

Геохимическая летопись озера Сабакты: количественная оценка электропроводности вод и реконструкция обстановок осадконакопления позднеледниковья и голоцена степной зоны Южного Урала

А. В. Масленникова¹, Д. А. Артемьев¹, Э. П. Зазовская², В. В. Дерягин³, В. О. Гулаков¹,
Н. В. Удачин¹, П. Г. Аминов¹, В. Н. Удачин^{1,4}

¹Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, 456317, Челябинская обл., г. Миасс, Ильменский заповедник, e-mail: adenophora@inbox.ru

²Институт географии РАН, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29

³Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

⁴Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76

Поступила в редакцию 10.10.2022 г., принята к печати 02.03.2023 г.

Объект исследования. Колонка донных отложений оз. Сабакты как архив данных об обстановках осадконакопления голоцена и позднеледниковья Южного Урала. **Цель исследования.** Получение модели множественной регрессии, позволяющей выполнять количественные реконструкции электропроводности вод на основе геохимии донных отложений озер, и реконструкция обстановок осадконакопления в позднеледниковье и голоцене на основе изучения геохимической летописи донных отложений оз. Сабакты. **Материал и методы.** Для получения модели множественной регрессии определены коэффициенты корреляции Пирсона между содержанием химических элементов в донных отложениях и гидрохимическими данными 107 озер Южного и Среднего Урала с последующим регрессионным анализом. Основой для реконструкций обстановок осадконакопления послужили результаты ускорительной масс-спектрометрии (AMS ¹⁴C), определения активности изотопа ²¹⁰Pb, данные анализа содержаний химических элементов и органического вещества в донных отложениях оз. Сабакты. **Результаты.** Получены три уравнения множественной регрессии с использованием концентрации Na, Ca, Li и Sr для реконструкции электропроводности вод. Выявлено, что в холодных и сухих условиях позднеледниковья (>12 тыс. календарных лет назад) оз. Сабакты представляло собой слабосоленоватый водоем. Переход от позднеледниковья к голоцену (12–11.6 тыс. к.л.н.) сопровождался увеличением продуктивности слабосоленоватого озера. В раннем (11.6–8.2 тыс. к.л.н.) и среднем (8.2–4.2 тыс. к.л.н.) голоцене определены колебания электропроводности вод, связанные с вариацией увлажнения и чередованием потеплений и похолоданий климата. В позднем голоцене (4.2 тыс. к.л.н. – настоящее время) на фоне гумидизации климата произошло опреснение озера. **Выводы.** Предложенные модели множественной регрессии дают возможность быстрых количественных реконструкций электропроводности и особенно актуальны для отложений позднеледниковья – начала голоцена, имеющих незначительное количество микрофоссилий. Геохимическая летопись оз. Сабакты отражает глобальные и региональные климатические осцилляции и характеризуется большей информативностью в сравнении с геохимическими летописями лесных озер Южного Урала. Установлено снижение электропроводности оз. Сабакты около 7.9 и 4.2 тыс. к.л.н., что совпадает с данными для других озер Урала.

Ключевые слова: донные отложения, электропроводность воды, обстановки осадконакопления, позднеледниковье, голоцен, Южный Урал, количественная реконструкция, геохимия донных отложений, озеро

Источник финансирования

Анализ геохимии донных отложений оз. Сабакты, реконструкции параметров воды, стадий развития озера в голоцене и позднеледниковье выполнен при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-17-00071, <https://rscf.ru/project/21-17-00071/>). Геохимическая модель множественной регрессии для количественных реконструкций электропроводности воды разработана в рамках государственного задания Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН

Для цитирования: Масленникова А.В., Артемьев Д.А., Зазовская Э.П., Дерягин В.В., Гулаков В.О., Удачин Н.В., Аминов П.Г., Удачин В.Н. (2023) Геохимическая летопись озера Сабакты: количественная оценка электропроводности вод и реконструкция обстановок осадконакопления позднеледниковья и голоцена степной зоны Южного Урала. *Литосфера*, 23(3), 410-429. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-3-410-429>

For citation: Maslennikova A.V., Artemiev D.A., Zazovskaia E.P., Deryagin V.V., Gulakov V.O., Udachin N.V., Aminov P.G., Udachin V.N. (2023) Geochemical record of Lake Sabakty: Electrical conductivity and reconstruction of the Lateglacial and Holocene environments in the Southern Urals (Russia) steppe. *Lithosphere (Russia)*, 23(3), 410-429. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-3-410-429>

© А.В. Масленникова, Д.А. Артемьев, Э.П. Зазовская, В.В. Дерягин, В.О. Гулаков, Н.В. Удачин, П.Г. Аминов, В.Н. Удачин, 2023

Geochemical record of Lake Sabakty: Electrical conductivity and reconstruction of the Lateglacial and Holocene environments in the Southern Urals (Russia) steppe

Anna V. Maslennikova¹, Dmitry A. Artemiev¹, Elya P. Zazovskaia², Vladimir V. Deryagin³,
Vasily O. Gulakov¹, Nikolay V. Udachin¹, Pavel G. Aminov¹, Valery N. Udachin^{1,4}

¹South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy, Ilmeny Reserve Area, Miass, Chelyabinsk region 456317, Russia, e-mail: adenophora@inbox.ru

²Institute of Geography, RAS, 29 Staromonetnyi lane, Moscow 119017, Russia

³South Ural State Humanitarian Pedagogical University, 69 Lenin st., Chelyabinsk 454080, Russia

⁴South Ural State University, 76 Lenin st., Chelyabinsk 454080, Russia

Received 10.10.2022, accepted 02.03.2023

Research subject. The Lake Sabakty sediments core, as a source of data on the Holocene and Lateglacial environments in the Southern Urals. **Aim.** To obtain a multiple regression model for quantitative reconstructions of the electrical conductivity of water based on the geochemistry of lake sediments and to reconstruct the Late Glacial and Holocene environments based on the study of the Lake Sabakty geochemical record. **Materials and methods.** After determination of correlations between the content of chemical elements in lake sediments and hydrochemical parameters of 107 Ural lakes, multiple regression models were obtained. Reconstructions were performed based on the results obtained by accelerator mass spectrometry (AMS ¹⁴C), ²¹⁰Pb activity determination, and an analysis of chemical elements and organic matter contents in the sediment core. **Results.** Three multiple regression models using the concentrations of Na, Ca, Li, and Sr were obtained for electrical conductivity of water reconstruction. In the cold and dry Lateglacial (>12.0 ka cal BP), Lake Sabakty was a slightly brackish reservoir. During the transition from the Lateglacial to the Holocene (12–11.6 ka cal BP), the Lake Sabakty became more productive. In the Early (11.6–8.2 ka cal BP) and Middle (8.2–4.2 ka cal BP) Holocene, the electrical conductivity of water varied under the action of fluctuations in effective moisture. In the Late Holocene (4.2 ka cal BP – present), the Lake Sabakty became less saline due to an increase in effective moisture. **Conclusions.** The proposed multiple regression models enable rapid quantitative reconstructions of the electrical conductivity of water, which are particularly relevant for Lateglacial–Early Holocene sediments with a low number of microfossils. The Lake Sabakty geochemical record reflects global and regional climatic fluctuations, being more informative compared to the geochemical records of forest lakes in the Southern Urals. The decrease in the electrical conductivity of water of Lake Sabakty of approximately 7.9 and 4.2 ka cal BP coincides with similar data for several other lakes in the Urals.

Keywords: lake sediments, electrical conductivity, environments, Lateglacial, Holocene, Southern Urals, quantitative reconstruction, geochemistry of lake sediments, lake

Funding information

The geochemical analysis of Lake Sabakty sediments and reconstructions of its parameters, stages of its development in the Holocene and Lateglacial were supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 21-17-00071, <https://rscf.ru/project/21-17-00071/>). The multiple regression model for quantitative reconstruction of electrical conductivity based on geochemical data was developed with the State Contract of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences support

Acknowledgements

The authors express gratitude to M.N. Malyarenok, G.F. Lonshchakova, L.G. Udachina, L.B. Lapshina, N.V. Sharshuyeva, P.A. Karionova for their assistance in analyzing the sediments and waters of the studied lakes.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно многолетнему исследованию озер Южного и Среднего Урала, минерализация озерных вод, так же как и их электропроводность (electrical conductivity, EC), зависит от климатического фактора, возрастая с запада на восток и с севера на юг с уменьшением коэффициента увлажнения тер-

ритории (Андреева, 1973). Климат влияет на электропроводность и минерализацию вод озер через изменение количества осадков, испарения, притока подземных вод. Реконструкция электропроводности или минерализации озерных вод позволяет получить информацию о чередовании фаз гумидизации и аридизации климата в прошлом. Для данной цели часто используют микропалеонтологические

исследования, основанные на качественных или количественных реконструкциях по диатомовым водорослям (Fritz et al., 2013), хирономидам (Zhang et al., 2007) или цистам хризифит (Zeeb, Smol, 1995). Основными недостатками данных методов являются трудоемкость микропалеонтологического анализа, а также реакция сообществ организмов не только на изменение электропроводности, но и на другие факторы, такие как содержание биогенных элементов, температура, освещенность, что вносит искажение в полученный результат. Поэтому необходимо применение альтернативных способов реконструкции данного параметра. Одним из вариантов может быть использование данных о содержании элементов примесей и основных элементов в колонках донных отложений, а также разнообразных геохимических модулей (Liu, Cao, 1984; Юдович, Кетрис, 2000; Маслов, 2005; Liu et al., 2002; Sun et al., 2010; Zou et al., 2021). Успешность применения геохимических индексов для озер зависит от многих факторов, в том числе от состава пород водосбора и особенностей биохеогенных процессов в озерах. На основе изучения 56 озер Южного Урала был получен региональный индикатор минерализации озер ($MM = LOI_{950^{\circ}C}/LOI_{550^{\circ}C}$) (Масленникова и др., 2018). Однако из-за малого градиента минерализации, который охватывался выборкой из 56 озер, данный индекс может быть применим к ограниченному количеству озер – с пониженной минерализацией. Поэтому первой целью данного исследования является получение модели множественной регрессии на основе геохимических данных 107 озер Урала, имеющих широкую вариацию минерализации и электропроводности.

Палеорекострукции голоцена Южного Урала необходимы не только для понимания закономерностей осцилляций континентального палеоклимата, но и для археологических исследований. Изучение торфяных разрезов (Панова, 1982), колонки донных отложений озер (Давыдова, 1978; Хомотова, 1995; Maslennikova, 2020), отложений пещер (Lapteva, Korona, 2012), палеопочв (Khokhlova et al., 2018; Prikhod'ko et al., 2013; Stobbe et al., 2016; Ivanov et al., 2019) Южного Урала выявили противоречия в заключениях о чередовании периодов гумидизации и аридизации климата на данной территории. Они могут быть связаны с ошибочными интерпретациями, недостатками используемых методов реконструкции, количеством и качеством радиоуглеродных датировок, а также с неоднородностью климатических условий на Южном Урале. Палеолимнологические исследования позволяют проводить непрерывные реконструкции различных параметров палеосреды на основе использования комплекса методов. К настоящему моменту количественные и качественные реконструкции изменения параметров озер выполнены для позднеледниковья и всего голоцена горно-лесной зоны

Южного и Среднего Урала (Масленникова и др., 2014; Maslennikova, Udachin, 2017; Maslennikova, 2020; Maslennikova, 2022). Для границы степной и горно-лесной зон получены первые данные минералогического исследования колонки донных отложений, отобранной в восточной части оз. Сабакты (Kuzina et al., 2022). Для колонки донных отложений оз. Банное, расположенного вблизи оз. Сабакты, опубликованы первые геохимические и гранулометрические данные (Yusupova et al., 2022). Количественные реконструкции выполнены только для оз. Талкас (Maslennikova, 2020), расположенного в 80 км к югу от оз. Сабакты. Между тем колонка донных отложений оз. Талкас охватывает период не более 6 тыс. к.л.н. Поэтому второй целью данной работы является изучение геохимии колонки донных отложений оз. Сабакты, отражающей озерный седиментогенез в течение более чем 12 тыс. к.л.н., и получение количественных данных об электропроводности озерных вод для реконструкции обстановок осадконакопления голоцена и позднеледниковья горных степей Южного Урала.

