgO	0,97	0,18	0,04
Общая дис-	5,08	1,18	1,08

персия Total variance			
Доля общей дисперсии Part of total variance	0,64	0,15	0,13

Климатические стадии позднего плейстоцена характеризуются превалярованием в осадке минеральной компоненты и низкой биопродуктивностью озерной осадочной системы. Это обусловлено холодными климатическими условиями и подтверждается низкими содержаниями Вг и LOI_{950} (рис. 5).

По данным [Масленникова и др., 2018]

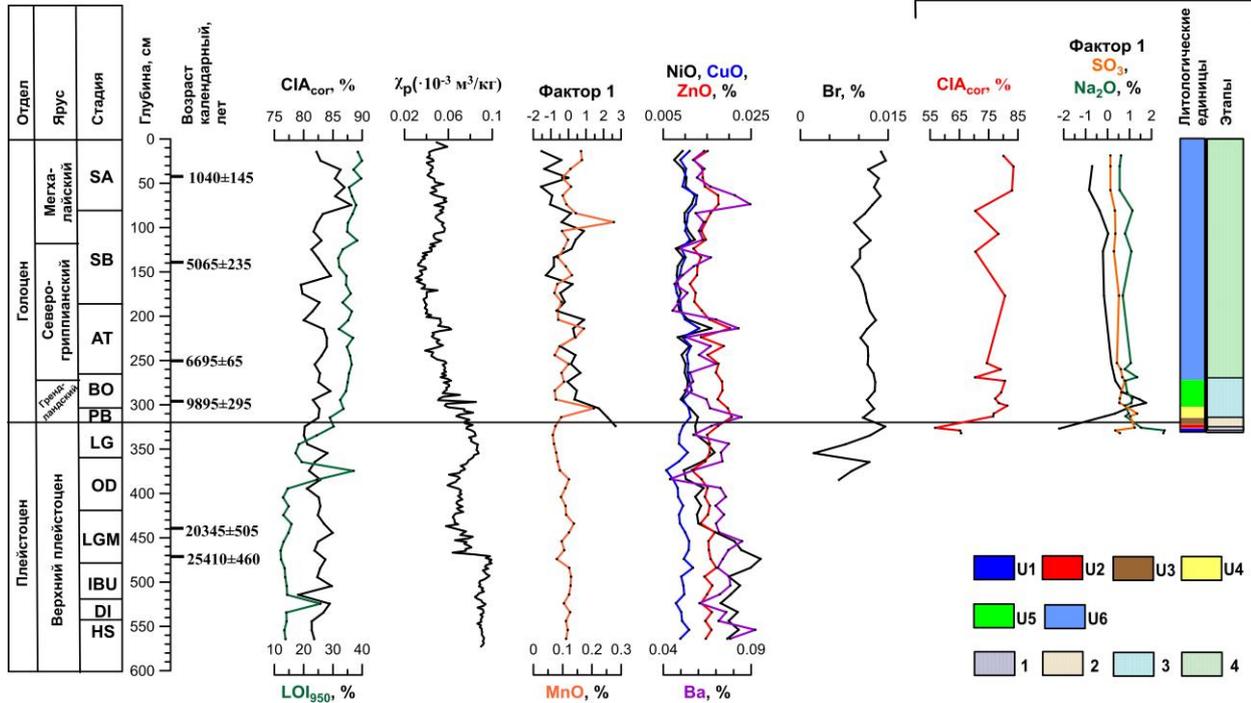


Рис. 5. Вариации основных геохимических показателей и χ_p . Климатические стадии по [48–51]: HS – стадия ханеборг, DI – интерстадиал денекамп, IBU – рост ледника, LGM – максимум последнего оледенения, OD – ранний дриас, LG – позднеледниковье, включающее в себя аллередское и беллингское потепления, средний и поздний дриас, PB – пребореальная, BO – бореальная, AT – атлантическая, SB – суббореальная, SA – субатлантическая стадии. U1–U6 – литологические единицы; 1–4 – этапы развития озера по [19]