Озеро Сабакты

Озеро Сабакты (55°61' с.ш. 58°66' в.д., 436 м над уровнем моря) расположено на восточном макросклоне Южного Урала на границе степной и горно-лесной зоны в 30 км к северо-западу от г. Магнитогорска. Площадь водного зеркала – 2.16 км², средняя глубина – 2.9 м, максимальная глубина – 6.7 м (Андреева, 1973). Озеро Сабакты является бессточным с прозрачностью, варьирующей от 2.5 до 4.5 м глубины по диску Секки. Вода в озере гидрокарбонатная, магниевая-кальциевая, пресная, с минерализацией и электропроводностью, изменяющимися от 218 до 260 мг/л и от 198 до 260 мкСм/см соответственно. Породы водосбора представлены вулканитами мукасовской, карамалатышской, ирендыкской свит преимущественно апориолитового состава (Князев и др., 2013).

База данных озер Южного и Среднего Урала

Для получения возможности количественной реконструкции электропроводности с помощью модели множественной регрессии проанализированы вода и донные отложения 107 озер Свердловской, Челябинской, Курганской областей, а также Республики Башкортостан (рис. 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые работы

В начале апреля 2017 г. на глубине 6.8 м со льда была отобрана колонка донных отложений оз. Сабакты мощностью 1.68 м (табл. 1). Неконсолиди-

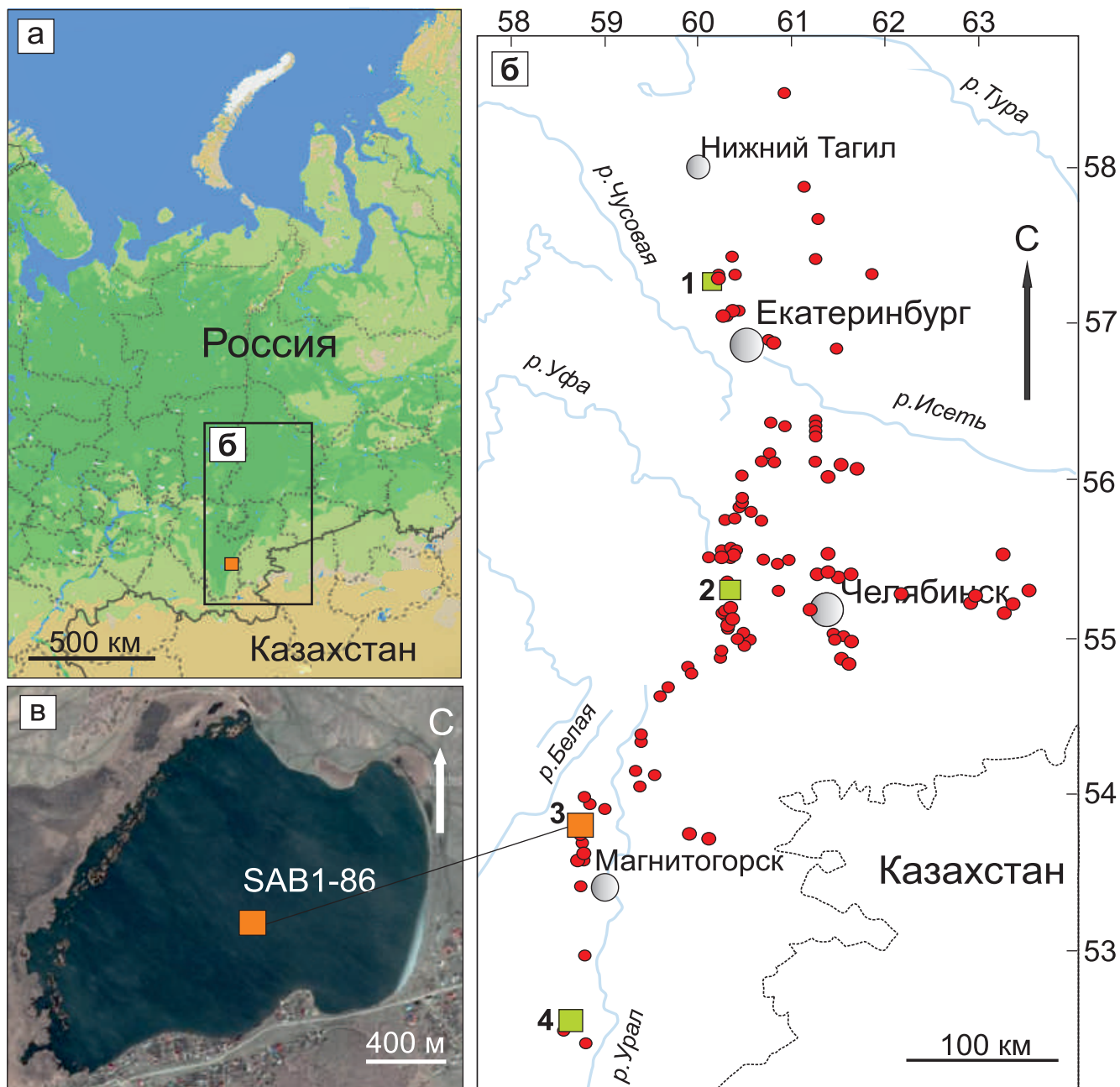


Рис. 1. Расположение исследуемого региона (а) и озер (б), спутниковый снимок оз. Сабакты и место отбора колонки донных отложений SAB1-86 (в).

Кружки – озера базы данных поверхностных озерных отложений Южного и Среднего Урала, квадраты – озера, для которых проведены количественные реконструкции электропроводности воды в голоцене: 1 – Таватуй, 2 – Сырыткуль, 3 – Сабакты, 4 – Талкас.

Fig. 1. The location of the studied region (а) and lakes (б), the Lake Sabakty satellite image and a place of the lake sediments core SAB1-86 selection (в).

Circles – lakes of the Southern and Middle Urals surficial lake sediments and water database, squares – lakes with electrical conductivity reconstructions: 1 – Lake Tavatui, 2 – Syrytkul, 3 – Sabakty, 4 – Talkas.

рованные донные отложения оз. Сабакты отбирались с помощью стратометра С1, остальную часть колонки извлекали поршневой трубкой с гидро-

затвором. Интервал отбора проб составлял 2 см. Поверхностные отложения 107 озер отбирались с помощью стратометра С1. Для анализа химиче-

Таблица 1. Строение колонки донных отложений оз. Сабакты**Table 1.** Description of the Lake Sabacty sediments core

Номер	Интервал, см	Описание	Возраст, к.л.н.
1	0–11	Неконсолидированный неоднородный буровато-оливковый сапропель с черными пятнами	–67–273
2	11–70	Консолидированный буровато-оливковый однородный сапропель	273–5122
3	70–83	Консолидированный буровато-оливковый однородный сапропель детритовой текстуры с остатками гидрофитов и остракодами	5122–6036
4	83–95	Консолидированный светло-буро-оливковый слоистый сапропель	6036–7045
5	95–129	Сильно консолидированный однородный буровато-оливковый сапропель с редкими макроостатками	7045–10870
6	129–135	Серо-оливковый сапропель с темными слоями с макрофитами и раковинами перловицы	10 870–11 500
7	135–150	Глинистый сапропель с плавным переходом цвета от серо-оливкового до палевого	11 500–12 064
8	150–155	Щебнистый горизонт (обломки щебня до 20 мм)	>12 064
9	155–168	Серовато-сизая глина	

ского состава использовался поверхностный слой (0.5–1 см) озерных отложений. Электропроводность вод определялась с помощью портативного кондуктометра HI 8733. Пробы воды 107 озер для гидрохимического анализа отбирались на глубине 0.3–0.5 м от поверхности воды в 2014–2021 гг. Отбор проб воды и поверхностных слоев озерных отложений проводился с борта лодки ПВХ в месте максимальной или средней глубины озер.

Гидрохимический анализ

Аналитические работы проведены в центре коллективного пользования ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (Аттестат аккредитации № ААС.А.00330). Анализ катионов и анионов в воде выполнен в соответствии с традиционными методами гидрохимического анализа: сульфаты – гравиметрическим методом осаждения с BaCl_2 ; хлориды – титрованием с AgNO_3 ; Ca, Mg – атомно-абсорбционным методом в режиме ацетилен–воздух, K и Na – атомно-абсорбционным методом в эмиссионном режиме (Perkin Elmer 3110, США). Содержания фосфатов и минеральных азотсодержащих веществ в воде установлены фотометрическим методом. Содержание общего фосфора в воде измерено фотометрически после окисления персульфатом. Определение общего азота и углерода проводилось на анализаторе Toraz NC, принцип действия которого основан на высокотемпературном термокаталитическом окислении соединений азота и углерода, содержащихся в пробе воды, с последующим детектированием окислов элементов и вычислением исходного содержания в пробе всех форм соединений азота и углерода.

Анализ химического состава донных отложений озер

Для установления содержания химических элементов в донных отложениях 107 озер использовался силикатный анализ из малых навесок массой 1.2 г по общепринятой методике (Унифицированные методы..., 1979). Содержание элементов-примесей в донных отложениях 107 озер определялось с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерным пробоотбором (ЛА-ИСП-МС) (16 образцов) на масс-спектрометре Agilent 7700x, соединенном с лазерной приставкой New Wave Research UP-213 с Nd: YAG 213 нм лазером. Колонка донных отложений оз. Сабакты (86 образцов) проанализирована с помощью ЛА-ИСП-МС. Подробности методики ИСП-МС и ЛА-ИСП-МС описаны в работе А.В. Масленниковой с соавторами (Maslennikova et al., 2020). Для оценки содержания органического вещества использовался метод определения потерь при прокаливании (LOI) (Heiri et al., 2001).