Fig. 5. Variations in main geochemical indicators and χ_p . Climatic stages according to [48–51]: HS – Huneborg Stadial, DI – Denekamp Interstadial, IBU – Ice Build-Up, LGM – Last Glacial Maximum, OD – Old Dryas, LG – Late glacial, including Allerød and Bølling warmings, Yang and Middle Dryas, PB – Preboreal stage, BO – Boreal stage, AT – Atlantic stage, SB – Subboreal stage, SA – Subatlantic stage. U1–U6 – lithological units; 1–4 – stages of lake development according to [19]

Повышенные значения LOI_{950} в денекампе и раннем дриасе, вероятнее всего, могут быть обусловлены некоторым потеплением климата и влиянием резервуарного эффекта. Следует отметить, что в это время привнос терригенного материала осуществлялся главным образом за счет эоловых процессов [18], постепенно затухая по мере нарастания влажности климата и появления сомкнутого растительного покрова [47]. Ранний дриас характеризуется как стадия начала перехода от преобладания эолового переноса терригенного вещества к переносу его водотоками с Тургоякского гранитоидного массива и связанных с ним водоразделов, о чем свидетельствует плавное увеличение значений χ_p .

Плейстоцен-голоценовый рубеж, ознаменовавший начало эпохального потепления, приходится на этап мелководного озера с повышенной минерализацией (второй этап развития озера) [19].

Указанный рубеж отмечается в вариациях LOI_{950} , χ_p , Br (рис. 5). В верхнем плейстоцене χ_p изменяется от 0,058 до 0,099 со средним 0,081 ($\cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$), в голоцене: от 0,030 до 0,087 со средним 0,052 ($\cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$) [18]. Для верхнего плейстоцена характерны изменения в мас. % LOI_{950} , Br в диапазонах 12,12–37,06; 0,0023–0,0119; 0,0093–0,0176 и со средними значениями 16,74; 0,0082; 0,0137 соответственно. В голоцене значения данных показателей варьируют в мас. % от 28,93 до 39,91 со средним 35,13 по LOI_{950} , от 0,0088 до 0,0146 со средним 0,0117 по Br.

На протяжении голоцена (третий и четвертый этапы в развитии озера по [19]) аккомодация в озере увеличивалась, что отображается в трендах значений фактора 1 и χ_p (рис. 5).

Заключение

Новые геохимические данные по осадкам озера Тургойк позволили выявить и охарактеризовать неоднородность плейстоцен-голоценового разреза по вариациям ряда показателей (CIA; группы элементов (Al, Rb, Mg, Na), (Si, K, Fe, Ti), (Cu, Ni, Zn, Ba), (Br, Cl); Mn; LOI₉₅₀). Выявленная геохимическая неоднородность отражает стратиграфическое строение донных отложений озера Тургойк и климатические стадии на протяжении последних ~25 тыс. лет.

Поздний плейстоцен характеризуется в основном холодным климатом (низкое содержание Br в интервале 0,0023–0,0119 мас. %, среднее значение 0,0082 мас. %) и низкой биопродуктивностью озерной осадочной системы (низкие содержания LOI₉₅₀

в интервале 12,12–37,06 мас. %, среднее значение 16,74 мас. %). Ранний дриас может быть рассмотрен как стадия начала перехода от преобладания эолового переноса терригенного вещества к переносу водотоками, о чем свидетельствует плавное увеличение значений χ_p .

С началом голоцена отмечается значительное увлажнение и потепление климата: содержания LOI₉₅₀ варьируют от 28,93 до 39,91 мас. % со средним 35,13 мас. %, а Br – от 0,0088 до 0,0146 мас. % со средним 0,0117 мас. %. Аккомодация озера в голоцене увеличивается, что отражается в нисходящих трендах геохимического фактора F1 и χ_p .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baumgardner R.W., Hamlin H.S., Rowe H.D. High-resolution core studies of Wolfcamp/Leonard basinal facies, southern Midland Basin, Texas // Proc. SWS AAPG Meet., May 2014. – Texas: Am. Assoc. Pet. Geol., 2014. – Search and Discovery Art. No 10607.
2. McLennan S.M. Weathering and global denudation // J. Geol. – 1993. – Vol. 101. – № 2. – P. 295–303.
3. Harnois L. The CIW index: a new chemical index of weathering // Sediment. Geol. – 1988. – Vol. 55. – № 3–4. – P. 319–322.
4. Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance // Geology. – 1995. – Vol. 23. – № 10. – P. 921–924.
5. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry / Eds. H.D. Holland, K.K. Turekian. – Oxford: Elsevier-Perгамon, 2003. – Vol. 3. – P. 1–64.
6. Юсупова А.Р., Нурғалиева Н.Г. Геохимическая основа индикации изменения климата по голоценовым донным отложениям озера Банное (Южный Урал) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2021. – Т. 163. – № 3. – С. 514–526.
7. Geochemical records of Qionghai Lake sediments in southwestern China linked to late Quaternary climate changes / G. Wang, Y. Wang, Z. Wei, W. He, T. Zhang, X. Ma // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2020. – Vol. 560. – P. 109902.
8. Geochemistry of late quaternary sediments from Tecocomulco lake, central Mexico: Implication to chemical weathering and provenance / P.D. Roy, M. Caballero, R. Lozano, W. Smykatz-Kloss // Chemie Der Erde – Geochemistry. – 2008. – Vol. 68. – № 4. – P. 383–393.
9. Масленникова А. В., Удачин В.Н., Дерягин В. В. Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. – 136 с.
10. Андреева М.А. Озера Среднего и Южного Урала. – Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 1973. – 272 с.
11. Рогозин А.Г., Такачев В.А. О некоторых гидрологических особенностях озера Тургойк // Известия Челябинского научного центра. – 1998. – № 1. – С. 70–75.
12. Экология озера Тургойк / С.В. Гаврилкина, О.Е. Кораблева, Д.В. Митюхляев, А.Г. Рогозин, Г.В. Танаева, В.А. Ткачев, Л.И. Шиманский. – Миасс: ИГЗ УрО РАН, 1998. – 154 с.
13. Дзянова О.П., Дерягин В.В. Литолого-геоморфологические особенности побережий некоторых озер Южного Урала и Зауралья // Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки. – 2010. – № 2. – С. 106–112.
14. Захаров С.Г. Динамика экологического состояния озера Тургойк // Известия русского географического общества. – 2020. – Т. 152. – № 1. – С. 56–65.
15. Zakharov S.G. Anthropogenic eutrophication of lakes Turgoyak and Bolshoi Kisegach // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 834. – P. 012048.
16. Assessing relationship of degradation of coastal zones and phytoplankton species structure of Lake Uvildy and Lake Turgoyak (South Ural, Russia) / A. Kostyukova, I. Mashkova, S. Belov, E. Shchelkanova, V. Trofimenko, V. Kargina // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 958. – 2022. – Vol. 958. – № 1. – P. 012002.
17. Sediment records of lake eutrophication and oligotrophication under the influence of human activity and climate warming in the Urals metallurgical region (Russia) / A. Maslennikova, V. Udachin, V. Deryagin, D. Artemyev, K. Filippova, V. Gulakov, N. Udachin, P. Aminov // Hydrobiologia. – 2023. – Vol. 850. – P. 1669–1698.
18. Предварительные магнитно-минералогические исследования неоплейстоцен-голоценовых осадков озера Тургойк / Л.Р. Косарева, Н.Г. Нурғалиева, Д.К. Нурғалиев, Х.-Ч. Ли, П.С. Крылов, Д.М. Кузина, В.В. Антоненко // Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки. – 2023. – Vol. 165. – № 4. – P. 563–576.
19. Реконструкция этапов развития озера Тургойк (Южный Урал) в голоцене / А.В. Масленникова, В.Н. Удачин, В.В. Дерягин, М.В. Штенберг // Литосфера. – 2018. – Т. 18. – № 6. – С. 914–927.
20. Петров В.И., Шалагинов А.Э., Пунегов Б.Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Южноуральская. Лист N-41-VII (Миасс). Объяснительная записка. – М.: Московский филиал ФГУП «ВСЕГЕИ», 2003. – 167 с.