Хронология

Хронология колонки донных отложений оз. Сабакты определена на основе AMS ^{14}C 12 образцов в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН и Центре прикладных изотопных исследований Университета Джорджии (США) (табл. 2). Расчет календарного возраста произведен с помощью калибровочной кривой IntCal20 (Reimer et al., 2020). Абсолютный возраст донных отложений и скорости осадконакопления верхней части колон-

Таблица 2. Данные AMS ^{14}C датирования донных отложений оз. Сабакты

Table 2. AMS ^{14}C measurements from Lake Sabakty

Полевой номер	Лабораторный номер	Глубина, см	Датированный материал	AMS ^{14}C возраст, ^{14}C л.н.	Калиброванный возраст, к.л.н.
SAB 18	IGAN _{AMS} 9361	31–33	TOC	1340 ± 20	1178–1300
SAB 23	IGAN _{AMS} 7961	41–43	TOC	2045 ± 20	1927–2094
SAB 28	IGAN _{AMS} 9362	51–53	TOC	2795 ± 25	2794–2961
SAB 32.1	IGAN _{AMS} 7962	59–61	TOC	3995 ± 25	4415–4522
SAB 32.2	IGAN _{AMS} 7963	59–61	Раст. остатки	3975 ± 25	4359–4522
SAB 42	IGAN _{AMS} 7964	79–81	TOC	5080 ± 20	5749–5905
SAB 56.1	IGAN _{AMS} 7965	106–108	TOC	7345 ± 25	8031–8192
SAB 56.2	IGAN _{AMS} 7966	106–108	Раст. остатки	7260 ± 25	8012–8170
SAB 64	IGAN _{AMS} 9363	121–123	TOC	8910 ± 30	9907–10 182
SAB 75.1	IGAN _{AMS} 7967	139–141	TOC	10 260 ± 30	11 823–12 420
SAB 75.2	IGAN _{AMS} 7968	139–141	Раст. остатки	10 290 ± 30	11 833–12 439
SAB 80	IGAN _{AMS} 7969	149–150	TOC	10 310 ± 30	11 937–12 451

Примечание. Интервал калиброванного возраста приведен с 95.4%-й вероятностью. TOC – общий органический углерод.

Note. Calibrated ages are given with 95.4% probability. TOC – total organic carbon.

ки донных отложений определены с помощью радиоактивного изотопа ^{210}Pb . Время накопления до нижней границы слоя вычислялось с помощью модели постоянного потока (CRS) (Appleby, Oldfield, 1978) (табл. 3). Вся хронологическая информация включена в модель возраст–глубина, построенную в программном комплексе Bacon (version 2.2) (Blaauw, Christen, 2011) (рис. 2).

Статистический анализ

Статистический анализ выполнен в программе Statistica 10.0. Он включает в себя корреляционный и множественный регрессионный анализ. Все данные химического анализа донных отложений и гидрохимического анализа (кроме pH) прологарифмированы для приведения к нормальному распределению. С помощью расчета коэффициентов корреляции Пирсона (R) определены взаимосвязи между гидрохимией и составом донных отложений. Химические элементы донных отложений, имеющие коэффициент корреляции с гидрохимическими параметрами более 0.5, использованы в множественном регрессионном анализе. В конечную модель включены только переменные с высоким уровнем значимости ($p < 0.05$). Для проверки надежности модели применены анализ остатков, критерии Стьюдента и Фишера, оценка корреляции реальных и предсказанных величин. Для выделения геохимических ассоциаций по данным анализа колонки донных отложений оз. Сабакты выполнен корреляционный и кластерный анализ (евклидово расстояние, метод полной связи).

Построение графиков и выделение зон

Геохимические зоны для колонки донных отложений оз. Сабакты определены с помощью стратиграфически связанного кластерного анализа в программе Tilia (Grimm, 1991). Диаграммы рассеяния построены в программе Statistica 10.0, а стратиграфические диаграммы получены с использованием программного обеспечения C2 (Juggins, 2007).

РЕЗУЛЬТАТЫ

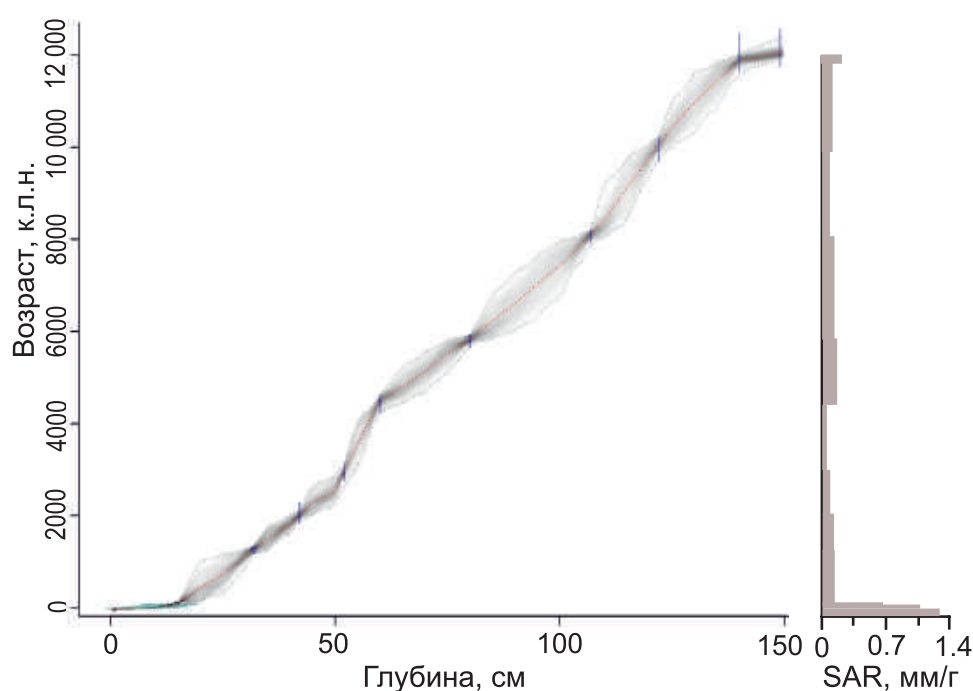
Построение модели множественной регрессии и оценка ее надежности

В результате вычисления корреляций между гидрохимическими параметрами, включающими в себя анионно-катионный состав воды, pH, ЕС, минерализацию, общий фосфор, азот, органический углерод, перманганатную окисляемость, фосфаты, нитраты, нитриты, аммонийный азот, и содержанием химических элементов в 115 образцах донных отложений 107 озер Южного и Среднего Урала установлена значимая положительная связь электропроводности вод и связанных с ней переменных (Cl^- , Na^+ , HCO_3^- , минерализации) с Li, Sr, Mg, Ca и Na в донных отложениях. После проверки на мультиколлинеарность выполнен множественный регрессионный анализ. В результате получено три модели (табл. 4).

Наилучшими параметрами (наименьшей среднеквадратической ошибкой регрессии и наибольшим коэффициентом детерминации (R^2)) обладает модель Li–Na–Ca:

Таблица 3. Удельная активность избыточного ^{210}Pb и возраст отложений верхней части колонки оз. Сабакты, рассчитанный по CRS-модели**Table 3.** ^{210}Pb exess measurements and CRS ages of the Lake Sabakty core upper part

Номер пробы	Интервал, см	Удельная активность $^{210}\text{Pb}_{\text{избыток}}$ Бк/кг	CRS-возраст	Время накопления до нижней границы слоя по модели CRS, лет	Скорость седиментации до нижней границы слоя, мм/г
SAB 1-3	0–5	179 ± 36	1978	38	1.33
SAB 4-5	5–9	56 ± 11	1945	71	1.27
SAB 6	9–11	17 ± 4	1928	88	1.26
SAB 7-8	11–13	18 ± 5	1888	128	1.01
SAB 9-10	13–17	11 ± 3	1743	273	0.62
SAB 11-12	17–21	6 ± 3	—	—	—

**Рис. 2.** Модель возраст–глубина колонки донных отложений оз. Сабакты, полученная с помощью программного комплекса Bacon (версия 2.0) (Blaauw, Christen, 2011).

Пунктирная центральная кривая соответствует “наилучшей” модели, построенной на основе среднего взвешенного возраста. Затенение вокруг центральной кривой показывает все возможные модели возраст–глубина. SAR – скорость осадконакопления.

Fig. 2. Age-depth model of the Lake Sabakty sediment core produced by the Bacon software package (Blaauw, Christen, 2011).

Stippled central curve shows single “best” model based on the weighted mean age for each depth, grey shading indicates all likely age–depth models.

$$\lg \text{EC} = 0.49\text{Li} + 0.61\text{Na} + 0.66\text{Ca} - 3.1.$$

Однако, чтобы иметь возможность реконструировать электропроводность отдельно по данным содержания основных элементов и элементов-примесей, получены модели Na–Ca и Li–Sr:

$$\begin{aligned} \lg \text{EC} &= 0.84\text{Na} + 0.65\text{Ca} - 3.31, \\ \lg \text{EC} &= 0.73\text{Li} + 0.77\text{Sr}. \end{aligned}$$

Для модели Li–Sr удален свободный член уравнения, имеющий уровень значимости, превышающий 0.05. Поэтому в данном случае коэффициент

Таблица 4. Результаты множественной регрессии

Table 4. Regression summary of dependent variable

Чл. ур.	Бета	SD(Бета)	b	SD(b)	t	p-value
Модель Li–Na–Ca (RMSE = 0.35 lg мкСм см ⁻¹ , R ² = 0.69)						
Intercept	–	–	–3.1	0.43	–7.2	0.007 ⁻⁸
Li, г/т	0.24	0.070	0.49	0.14	3.4	0.0009
Na, г/т	0.41	0.073	0.61	0.11	5.7	0.001 ⁻⁴
Ca, г/т	0.41	0.057	0.66	0.09	7.3	0.005 ⁻⁸
Модель Na–Ca (RMSE = 0.37 lg мкСм см ⁻¹ , R ² = 0.65)						
Intercept	–	–	–3.31	0.44	–7.5	0.002 ⁻¹¹
Na, г/т	0.57	0.06	0.84	0.09	9.5	0.004 ⁻¹³
Ca, г/т	0.41	0.06	0.65	0.09	6.9	0.003 ⁻⁷
Модель Sr–Li (RMSE = 0.39 lg мкСм см ⁻¹)						
Li, г/т	0.33	0.06	0.73	0.13	5.69	0.001 ⁻⁴
Sr, г/т	0.67	0.06	0.77	0.07	11.66	0.004 ⁻¹⁸

Примечание. Intercept – свободный член уравнения (чл. ур.) регрессии; Бета – стандартизованный коэффициент регрессии; SD – стандартная ошибка; b – коэффициент регрессии; t – статистика, оценивающая значимость коэффициентов уравнения регрессии; RMSE – среднеквадратическая ошибка регрессии; R² – коэффициент детерминации; p-value – уровень значимости.

Note. Intercept – constant in regression equation; Beta – standardized coefficient in multiple regression; SD – standard deviation; b – coefficient of regression; t – statistic evaluating significance of equation coefficients; RMSE – root-mean-square error; R² – coefficient of determination; p-value – level of significance.

детерминации не может применяться при сравнении с другими моделями. В результате анализа остатков всех трех моделей сделан вывод об их нормальном распределении и отсутствии зависимости от предсказанных значений. Установлено, что величины критерия Фишера и t-статистик для коэффициентов регрессии превышают свои табличные значения для имеющихся степеней свободы.

При сравнении количественных реконструкций электропроводности, полученных на основе диатомовой трансферной функции (для озер Сырыткуль, Уфимское и Талкас) (Maslennikova, 2020) и уравнения множественной регрессии с использованием данных геохимии донных отложений, установлена сильная корреляция между реконструированными величинами электропроводности (рис. 3). Отмечена сильная взаимосвязь между реальными и предсказанными значениями электропроводности вод независимой выборки из 13 озер (рис. 4).

Реконструкция изменений электропроводности оз. Сабакты

Установлена сильная корреляция (R = 0.9–1.0) между результатами реконструкций электропроводности по колонке донных отложений, полученными при использовании всех трех моделей (рис. 5). С помощью модели Ca–Na выявлены наиболее близкие к реальным значения электропроводности, определенные по самому верхнему об-

разцу донных отложений оз. Сабакты. Поэтому при оценке абсолютных величин электропроводности использована модель Ca–Na. Различие реальных и реконструированных величин находится в пределах среднеквадратических ошибок моделей. Классификация озер на основе электропроводности воды (Stewart, Kantrud, 1971) предполагает разделение на следующие группы: пресноводные озера (<500 мкСм/см), слегка солоноватые (500–2000 мкСм/см), среднесолоноватые (2000–5000 мкСм/см), солоноватые (5000–15 000 мкСм/см) и соленые (>15 000 мкСм/см).