21. Сначёв А.В., Сначёв В.И., Романовская М.А. Геология, условия образования и рудоносность Тургоряжского гранитного массива и углеродистых отложений его западного обрамления (Южный Урал) // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. – 2020. – № 1. – С. 12–20.
22. Тургоряжско-Сыростанская группа гранитоидных массивов зоны Главного Уральского глубинного разлома / Г.Б. Ферштатер, Е.С. Шагалов, Ф. Беа, П. Монтеро // Магматические и метаморфические образования Урала и их металлогения. – Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2000. – С. 129–158.
23. Цифровая модель озерной системы Тургоряж, Южный Урал / И.Ю. Чернова, Л.Р. Косарева, Н.Г. Нургалиева, О.С. Чернова // Георесурсы – 2025. – Т. 27. – № 2. – С. 264–280.
24. Минюк П.С., Борходоев В.Я. Геохимические индикаторы седиментационных и постседиментационных событий в озерах Северо-Востока России // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: Материалы VII Всерос. литол. совещания. – Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2013. – Т. 2. – С. 282–285.
25. Increasing chemical weathering in the Himalayan system since the Last Glacial Maximum / M. Lupker, C. France-Lanord, V. Galy, J. Lave // Earth Planet. Sci. Lett. – 2013. – Vol. 365. – P. 243–252.
26. Large-scale climatic fluctuations in the latest Ordovician on the Yangtze block, South China / D.T. Yan, D.Z. Chen, Q.C. Wang, J.G. Wang // Geology. – 2010. – Vol. 38. – № 7. – P. 599–602.
27. Roy D.K., Roser B.P. Climatic control on the composition of Carboniferous-Permian Gondwana sediments, Khalaspir basin, Bangladesh // Gondwana Res. – 2013. – Vol. 23. – № 3. – P. 1163–1171.
28. Global continental weathering trends across the Early Permian glacial to postglacial transition: Correlating high- and low-paleoatitude sedimentary records / J.H. Yang, P.A. Cawood, Y.S. Du, B. Feng, J.X. Yan // Geology. – 2014. – Vol. 42. – № 10. – P. 835–838.
29. Continental weathering coupled to Paleogene climate changes in North America / A. Hessler, J. Zhang, J.A. Covault, W.A. Ambrose // Geology. – 2017. – Vol. 45. – № 10. – P. 911–914.
30. McLennan S.M. Weathering and global denudation // J. Geol. – 1993. – Vol. 101. – № 2. – P. 295–303.
31. Scheffler K., Hoernes S., Schwark L. Global changes during Carboniferous–Permian glaciation of Gondwana: linking polar and equatorial climate evolution by geochemical proxies // Geology. – 2003. – Vol. 31. – № 7. – P. 605–608.
32. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. – 1982. – Vol. 299. – P. 715–717.
33. High-resolution clay mineral and major elemental characterization of a Permian-Triassic terrestrial succession in southwestern China: diagenetic and paleoclimatic/paleoenvironmental significance / G. Xu, Q. Feng, J.F. Deconinck, J. Shen, T. Zhao, A.L. Young // Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol. – 2017. – Vol. 481. – P. 77–93.
34. Особенности вещественного состава донных отложений озера Сабакты (Южный Урал) / А.Р. Юсупова, Н.Г. Нургалиева, Д.М. Кузина, Л.Р. Косарева, Д.А. Юнусова // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 7. – С. 72–81.
35. Литологические особенности донных отложений озера Банное (Южный Урал) как индикатор изменений природной среды и климата голоцена. / А.Р. Юсупова, Н.Г. Нургалиева, Д.М. Кузина, А.М. Рогов, Г.Р. Нигаматзянова // Литосфера. – 2024. – Vol. 24. – № 1. – P. 173–194.
36. The Permian-Triassic transition in ocean island setting: environmental disturbances and new high-resolution carbon-isotope record from the Qiangtang Basin, NW China / X. Fu, J. Wang, C. Song, Z. Wang, S. Zeng, D Wang. // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2019. – Vol. 522. – P. 40–51.
37. Периодизация климатических циклов в голоцене по синхронным вариациям магнитных и геохимических параметров осадков озера Большое Яровое (Юго-запад Сибири) / Л.Р. Косарева, В.П. Щербаков, Д.К. Нургалиев, Н.Г. Нургалиева, Н.К. Сычева, В.В. Антоненко, Д.М. Кузина, В.Г. Евтюгин // Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61. – № 7. – С. 889–907.
38. Предварительные магнитно-минералогические исследования донных отложений озера Белое (Южная Сибирь, Россия) / А.Р. Юсупова, Н.Г. Нургалиева, Д.М. Кузина, В.Ф. Сотникова, Д.И. Муликова // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2023. – № 165. – Т. 4. – С. 620–632.
39. Магнитные свойства донных отложений озера Банное (Южный Урал, Россия) / А.Р. Юсупова, Н.Г. Нургалиева, Д.М. Кузина, О.С. Чернова, В.В. Антоненко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – P. 40–50.
40. Магнитные свойства донных отложений озера Кандрыкуль (Республика Башкортостан, Россия) / Д.М. Кузина, А.Р. Юсупова, Н.Г. Нургалиева, Д.К. Нургалиев, П.С. Крылов, Д.И. Муликова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – P. 43–55.
41. Seismic and magneto-mineralogical investigations lake Maloe Miassovo (South Ural, Russia) / L. Kosareva, D. Kuzina, D. Nurgaliev, P. Krylov, V. Antonenko // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings. – Sofiya, 2018. – P. 383–390.
42. Сначёв А.В., Сначёв В.И., Романовская М.А. Геология, условия образования и рудоносность Тургоряжского гранитного массива и углеродистых отложений его западного обрамлений (Южный Урал) // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2020. – № 1. – С. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2020-1-12-20>
43. Маркова Ю.Н. Геохимические индикаторы условий осадконакопления в озерах Центральной Азии в позднем плейстоцене и голоцене: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2012. – 20 с.
44. 800-yr-long records of annual air temperature and precipitation over southern Siberia inferred from Teletskoye Lake sediments / I. Kalugin, A. Daryin, L. Smolyaninova, A. Andreev, B. Diekmann, O. Khlystov // Quaternary Research. – 2007. – Vol. 67. – № 3. – P. 400–410.
45. Пашкова Г.В., Айсуева Т.С., Иванов Е.В. Применение различных вариантов метода рентгенофлуоресцентного анализа для определения брома в донных осадках при палеоклиматических исследованиях // Стрoение литосферы и геодинамика: Материалы XXVI Всероссийской молодежной конференции. – Иркутск, 20–25 апреля 2015. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015. – С. 132–134.
46. Экология озера Большое Миассово / под ред. А.Г. Рогозина, В.А. Ткачева. – Миасс: ИГЗ УрО РАН, 2000. – 318 с.

47. Новенко Е.Ю. Динамика ландшафтов и климата в центральной и восточной Европе в голоцене – прогнозные оценки изменения природной среды // Геоморфологи. – 2021. Vol. 52. – № 3. – С. 24–47.
48. Blytt A. Forsøg til en teori om indvandringen af Norges flora under vexlende regnfulde og tørre Tider. – Naturvid: Christiana, 1876. – Vol. 21. – P. 279–362.
49. Blytt A. Essay on the immigration of the Norwegian flora during alternating rainy and dry periods. Nyt Mag. Naturvid. – Christiana (Oslo), 1876. – 89 p.
50. Sernander R. Studier öfver den gotländska vegetationens utvecklingshistoria. – Uppsala: Akademisk afhandling, 1894. –112 p.
51. Ravazzi C. An overview of the Quaternary continental stratigraphic units based on biological and climatic events in Italy // Ital. J. Quat. Sci. – 2003. – Vol. 16. – P. 11–18.

Информация об авторах

Анастасия Рафаиловна Юсупова, старший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5; i@ajusupova.ru. <https://orcid.org/0000-0001-8732-3053>

Лина Раисовна Косарева, старший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5; lina.kosareva@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-0969-1261>

Нурия Гавазовна Нурғалиева, доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5; nurgal07@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4372-9777>