Согласно реконструированным абсолютным значениям, оз. Сабакты в течение своей истории изменялось от слегка солоноватого до пресного. Электропроводность озерной воды до 11.1 тыс. к.л.н. варьировалась незначительно и составляла ≈1200 мкСм/см. После резкого снижения до средних значений 450 мкСм/см примерно 11.1 тыс. к.л.н. электропроводность вновь возросла около 9.0–8.2 тыс. к.л.н., достигнув значения 1900 мкСм/см примерно 8.7 тыс. к.л.н. (см. рис. 5). После резкого снижения электропроводности до 280 мкСм/см около 8.1–7.9 тыс. к.л.н. снова наступил период относительной стабильности со средним значением электропроводности, равным 1200 мкСм/см. Электропроводность примерно 5.1–4.7 тыс. к.л.н. вновь снизилась – до 530 мкСм/см. Последовавший затем небольшой рост сменился плавным спадом около 4.2 тыс. к.л.н. с достижением минимальных значений 140 мкСм/см

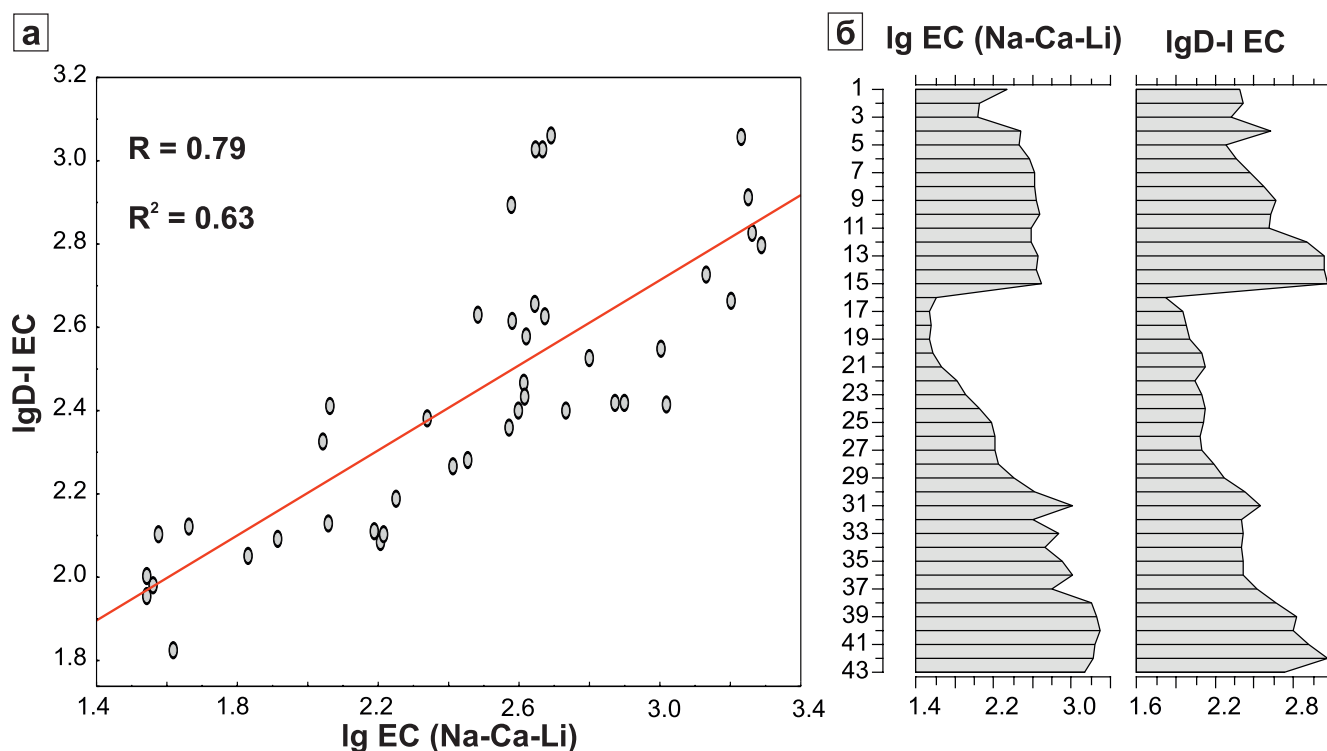


Рис. 3. Корреляция (а) и графики (б) логарифмически трансформированных значений электропроводности, реконструированных на основе данных диатомового (lgD-I EC) и геохимического lgEC (Na-Ca-Li) анализа донных отложений голоцена Урала.

По оси ординат на рис. 3б указаны порядковые номера образцов донных отложений. Зд. и далее EC – электропроводность вод.

Fig. 3. Correlation (a) and graphs (б) of logarithmically transformed values of electrical conductivity reconstructed on the basis of data from diatom (lgD-I EC) and geochemical (lgEC (Na-Ca-Li)) analysis of Holocene lake sediments of the Urals.

The ordinate axis on Fig. 3б shows the ordinal numbers of lakes sediments samples. Hereafter, the EC is the electrical conductivity of waters.

примерно 1.1–0.3 тыс. к.л.н. Затем наблюдалось постепенное возрастание электропроводности до современных значений. Однако анализ одного образца, соответствующего началу XX в., показал кратковременный спад электропроводности.

Геохимия колонки донных отложений оз. Сабакты

На основе кластерного анализа матрицы коэффициентов корреляции Пирсона выделено несколько геохимических ассоциаций, которые можно использовать для реконструкции обстановок осадконакопления. Первая ассоциация включает в себя Ti, Th, Nb, Zr, РЗЭ, Li, V и Al. Согласно предыдущим исследованиям (Масленникова и др., 2016), данные элементы коррелируют с содержанием аллотигенных минералов (кварц, полевые шпаты, биотит, мусковит), связанных с терригенным сносом. Содержания Ti, Zr, и некоторых РЗЭ

могут быть завышены при ЛА-ИСП-МС анализе (Maslennikova et al., 2020). На концентрацию других элементов данной ассоциации в различные периоды развития озер существенное влияние могли оказывать другие факторы. Так, например, содержание Li в донных отложениях озер Среднего и Южного Урала имеет сильную связь с минерализацией и электропроводностью воды. Поэтому для оценки средней доли терригенной компоненты использованы только содержания Th, Nb и La. За основу взят способ расчета, примененный для водоемов Сибири (Леонова, Бобров, 2012). Вторая ассоциация, включающая в себя Ca, Sr и Mn, связана с интенсивностью карбонатакопления в донных отложениях (Масленникова и др., 2014, 2016). Третья ассоциация объединяет некоторые халькофильные элементы (Pb, Sn, Sb, Cu и Zn). В доиндустриальном периоде эти химические элементы коррелируют с терригенной ассоциацией. В индустриальном периоде содержание халькофильных

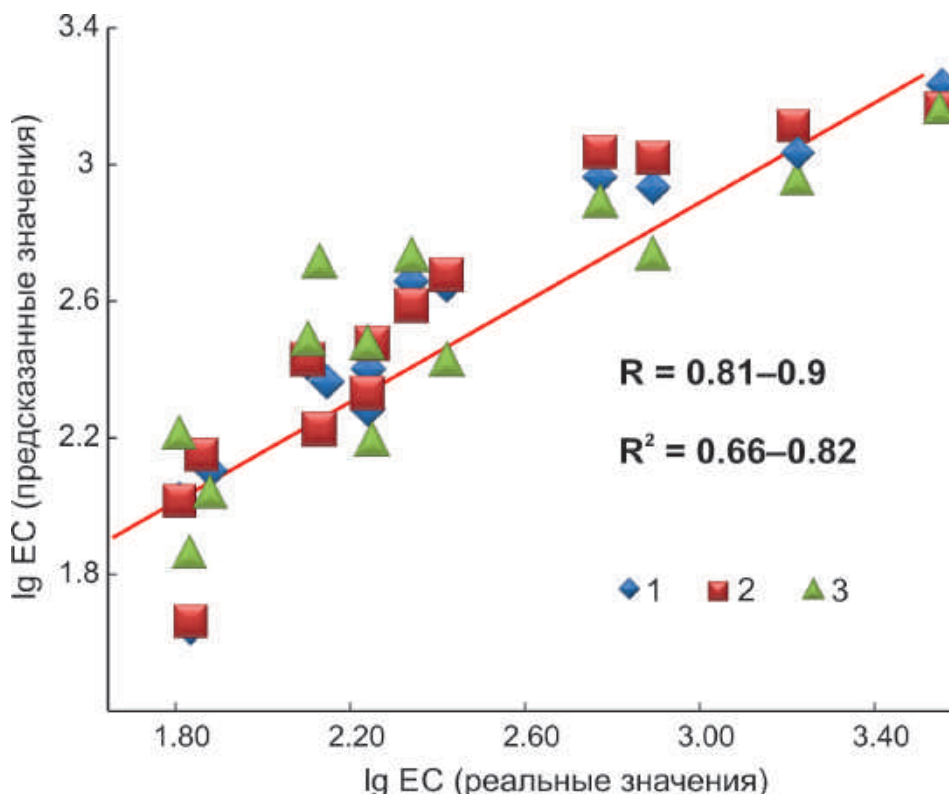


Рис. 4. Диаграмма рассеяния, показывающая корреляцию между реальными и предсказанными тремя моделями значениями электропроводности озер Урала из независимой выборки, состоящей из 13 озер.

1 – EC (Na-Ca-Li), 2 – EC (Ca-Na), 3 – EC (Li-Sr).

Fig. 4. A scatterplot showing the correlation between the real and predicted values of the electrical conductivity of the Ural lakes from an independent statistical sample consisting of 13 lakes.

1 – EC (Na-Ca-Li), 2 – EC (Ca-Na), 3 – EC (Li-Sr).

элементов резко возрастает (особенно Pb). Концентрации Cu и Zn в индустриальном периоде повышаются гораздо меньше.

Содержания остальных химических элементов в донных отложениях (например, U, Mo, Se, As и Bi) связаны с большим количеством факторов, и их интерпретация в каждом случае требует отдельного исследования (Масленников и др., 2016; Масленникова и др., 2020). Поэтому для реконструкции обстановок осадконакопления голоцена по колонке донных отложений оз. Сабакты использованы только три первых ассоциации химических элементов.

На основе стратиграфически ограниченного кластерного анализа геохимических данных выделены зоны, которые в целом совпадали с границами литологических единиц колонки донных отложений (см. табл. 1, рис. 5). Однако некоторые литологические единицы вмещают несколько геохимических зон.

Серовато-сизая глина, накопленная более 12 тыс. к.л.н., характеризуется максимальной концентрацией Th, PЗЭ, Ti, Al, Li и минимальным содержа-

нием органического вещества (см. рис. 5, 6). Следующий за глиной щебнистый горизонт отличается уменьшением содержания этих элементов и возрастанием концентрации Na, Zr, V, Ca и Sr.

Глинистый сапропель конца позднеледниковья (12.0–11.5 тыс. к.л.н.) имеет повышенные содержания Ca, Sr, Mn и органического вещества и пониженные концентрации Na и Cl.