Поступила в редакцию: 10.01.2025

Поступила после рецензирования: 05.03.2025

Принята к публикации: 17.09.2025

REFERENCES

1. Baumgardner R.W., Hamlin H.S., Rowe H.D. High-resolution core studies of Wolfcamp/Leonard basinal facies, southern Midland Basin, Texas. *Proc. SWS AAPG Meet. Texas, May 2014. Texas, Am. Assoc. Pet. Geol.*, 2014. Search and Discovery Art. no 10607.
2. McLennan S.M. Weathering and global denudation. *J. Geol.*, 1993, vol. 101, no. 2, pp. 295–303.
3. Harnois L. The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sediment. Geol.*, 1988, vol. 55, no. 3–4, pp. 319–322.
4. Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 1995, vol. 23, no. 10, pp. 921–924.
5. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. () *Treatise on Geochemistry*. Eds. H.D. Holland, K.K. Turekian. Oxford, Elsevier-Perгамon, 2003. Vol. 3, pp. 1–64.
6. Yusupova A.R., Nourgalieva N.G. Geochemical basis of climate change indication in the Holocene sediments of Lake Bannoe (Southern Urals, Russia). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2021, vol. 163, no. 3, pp. 514–526. (In Russ.)
7. Wang G., Wang Y., Wei Z., He W., Zhang T., Ma X. Geochemical records of Qionghai Lake sediments in southwestern China linked to late Quaternary climate changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, vol. 560, 109902.
8. Roy P.D., Caballero M., Lozano R., Smykatz-Kloss W. Geochemistry of late quaternary sediments from Tecocomulco lake, central Mexico: implication to chemical weathering and provenance. *Chemie Der Erde - Geochemistry*, 2008, vol. 68, no. 4, pp. 383–393.
9. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V. *Paleoecology and Geochemistry of the Lacustrine Sedimentation in the Urals*. Yekaterinburg, RIO UB RAS Publ., 2014. 136 p. (In Russ.)
10. Andreeva M.A. *Lakes of the Middle and Southern Urals*. Chelyabinsk, Yuzhno-Ural Publ. house, 1973. 272 p. (In Russ.)
11. Rogozin A.G., Takachev V.A. On some hydrological features of Lake Turgoyak. *Izv. Chelyab. Nauchn. Tsentra*, 1998, no. 1, pp. 70–75. (In Russ.)
12. Gavrilkina S.V., Korableva O.E., Mityukhlyayev D.V., Rogozin A.G., Tanaeva G.V., Tkachev V.A., Shimansky L.I. *Ecology of Lake Turgoyak*. Miass, Ilmensky State Reserve, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 1998. 153 p. (In Russ.)
13. Diyanova O.P., Deryagin V.V. Lithologic and geomorphological characteristics of some lakes in the Southern Urals and Trans-Urals. *Vestn. MGOU. Ser.: Estestv. Nauki*, 2010, no. 2, pp. 106–112. (In Russ.)
14. Zakharov S.G. Dynamics of the environmental status of Lake Turgoyak. *Izv. Russ. Geogr. O-va.*, 2020, vol. 152, no. 1, pp. 56–65. (In Russ.)
15. Zakharov S.G. Anthropogenic eutrophication of lakes Turgoyak and Bolshoi Kisegach. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 834, 012048.
16. Kostryukova A., Mashkova I., Belov S., Shchelkanova E., Trofimenko V., Kargina V. Assessing relationship of degradation of coastal zones and phytoplankton species structure of Lake Uvildy and Lake Turgoyak (South Ural, Russia). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 958, 2022, vol. 958, no. 1, 012002.
17. Maslennikova A., Udachin V., Deryagin V., Artemyev D., Filippova K., Gulakov V., Udachin N., Aminov P. Sediment records of lake eutrophication and oligotrophication under the influence of human activity and climate warming in the Urals metallurgical region (Russia). *Hydrobiologia*, 2023, vol. 850, pp. 1669–1698.