В серо-оливковом сапропеле (11.5–10.9 тыс. к.л.н.) содержание химических элементов терригенной ассоциации снижается, а процент органического вещества возрастает.

Для буровато-оливкового сапропеля с редкими макроостатками (10.9–7.0 тыс. к.л.н.) отмечается снижение содержаний Ca, Sr и Mn, за исключением интервалов 9.0–8.2 и 7.5–7.0 тыс. к.л.н. Для них выявлено уменьшение концентраций Th, PЗЭ, Ti, Al и Li. Содержание органического вещества продолжает увеличиваться.

Светло-буро-оливковый слоистый сапропель (7.0–6.0 тыс. к.л.н.) имеет максимумы Ca, Sr и Mn. Содержание элементов, связанных с терригенным

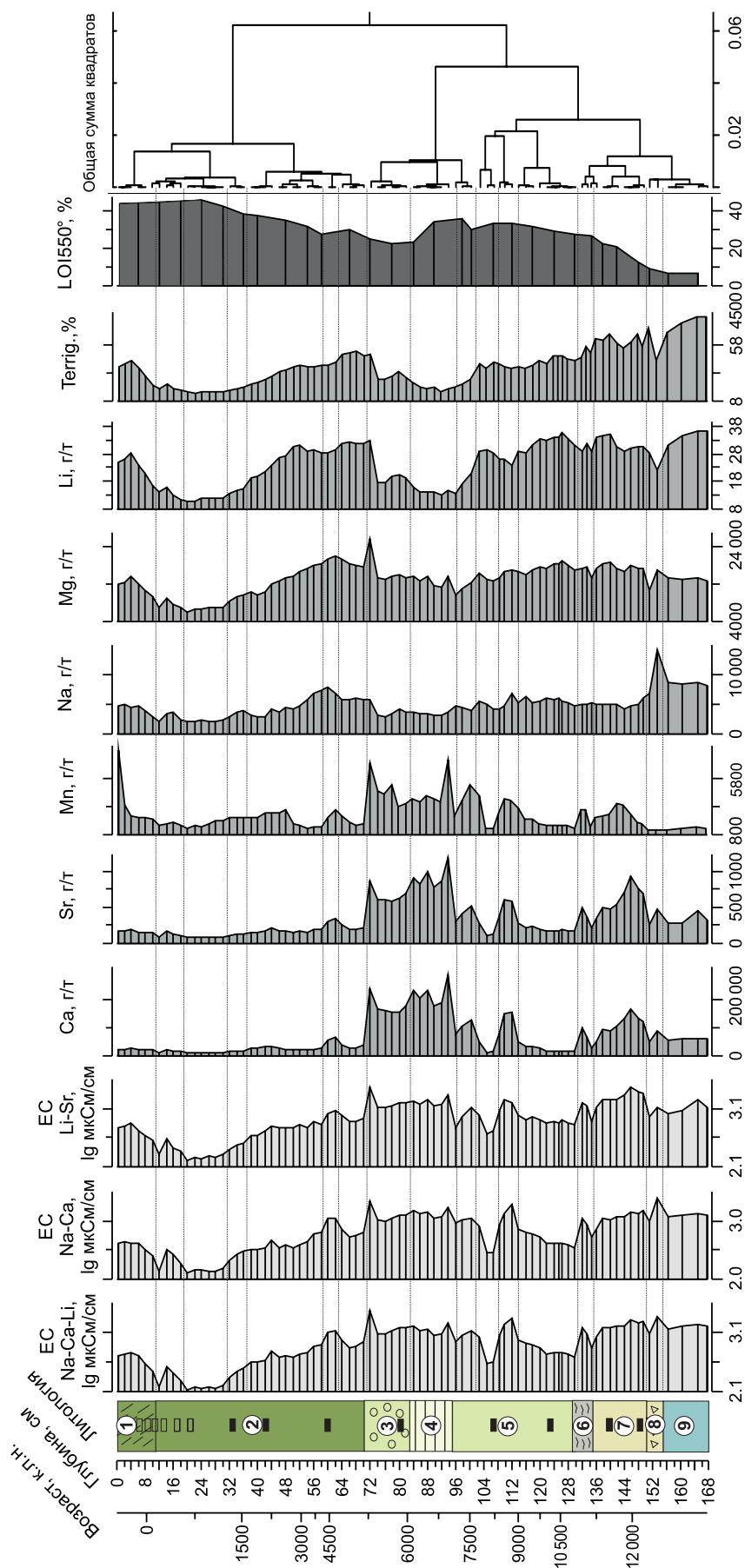


Рис. 5. Графики изменения электропроводности оз. Сабакты, концентраций химических элементов, доли терригенной компоненты (Terrig), органического вещества (LOI550°) в донных отложениях и дендрограмма кластерного анализа.

Описание литологии колонки донных отложений приведено в табл. 1. Черные прямоугольники – места отбора проб на радиоуглеродное датирование (см. табл. 2), пустые прямоугольники – места отбора проб на датирование путем анализа активности ^{210}Pb (см. табл. 3).

Fig. 5. Graphs of changes in the electrical conductivity of Lake Sabakty, the contents of chemical elements, the proportion of the terrigenous component, organic matter content (LOI550°) in lake sediments and a dendrogram of cluster analysis.

The lithology of the sediment core is described in Table 1. Black rectangles are the sampling sites for AMS14C-radiocarbon dating (see Table 2), empty rectangles – sampling sites for dating by analyzing the activity of ^{210}Pb (see Table 3).

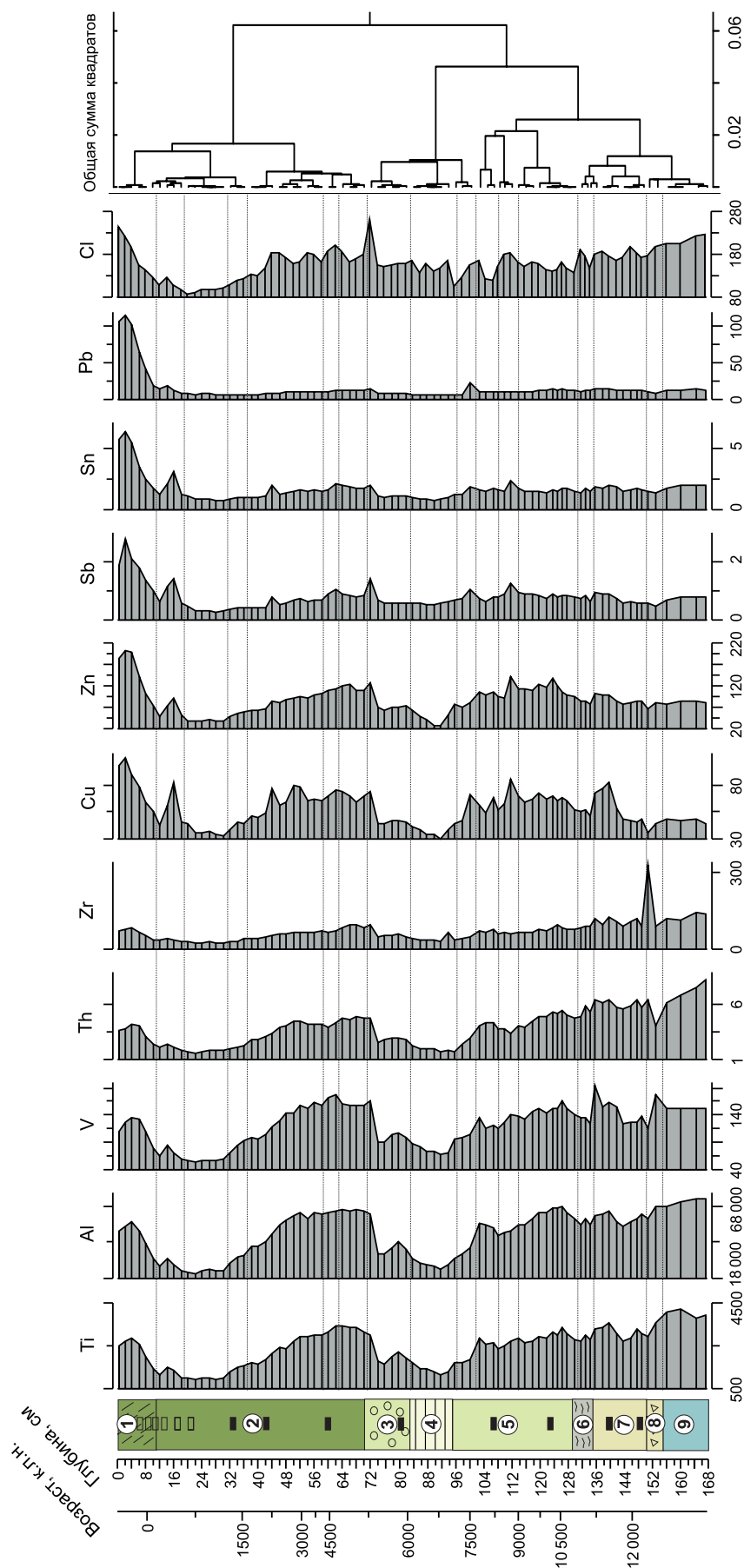


Рис. 6. Графики концентраций (г/г) элементов примесей в донных отложениях в оз. Сабакты и дендрограмма кластерного анализа.
Условные обозначения – см. рис. 5.

Fig. 6. Graphs of trace elements contents in the Lake sabakty sediments and dendrogram of cluster analysis.
Explanations – see Fig. 5.

сносом, сокращается, однако доля органического вещества продолжает расти.

Буровато-оливковый сапропель с остатками гидрорифтов и остракодами, накопленный 6.0–5.1 тыс. к.л.н., отличается снижением содержания органического вещества, Ca, Sr и возрастанием роли Th, PЗЭ, Ti, Al и Li.

Буровато-оливковый однородный сапропель (5.1–0.3 тыс. к.л.н.) характеризуется увеличением содержания органического вещества и значительным снижением концентрации Ca и Sr. По концентрациям элементов терригенного сноса данный горизонт неоднороден: для интервала 5.1–2.2 тыс. к.л.н. свойственны повышенные концентрации Th, PЗЭ, Ti, Al и Li, а в интервале 1.1–0.3 тыс. к.л.н. содержания этих элементов достигают минимальных значений.

Неконсолидированный неоднородный буровато-оливковый сапропель, накопленный с 0.3 тыс. к.л.н. до 2017 г., характеризуется постепенным возрастанием содержания Th, PЗЭ, Ti, Al и Li. В донных отложениях, накопленных с середины XX в., значительно увеличиваются концентрации Cu, Zn, Pb, Bi, Sn и Sb. В донных отложениях конца XX в. их содержания достигают максимума.

ДИСКУССИЯ

Модели множественной линейной регрессии и надежность реконструкций электропроводности озерных вод

Полученные взаимосвязи содержаний Ca, Na, Mg, Li, K, Sr в донных отложениях с электропроводностью озерных вод объясняются не только накоплением этих элементов при повышении электропроводности озер, но и влиянием особенностей водосбора, связанных с составом его пород и типом ландшафта (Перельман, 1975).