18. Kosareva L.R., Nurgalieva N.G., Nurgaliev D.K., Li H., Krylov P.S., Kuzina D.M., Antonenko V.V. Preliminary Magnetic Mineralogical Studies of the Neopleistocene-Holocene Sediments from Lake Turgoyak. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 563–576. (In Russ.)
19. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V., Shtenberg M.V. Reconstruction of Turgoyak Lake (the Southern Urals) ecosystem changes in Holocene. *Litosfera*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 914–927. (In Russ.)
20. Petrov V.I., Shalaginov A.E., Punegov B.N. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Second Edition. Yuzhnouralskaya Series. Sheet N-41-VII (Miass). Explanatory Letter. Moscow, Moscow branch, VSEGEI Publ., 2003. 167 p. (In Russ.)
21. Snachev A.V., Snachev V.I., Romanovskaya M.A. Geology, formation conditions, and ore content of the Turgoyak granite massif and carbonaceous deposits of its western framing (South Ural). *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, 2020, no. 1, pp. 12–20. (In Russ.)
22. Fershtater G.B., Shagalov E.S., Bea F., Montero P. *The Turgoyak-Syrostan group of granitoid massifs in the zone of the Main Ural deep fault. Magmatic and metamorphic complexes of the Urals and their genesis*. Yekaterinburg, IGIG UrO RAN Publ., 2000, pp. 129–158. (In Russ.)
23. Chernova I.Yu., Kosareva L.R., Nurgalieva N.G., Chernova O.S. Digital model of the Turgoyak Lake system, Southern Urals. *Georesursy*, 2025, vol. 27, no. 2, pp. 264–280.
24. Minyuk P.S., Borkhodoev V.Ya. Geochemical indicators of sedimentation and post-sedimentation events in the lakes of the Northeast of Russia. Sedimentary Basins, Sedimentation and Post-Sedimentation Processes in the Geological History. Proc. VII All-Russian Lithological Conference. Novosibirsk, INGG SB RAS Publ., 2013. Vol. 2, pp. 282–285. (In Russ.)
25. Lupker M., France-Lanord C., Galy V., Lave J. Increasing chemical weathering in the Himalayan system since the Last Glacial Maximum. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2013, vol. 365, pp. 243–252.
26. Yan D.T., Chen D.Z., Wang Q.C., Wang J.G. Large-scale climatic fluctuations in the latest Ordovician on the Yangtze block, South China. *Geology*, 2010, vol. 38, no. 7, pp. 599–602.
27. Roy D.K., Roser B.P. Climatic control on the composition of Carboniferous-Permian Gondwana sediments, Khalaspir basin, Bangladesh. *Gondwana Res.*, 2013, vol. 23, no. 3, pp. 1163–1171.
28. Yang J.H., Cawood P.A., Du Y.S., Feng B., Yan J.X. Global continental weathering trends across the Early Permian glacial to postglacial transition: correlating high- and low-paleotatitude sedimentary records. *Geology*, 2014, vol. 42, no. 10, pp. 835–838.
29. Hessler A., Zhang J., Covault J.A., Ambrose W.A. Continental weathering coupled to Paleogene climate changes in North America. *Geology*, 2017, vol. 45, no. 10, pp. 911–914.
30. McLennan S.M. Weathering and global denudation. *J. Geol.*, 1993, vol. 101, no. 2, pp. 295–303.
31. Scheffler K., Hoernes S., Schwark L. Global changes during Carboniferous–Permian glaciation of Gondwana: linking polar and equatorial climate evolution by geochemical proxies. *Geology*, 2003, vol. 31, no. 7, pp. 605–608.
32. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, vol. 299, pp. 715–717.
33. Xu G., Feng Q., Deconinck J.F., Shen J., Zhao T., Young A.L. High-resolution clay mineral and major elemental characterization of a Permian-Triassic terrestrial succession in southwestern China: Diagenetic and paleoclimatic/paleoenvironmental significance. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, 2017, vol. 481, pp. 77–93.
34. Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Kosareva L.R., Yunusova D.A. Composition characteristics of Sabakty Lake Lacustrine Sediments (Southern Urals). *Advances In Current Natural Sciences*, 2023, no. 7, pp. 72–81. (In Russ.)
35. Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Rogov A.M., Nigamatzyanova G.R. Lithological features of Lake Bannoe sediments (Southern Urals) as an indicator of environmental and climate changes in the Holocene. *Lithosphere (Russia)*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 173–194. (In Russ.)
36. Fu X., Wang J., Song Z., Wang Z., Zeng S., Wang D. The Permian-Triassic transition in ocean island setting: Environmental disturbances and new high-resolution carbon-isotope record from the Qiangtang Basin, NW China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, vol. 522, pp. 40–51.
37. Kosareva L.R., Shcherbakov V.P., Nurgaliev D.K. Periodization of Holocene climatic cycles based on synchronous variations in the magnetic and geochemical parameters of the sediments of lake Bolshoe Yarovoe (Southwestern Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2020, vol. 61, no. 7, pp. 723–737.
38. Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Sotnikova V.F., Mulikova D.I. Preliminary magnetic mineralogical studies of Lake Beloe sediments (Southern Siberia, Russia). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 620–632. (In Russ.)
39. Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Chernova O.S., Antonenko V.V. Magnetic properties of lake Bannoe sediments (Southern Urals, Russia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 40–50. (In Russ.)
40. Kuzina D.M., Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Nurgaliev D.K., Krylov P.S., Mulikova D.I. Magnetic properties of lake Kandrykul sediments (Republic of Bashkortostan, Russian Federation). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 43–55. (In Russ.)
41. Kosareva L., Kuzina D., Nurgaliev D., Krylov P., Antonenko V. Seismic and magneto-mineralogical investigations Lake Maloe Miassovo (South Ural, Russia). *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings*. Sofiya, 2018. pp. 383–390.
42. Snachev A.V., Snachev V.I., Romanovskaya M.A. Geology, formation conditions, and ore content of the Turgoyak granite massif and carbonaceous deposits of its western framing (South Ural). *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, 2020, vol. 1, pp. 12–20. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2020-1-12-20>
43. Markova Yu.N. *Geochemical indicators of sedimentation conditions in lakes of Central Asia in the late Pleistocene and Holocene*. Cand. Diss. Abstract. Irkutsk, 2012. 20 p.

44. Kalugin I., Daryin A., Smolyaninova L., Andreev A., Diekmann B., Khlystov O. 800-yr-long records of annual air temperature and precipitation over southern Siberia inferred from Teletskoye Lake sediments. *Quaternary Research*, 2007, vol. 67, no. 3, pp. 400–410.
45. Pashkova G.V., Aisueva T.S., Ivanov E.V., Finkelstein A.L. X-ray fluorescence determination of bromine in lake bottom sediments during paleoclimatic studies. *Lithosphere Structure and Geodynamics. Proc. of the XXVI All-Russian Youth Conference*. Irkutsk, April 20–25, 2015. Irkutsk, Institute of Earth Crust SB RAS Publ., 2015. pp. 132–134. (In Russ.)
46. *Ecology of Lake Bolshoe Miassovo*. Eds. A.G. Rogozin, V.A. Tkachev. Miass, Ilmen State Nature Reserve, 2000. 318 p. (In Russ.)
47. Novenko E.Yu. Landscape and climate dynamics in Central and Eastern Europe during the Holocene – assessment of future environmental changes. *Geomorfologiya*, 2021, vol. 52, no. 3, pp. 24–47. (In Russ.)
48. Blytt A. Essay on the immigration of the Norwegian flora during alternating rainy and dry periods. *Nyt Mag. Naturvid. Christiania (Oslo)*, 1876, vol. 21, pp. 279–362. (In Norv.)
49. Blytt A. Essay on the immigration of the Norwegian flora during alternating rainy and dry periods. *Christiania (Oslo), Cammermeyer*, 1876. 89 p. (In Norv.)
50. Sernander R. *Studies on the developmental history of the vegetation of Gotland*. Uppsala, Academic dissertation, 1894. 112 p. (In Norv.)
51. Ravazzi C. An overview of the Quaternary continental stratigraphic units based on biological and climatic events in Italy. *Ital. J. Quat. Sci.*, 2003, vol. 16, pp. 11–18.

Information about the authors

Anastasia R. Yusupova, Cand. Sc., Senior Research Officer, Kazan Federal University, 4/5, Kremlyovskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation; i@ajusupova.ru. <https://orcid.org/0000-0001-8732-3053>

Lina R. Kosareva, Cand. Sc., Senior Research Officer, Kazan Federal University, 4/5, Kremlyovskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation; lina.kosareva@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-0969-1261>

Nuriiia G. Nurgalieva, Dr. Sc., Professor, Kazan Federal University, 4/5, Kremlyovskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation; nurgal07@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4372-9777>

Received: 10.01.2025

Revised: 05.03.2025

Accepted: 17.09.2025