Среднеквадратическая ошибка, оценивающая точность прогнозирования, для наших геохимических моделей ($RMSE = 0.35–0.39 \lg \text{мкСм/см}$) была выше, чем для диатомовой трансферной функции ($RMS = 0.18 \lg \text{мкСм/см}$) (Maslennikova, 2020). При включении в геохимическую модель только тех озер, которые были использованы при получении диатомовой трансферной функции, градиент электропроводности уменьшался, поэтому снижалась и среднеквадратическая ошибка, которая все равно оставалась относительно высокой ($RMSE = 0.27 \lg \text{мкСм/см}$). Коэффициент детерминации, оценивающий корреляцию предсказанных и реальных значений электропроводности, у геохимической модели был ниже ($R^2 = 0.65–0.69$), чем у диатомовой ($R^2 = 0.86$). Относительно высокая ошибка и более низкий коэффициент детерминации, вероятно, связаны с разнообразием пород водосборов озер Южного и Среднего Урала. Состав пород влияет

на соотношение Li, Ca, Na и Sr в донных отложениях озер, входящих в выборку, что может противоречить предложенным в моделях коэффициентам. Для получения наиболее адекватных результатов рекомендуется использовать несколько геохимических моделей для поверхностных озерных отложений, накопленных за последние несколько лет. Для реконструкций предлагается применять модель, предсказавшую значение электропроводности, наиболее близкое к реальному.

Несмотря на большую ошибку и меньшую корреляцию предсказанных и реальных значений у геохимической модели в сравнении с диатомовой трансферной функцией, возможность получения количественных данных об электропроводности озер по “немым”, не содержащим диатомовые водоросли и другие микрофоссилии, слоям донных отложений является преимуществом реконструкций именно на основе геохимических данных. Использование разных методов количественных реконструкций позволит избежать ошибок определения электропроводности, связанных с большим количеством факторов, влияющих как на диатомовые водоросли и другие группы микрофоссилий, так и на содержание химических элементов в донных отложениях.

Реконструкции обстановок осадконакопления в оз. Сабакты

Хронологические рамки периодов голоцена приведены по (Walker et al., 2012).

Позднеледниковье (>12 тыс. к.л.н.).

Слабосолоноватый водоем в условиях холодного сухого климата

Согласно данным геохимического анализа и количественных реконструкций, более 12 тыс. к.л.н. озеро представляло собой слабосолоноватый водоем с повышенным содержанием катионов натрия и анионов хлора, что указывает на более сухой, чем в настоящее время, климат. Преобладание терригенной компоненты при пониженном содержании органического вещества свидетельствует о низкой продуктивности озерной экосистемы, что, вероятно, было связано с холодными климатическими условиями. Около 12.0–12.1 тыс. к.л.н. произошло событие, вызвавшее эрозию берегов и поступление грубообломочных осадков в озеро. Накопление серых, сизовато-серых сильно глинистых или глинисто-песчаных отложений в это время характерно и для озер лесной зоны Южного и Среднего Урала (Maslennikova, Udachin, 2017; Maslennikova, 2022). Кроме того, глинистые отложения с низким содержанием органического вещества формировались в условиях холодного арктического климата в озерах Европейской части России (Субетто, 2009).

*Переход от позднеледникового к голоцену
(12–11.6 тыс. к.л.н.). Увеличение продуктивности
слабосоленоватого озера в условиях потепления
климата*

Озеро осталось слабосоленоватым, однако возрастает содержание органического вещества и карбонатов в донных отложениях, что может быть связано с увеличением продуктивности озера с последующим повышением значений pH и осаждением карбонатов, а затем накоплением неуспешной разложившейся органики. Подобные изменения могли произойти в результате потепления климата. Донные отложения изученных озер лесной зоны Южного и Среднего Урала, накопленные в этот период, очень разнообразны. Однако для всех характерен рост количества органического вещества и концентрации диатомовых створок в донных отложениях, что, наряду с изменениями в составе диатомовых комплексов, увеличением роли пыльцы древесных растений в спорово-пыльцевых спектрах, также свидетельствует о потеплении климата (Масленникова и др., 2016; Maslennikova et al., 2016).

*Ранний голоцен (11.6–8.2 тыс. к.л.н.).
Колебания электропроводности вод озера на фоне
изменений увлажнения и кратких похолоданий
на фоне общего тренда потепления климата*

В начале голоцена (11.6–11.1 тыс. к.л.н.) электропроводность вод озера колеблется, что указывает на вариации коэффициента увлажнения территории. Снижение терригенного сноса, накопление органического вещества могут объясняться возрастанием продуктивности водоема и (или) формированием почв на водосборе, связанным с продолжающимся потеплением климата. Около 11.3–11.2 тыс. к.л.н. отмечается пик электропроводности. Примерно 11.1–9.8 тыс. к.л.н. озеро становится пресным, что может быть связано как с похолоданием, так и с увеличением количества осадков. Эти изменения могли быть вызваны глобальными климатическими осцилляциями, отраженными в ледовых кервах Гренландии, – резким климатическим потеплением с последующим похолоданием, называемым пребореальной осцилляцией (Björck et al., 1996; Rasmussen et al., 2014). На Южном и Среднем Урале, согласно летописям донных отложений озер, отмечается синхронное снижение роли лиственных лесов и распространение березовых и сосновых лесов (Масленникова и др., 2014; Maslennikova et al., 2016). Согласно данным исследования торфяных отложений Среднего Урала, прохладный аридный климат начала пребореала сменяется на прохладный и более влажный климат второй половины пребореала (Зарецкая и др., 2014; Panova, Antipina, 2016).

В бореальном периоде (около 9.8 тыс. к.л.н.) электропроводность оз. Сабакты вновь возрастает, а с начала атлантического периода (примерно 9.0 тыс. к.л.н.) начинается новый период карбонатонакопления, который прерывается в период 8.1–7.9 тыс. к.л.н. Данные изменения могут отражать как тренд потепления климата в бореальном периоде и небольшую аридизацию в начале атлантического периода, зафиксированные в торфяных отложениях Среднего Урала (Зарецкая и др., 2014; Panova, Antipina, 2016), так и сухое похолодание, выявленное с помощью палинологического и диатомового анализа 10.3–8.3 тыс. к.л.н. для оз. Таватуй (Maslennikova, 2022). Для более точных реконструкций требуются дополнительные исследования с применением палинологического и диатомового анализа.

*Средний голоцен (8.2–4.2 тыс. к.л.н.). Колебания
электропроводности вод и продуктивности
озера на фоне вариаций увлажнения, чередования
потеплений и похолоданий климата*

Резкое снижение электропроводности 8.2–7.7 тыс. к.л.н. (с минимальными значениями 8.1–7.9 тыс. к.л.н.), отмечалось также и в других озерах Урала (рис. 7). Событие, произошедшее 8.2 тыс. к.л.н. и отмеченное на изотопных кривых гренландских ледовых кернов как эпизод похолодания, находит отражение в многочисленных палеолетописях озерных, морских отложений, пещерных спелеотем как северного, так и южного полушария (Walker et al., 2012). Данное событие знаменовало начало периода гумидизации и потепления климата, реконструированного на основе палинологических данных Южного и Среднего Урала (Panova, Antipina, 2016; Maslennikova et al., 2016; Maslennikova, 2022). Однако после резкого уменьшения электропроводности в оз. Сабакты (8.1–7.9 тыс. к.л.н.) происходит ее постепенный подъем. Водоем вновь становится слегка солоноватым.

Накопление слоистого сапропеля 7.9–6.0 тыс. к.л.н. с высоким содержанием органического вещества, карбонатов и низкой концентрацией элементов терригенного сноса свидетельствует о повышении продуктивности озера, вероятно, в ответ на потепление климата. Смена слоистого сапропеля на сапропель с остатками гидрофитов и остракодами 6.0–5.1 тыс. к.л.н. может указывать на снижение уровня водоема. Отсутствие возрастания электропроводности 6.0–5.1 тыс. к.л.н. может объясняться похолоданием климата, которое подтверждается и снижением содержания органического вещества в донных отложениях. Согласно данным по торфяным и озерным отложениям Среднего Урала, на рубеже атлантического и суббореального периодов произошло изменение климата в сторону похолодания и сухости (Зарецкая и др., 2014; Panova, Antipina, 2016; Maslennikova, 2022). Исследования

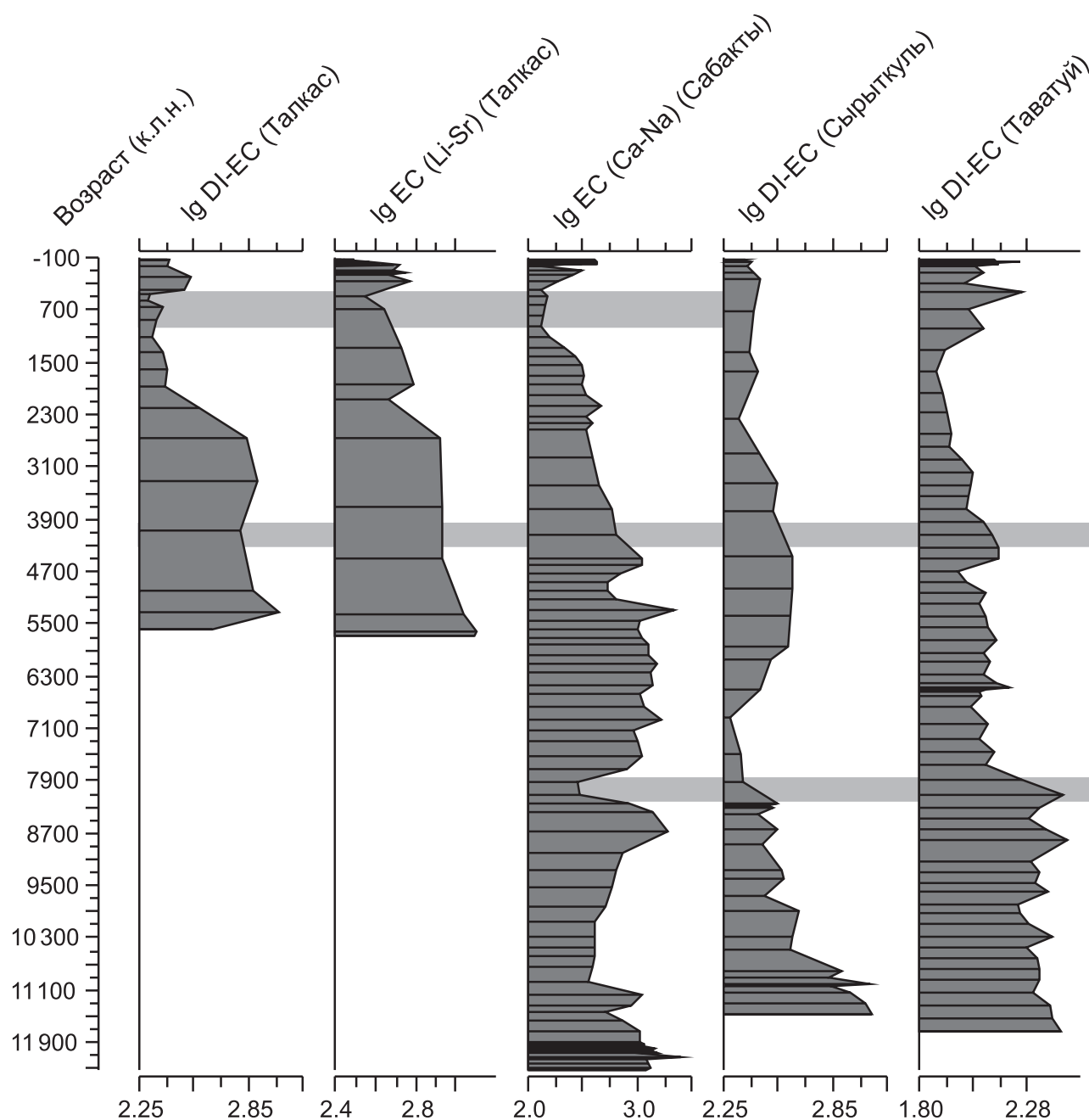


Рис. 7. Сравнение количественных реконструкций электропроводности озер Южного и Среднего Урала.

Данные по оз. Талкас и оз. Сырыткуль приведены по (Maslennikova, 2020), реконструкция электропроводности оз. Таватуй – по (Maslennikova, 2022).

Fig. 7. Comparison between quantitative reconstruction of electrical conductivity of the Southern and Middle Urals.

The lakes Talkas and Syrytkul EC reconstructions are published in (Maslennikova, 2020), reconstruction of Lake Tavatui EC is published in (Maslennikova, 2022).

Южного Урала показали, что 6.5–5.5 тыс. к.л.н. началось возрастание электропроводности озер (см. рис. 7), а около 5.5 тыс. к.л.н. происходит спад содержания пылицы ели (Maslennikova, 2020), что

может указывать на уменьшение коэффициента увлажнения территории. Исследования палеопочв Предуралья также показывают аридизацию климата в это время (Khokhlova et al., 2018).

Колебания электропроводности и терригенного сноса в оз. Сабакты 5.1–4.6, 4.6–4.2 тыс. к.л.н. свидетельствуют о повышении и понижении глубины озера. На основе летописи донных отложений оз. Таватуй (Средний Урал) около 5.0–4.7 тыс. к.л.н. выявлено похолодание климата, а 4.6–3.7 тыс. к.л.н. – аридизация и потепление климата (см. рис. 7). Изменение электропроводности оз. Сырыткуль (Южный Урал) не отражает этих закономерностей в связи с меньшим разрешением палеолетописи в этот период (см. рис. 7).

*Поздний голоцен (4.2 тыс. к.л.н. – настоящее время).
Опреснение озера на фоне гумидизации климата*

Поздний голоцен начинается с постепенного снижения электропроводности на фоне возрастания содержания органического вещества и снижения содержания терригенной компоненты. Данные изменения могли быть связаны с гумидизацией климата. Понижение электропроводности в это время характерно для озер Среднего и Южного Урала (см. рис. 7). Для оз. Талкас после снижения электропроводности отмечается ее небольшое возрастание с последующим выраженным трендом снижения 2.2–0.4 тыс. к.л.н. (Maslennikova, 2020).

Возрастание электропроводности воды и доли терригенной компоненты в озере 0.3 тыс. к.л.н. отражает снижение уровня водоема. Для оз. Талкас также отмечается увеличение электропроводности, определенной с помощью диатомовой трансферной функции, в период 0.4–0.2 тыс. к.л.н. (Maslennikova, 2020). Данные изменения могут быть связаны с Малым ледниковым периодом. Согласно геотермальным данным, поверхностные средние температуры на Урале в это время были на 1.2–3 °C ниже, чем в настоящее время (Demezhko and Golovanova, 2007). Однако повышение электропроводности озер могло быть связано с летними засухами, которые отмечались, согласно историческим данным, в течение Малого ледникового периода, особенно в юго-западной Сибири (Жилина, 2012). Возрастание реконструированной электропроводности в XX в. могло быть связано с увеличением содержания Li и Na в донных отложениях, которое, вероятнее всего, объясняется увеличением терригенного сноса в результате усиления антропогенной деятельности, связанной с основанием с. Кусимовский рудник на берегу озера. Для подтверждения возрастания электропроводности в это время необходимо проведение реконструкций с помощью микропалеонтологического анализа. Накопление халькофильных элементов техногенной ассоциации в донных отложениях второй половины XX в., вероятно, связано с усилением индустриальной активности на Южном Урале.

ВЫВОДЫ

Несмотря на то что модели, полученные с помощью анализа диатомовых комплексов, характеризуются меньшей среднеквадратической ошибкой, предложенные уравнения множественной регрессии, основанные на результатах геохимического анализа, дают возможность более быстрого и простого получения количественных реконструкций электропроводности озерных вод. Более того, количественные реконструкции, основанные на геохимических данных, можно использовать в случае отсутствия диатомовых водорослей в донных отложениях, что особенно актуально для озерных отложений позднеледниковья – начала голоцена. Наложение количественных реконструкций, полученных разными методами, увеличивает комплексность и надежность палеолимнологического исследования.

Геохимическая летопись оз. Сабакты характеризуется большей дифференцированностью и информативностью в сравнении с летописями лесных озер Южного Урала (Maslennikova, Udachin, 2017). В ней отражены глобальные климатические осцилляции: переход от позднеледниковья к голоцену (11.6 тыс. к.л.н.), события 11.2, 8.2, 4.2 тыс. к.л.н., а также события регионального масштаба 12–12.1, 9.8, 9.0, 8.7, 5.1–4.6, 4.6–4.2, 1.1–0.3 тыс. к.л.н.

Согласно реконструкциям электропроводности по полученной модели множественной регрессии, в течение своей истории оз. Сабакты становилось то пресным, то слабосоленоватым в ответ на глобальные и региональные климатические события. Несмотря на существенные различия в вариациях электропроводности озер Южного и Среднего Урала в голоцене, отмечено почти одновременное снижение электропроводности озерных вод около 7.9 и 4.2 тыс. к.л.н.

Благодарности

Авторы выражают благодарность М.Н. Маляренко, Г.Ф. Лонцаковой, Л.Г. Удачиной, Л.Б. Лапшиной, Н.В. Шаршуевой, П.А. Карионовой за помощь в анализе донных отложений и вод исследованных озер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева М.А. (1973) Озера Среднего и Южного Урала. Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 272 с.
Давыдова Н.Н. (1978) Диатомовые водоросли в отложениях озер. *Ландшафтный фактор в формировании гидрологии озер Южного Урала*. Л., 228–237.
Жилина Т.Н. (2012) Природно-климатические условия 1550–1850 гг. как фактор риска развития сельского хозяйства в Западной Сибири. *Вестн. Томского гос. ун-та*, **354**, 77–80.
Зарецкая Н.Е., Панова Н.К., Жилин М.Г., Антипина Т.Г., Успенская О.Н., Савченко С.Н. (2014) Геохроноло-

- гия, стратиграфия и история развития торфяных болот Среднего Урала в голоцене (на примере Шигирского и Горбуновского торфяников). *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **22**(6), 84-108. <https://doi.org/10.1134/S0869593814060082>
- Князев Ю.Г., Князева О.Ю., Сначев В.И., Жданов А.В. (2013) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1 000 000 (третье поколение). Сер. Уральская. Лист N40 – Уфа. Объяснит. записка. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 512 с.
- Леонова Г.А., Бобров В.А. (2012) Геохимическая роль планктона континентальных водоемов Сибири в концентрировании и биоседиментации микроэлементов. Новосибирск: Академическое изд-во “ГЕО”, 314 с.
- Масленников В.В., Мелекесцева И.Ю., Масленникова А.В., Третьяков Г.А., Масленникова С.П., Аюпова Н.Р., Сафина Н.П., Филиппова К.А., Удачин В.Н., Целуйко А.С., Аминов П.Г. (2016) Дифференциация токсичных элементов в условиях литогенеза и техногенеза колчеданных месторождений. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 300 с.
- Масленникова А.В., Удачин В.Н., Анфилов В.Н. (2020) Обстановки накопления аномальных концентраций урана в донных отложениях голоцена озера Сырыткуль (Южный Урал). *Докл. РАН. Науки о земле*, **492**(1), 43-47. <https://doi.org/10.31857/S2686739720050138>
- Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В. (2014) Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 136 с.
- Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В., Штенберг М.В. (2018) Реконструкция этапов развития озера Турояк (Южный Урал) в голоцене. *Литосфера*, **18**(6), 914-927. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927>
- Масленникова А.В., Удачин В.Н., Пирогов Д.В., Хворов П.В. (2016) Реконструкция обстановок озерного седиментогенеза в позднеледниковье и голоцене Среднего Урала. *Литосфера*, (6), 166-176.
- Маслов А.В. (2005) Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. Учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 289 с.
- Панова Н.К. (1982) История горных лесов центральной части Южного Урала в голоцене. *Лесоведение*, (1), 26-34.
- Перельман А.И. (1975) Геохимия ландшафта. М.: Высш. школа, 342 с.
- Субетто Д.А. (2009) Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ, 344 с.
- Унифицированные методы анализа силикатных горных пород с применением комплексонометрии. Инструкция № 163-Х. (1979) М: Мин-во геол. СССР, 43 с.
- Хомутова В.И. (1995) Южный Урал. Озеро Увильды. *История озер Севера Азии*. Л.: Наука, 22-40.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2000) Основы литохимии. СПб.: Наука, 480 с.
- Appleby P.G., Oldfield F. (1978) The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of the unsupported lead-210 to the sediment. *Catena*, **5**, 1-8. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(78\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(78)80002-2)
- Björck S., Kromer B., Johnsen S., Hummer S.U., Bennike O., Hammarlund D., Lemdahl G., Wohlfarth B., Possnert G., Spurk M. (1996) Synchronised terrestrial-atmospheric deglacial records around the North Atlantic. *Science*, **274**, 1155-1160. <https://doi.org/10.1126/science.274.5290.1155>
- Blaauw M., Christen A.J. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, **6**(3), 457-474. <https://doi.org/10.1214/11-BA618>
- Demezhko D.Y., Golovanova I.V. (2007) Climatic changes in the Urals over the past millennium – an analysis of geo-thermal and meteorological data. *Clim. Past*, **3**, 237-242. <https://doi.org/10.5194/cp-3-237-2007>
- Fritz S.C. (2013) Salinity and Climate Reconstructions from Continental Lakes. *Encyclopedia of Quaternary Science*. USA: Elsevier, 507-515. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00221-1>
- Grimm E.C. (1991) Tilia 1.12, Tilia Graph 1.18. Illinois State Museum. Research and Collection Center, Springfield.
- Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.*, (25), 101-110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Ivanov I.V., Prikhodko V.E., Zamotaev I.V., Manakhov D.V., Novenko E.Yu., Kalinin P.I., Markova L.M., Plaksina A.L. (2019) Synlithogenic Evolution of Floodplain Soils in Valleys of Small Rivers in the Trans-Ural Steppe. *Euras. Soil Sci.*, **52**(6), 593-609. [doi:10.1134/S1064229319060061](https://doi.org/10.1134/S1064229319060061)
- Juggins S. (2007) C2 Version 1.5 User guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation. Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK.
- Khokhlova O.S., Morgunova N.L., Khokhlov A.A., Gol'eva A.A. (2018) Climate and Vegetation Changes over the Past 7000 Years in the Cis-Ural Steppe. *Euras. Soil Sci.*, **51**, 506-517. [doi:10.1134/S106422931805006X](https://doi.org/10.1134/S106422931805006X)
- Kuzina D.M., Yusupova A.R., Nourgalieva N.G., Rogov A.M. Mineral composition of Sabacty lake sediments. (2022) *X International Siberian Early Career GeoScientists Conference. Proceedings of the Conference*. Novosibirsk: Novosibirsk State University, 23-24.
- Lapteva E.G., Korona O.M. (2012) Holocene vegetation changes and anthropogenic influence in the forest-steppe zone of the Southern Trans-Urals based on pollen and plant macrofossil records from the Sukharysh cave. *Veget. Hist. Archaeobot.*, **21**, 321-336. [doi:10.1007/s00334-011-0333-z](https://doi.org/10.1007/s00334-011-0333-z)
- Liu H., Xu B., Cui H. (2002) Holocene history of desertification along the woodland-steppe border in northern China. *Quat. Res.*, **57**(2), 259-270. <https://doi.org/10.1006/qres.2001.2310>
- Liu Y.J., Cao L.M. (1984) Element Geochemistry. Beijing: Science Press, p. 72-110
- Maslennikova A.V. (2020) Development and application of an electrical conductivity transfer function, using diatoms from lakes in the Urals, Russia. *J. Paleolimnol.*, **63**(2), 129-146. <https://doi.org/10.1007/s10933-019-00106-z>
- Maslennikova A.V. (2022) Holocene environments in the Middle Urals: Paleolimnological proxies from the Lake Tavatui (Russia). *Quat. Int.*, **622**, 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.02.033>
- Maslennikova A.V., Artemyev D.A., Shtenberg M.V., Filipova K.A., Udachin V.N. (2020) Express multi-element

- determination in lake sediments by laser ablation mass-spectrometry (LA-ICP-MS). *Limnol. Oceanogr.: Methods*, **18**(8), 411-423. <https://doi.org/10.1002/lom3.10372>
- Maslennikova A.V., Udachin V.N. (2017) Lakes ecosystem response to Holocene climate changes and human impact in the Southern Urals: Diatom and geochemical proxies. *Holocene*, **27**(6), 847-859. <https://doi.org/10.1177/0959683616675942>
- Maslennikova A.V., Udachin V.N., Aminov P.G. (2016) Lateglacial and Holocene environmental changes in the Southern Urals reflected in palynological, diatom, geochemical records from the Lake Syrytkul sediments. *Quat. Int.*, **420**(28), 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.08.062>
- Panova N.K., Antipina T.G. (2016) Late Glacial and Holocene environmental history on the eastern slope of the Middle Ural mountains, Russia. *Quat. Int.*, **420**, 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.035>
- Prikhod'ko E.V., Ivanov I.V., Manakhov D.V., Gerasimenko N.P., Inubushi K., Kawahigashi M., Nagano Kh., Sugihara S. (2013) Soils, vegetation, and climate of the Southern Transural region in the Middle Bronze Age (be the example of the Arkaim fortress). *Euras. Soil Sci.*, **46**, 925-934. doi:10.1134/S1064229313090032
- Rasmussen S.O., Bigler M., Blockley S.P. et al. (2014) A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quat. Sci. Rev.*, **106**, 14-28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.007>
- Reimer P., Austin W., Bard E., Bayliss A., Blackwell P., Bronk Ramsey C., Talamo S. (2020) The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, **62**(4), 725-757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Stewart R.E., Kantrud H.A. (1971) Classification of natural ponds and lakes in the Glaciated Prairie Region. Resource Publication 92, Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, DC
- Stobbe A., Gumnior M., Rühl L., Schneider H. (2016) Bronze Age human-landscape interactions in the southern Transural steppe, Russia – Evidence from high-resolution palaeobotanical studies. *The Holocene*, **26**, 1692-1710. <https://doi.org/10.1177/0959683616641740>
- Sun Q., Wang S., Zhou J., Chen Z., Shen J., Xiuping X., Wu F., Chen P. (2010) Sediment geochemistry of Lake Daihai, north-central China: implications for catchment weathering and climate change during the Holocene. *J. Paleolimnol.*, (43), 75-87. <https://doi.org/10.1007/s10933-009-9315-x>
- Walker M.J.C., Berkelhammer M., Björck S. et al. (2012) Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *J. Quat. Sci.*, **27**(7), 649-659.
- Yusupova A.R., Nourgalieva N.G., Kuzina D.M. (2022) A Holocene climatic record indicated by geochemical indicators and granulometry from Bannoe Lake in the Southern Urals. *X International Siberian Early Career GeoScientists Conference. Proceedings of the Conference*. Novosibirsk: Novosibirsk State University, 128-129.
- Zeeb B.A., Smol J.P. (1995) A weighted-averaging regression and calibration model for inferring lakewater salinity using chrysophycean stomatocysts from lakes in western Canada. *Int. J. Salt Lake Res.*, **4**, 1-23. <https://doi.org/10.1007/BF01992411>
- Zhang E., Jones R.T., Bedford A.P., Langdon P.G., Tang H. (2007) A chironomid-based salinity inference model from lakes on the Tibetan Plateau. *J. Paleolimnol.*, **38**, 477-491. <https://doi.org/10.1007/S10933-006-9080-Z>
- Zou C., Mao L., Tan Z., Zhou L., Liu L. (2021) Geochemistry of major and trace elements in sediments from the Lubei Plain, China: Constraints for paleoclimate, paleosalinity, and paleoredox environment. *J. Asian Earth Sci.*, **X**, (6), 100071. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2021.100071>

REFERENCES

- Andreeva M.A. (1973) Middle and Southern Urals lakes. Chelyabinsk, Southern Urals books press, 272 p. (In Russ.)
- Appleby P.G., Oldfield F. (1978) The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of the unsupported lead-210 to the sediment. *Catena*, **5**, 1-8. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(78\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(78)80002-2)
- Björck S., Kromer B., Johnsen S., Hummer S.U., Bennike O., Hammarlund D., Lemdahl G., Wohlfarth B., Possnert G., Spurk M. (1996) Synchronised terrestrial-atmospheric deglacial records around the North Atlantic. *Science*, **274**, 1155-1160. <https://doi.org/10.1126/science.274.5290.1155>
- Blaauw M., Christen A.J. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, **6**(3), 457-474. <https://doi.org/10.1214/11-BA618>
- Davydova N.N. (1978) Diatom algae in the lake sediments. *Landscape factor in the formation of the hydrology of the lakes of the Southern Urals*. St.Petersburg, Nauka Publ., 228-239. (In Russ.)
- Demezhko D.Y., Golovanova I.V. (2007) Climatic changes in the Urals over the past millennium – an analysis of geothermal and meteorological data. *Clim. Past*, **3**, 237-242. <https://doi.org/10.5194/cp-3-237-2007>
- Fritz S.C. (2013) Salinity and Climate Reconstructions from Continental Lakes. *Encyclopedia of Quaternary Science*. USA: Elsevier, 507-515. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00221-1>
- Grimm E.C. (1991) Tilia 1.12, Tilia Graph 1.18. Illinois State Museum. Research and Collection Center, Springfield.
- Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.*, (25), 101-110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Ivanov I.V., Prikhodko V.E., Zamotaev I.V., Manakhov D.V., Novenko E.Yu., Kalinin P.I., Markova L.M., Plaksina A.L. (2019) Synlithogenic Evolution of Floodplain Soils in Valleys of Small Rivers in the Trans-Ural Steppe. *Euras. Soil Sci.*, **52**(6), 593-609. doi:10.1134/S1064229319060061
- Juggins S. (2007) C2 Version 1.5 User guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation. Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK.
- Khokhlova O.S., Morgunova N.L., Khokhlov A.A., Gol'eva A.A. (2018) Climate and Vegetation Changes over the Past 7000 Years in the Cis-Ural Steppe. *Euras. Soil Sci.*, **51**, 506-517. doi:10.1134/S106422931805006X

- Khomutova V.I., Andreeva M.A., Davydova N.N., Neustroeva I.U., Radaeva V.U., Subetto D.A. (1995) Southern Urals. Lake Uvil'dy. *History of the lakes of North Asia*. St.Petersburg, Nauka Publ., 22-40. (In Russ.)
- Knyazev Ju.G., Knyazeva O.Ju., Snachev V.I., Zhdanov A.V. (2013) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). The Ural series. Sheet N40 – Ufa. Explanatory note. St.Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI Publ., 512 p. (In Russ.)
- Kuzina D.M., Yusupova A.R., Nourgalieva N.G., Rogov A.M. Mineral composition of Sabacty lake sediments. (2022) *X International Siberian Early Career GeoScientists Conference. Proceedings of the Conference*. Novosibirsk, Novosibirsk State University, 23-24.
- Lapteva E.G., Korona O.M. (2012) Holocene vegetation changes and anthropogenic influence in the forest-steppe zone of the Southern Trans-Urals based on pollen and plant macrofossil records from the Sukharysh cave. *Veget. Hist. Archaeobot.*, **21**, 321-336. doi:10.1007/s00334-011-0333-z
- Leonova G.A., Bobrov V.A. (2012). Geochemical role of plankton of continental water bodies in Siberian in concentration and biosedimentation of microelements. Novosibirsk, Academic publishing house "GEO", 314 p. (In Russ.)
- Liu H., Xu B., Cui H. (2002) Holocene history of desertification along the woodland-steppe border in northern China. *Quat. Res.*, **57**(2), 259-270. https://doi.org/10.1006/qres.2001.2310
- Liu Y.J., Cao L.M. (1984) Element Geochemistry. Beijing, Science Press, p. 72-110.
- Maslennikov V.V., Melekestseva I.Yu., Maslennikova A.V., Tretyakov G.A., Maslennikova S.P., Ayupova N.R., Safina N.P., Filippova K.A., Udachin V.N., Tseluiko A.S., Aminov P.G. (2016) Differentiation of toxic elements in conditions of lithogenesis and technogenesis of pyrite deposits. Ekaterinburg, RIO UB RAS, 300 p. (In Russ.)
- Maslennikova A.V. (2020) Development and application of an electrical conductivity transfer function, using diatoms from lakes in the Urals, Russia. *J. Paleolimnol.*, **63**(2), 129-146. https://doi.org/10.1007/s10933-019-00106-z
- Maslennikova A.V. (2022) Holocene environments in the Middle Urals: Paleolimnological proxies from the Lake Tavatui (Russia). *Quat. Int.*, **622**, 51-64. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.02.033
- Maslennikova A.V., Artemyev D.A., Shtenberg M.V., Filippova K.A., Udachin V.N. (2020) Express multi-element determination in lake sediments by laser ablation mass-spectrometry (LA-ICP-MS). *Limnol. Oceanogr.: Methods*, **18**(8), 411-423. https://doi.org/10.1002/lom3.10372
- Maslennikova A.V., Udachin V.N. (2017) Lakes ecosystem response to Holocene climate changes and human impact in the Southern Urals: Diatom and geochemical proxies. *Holocene*, **27**(6), 847-859. https://doi.org/10.1177/0959683616675942
- Maslennikova A.V., Udachin V.N., Aminov P.G. (2016) Lateglacial and Holocene environmental changes in the Southern Urals reflected in palynological, diatom, geochemical records from the Lake Syrytkul sediments. *Quat. Int.*, **420**(28), 65-75. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.08.062
- Maslennikova A.V., Udachin V.N., Anfilogov V.N. (2020) Holocene Environments of Anomalous Uranium Concentrations in Sediments of Syrytkul Lake (Southern Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **492**(1), 323-326. https://doi.org/10.1134/S1028334X2005013X
- Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V. (2014) Palaeoecology and geochemistry of lakes sedimentation of Holocene in Urals. Ekaterinburg, RIO UrO RAN, 136 p. (In Russ.)
- Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V., Shtenberg M.V. (2018) Reconstruction of Turgoyak lake (the Southern Urals) ecosystem changes in Holocene. *Lithosphere (Russia)*, **11**(6), 914-927. (In Russ.) https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927
- Maslennikova A.V., Udachin V.N., Pirogov D.V., Khvorov P.V. (2016) Paleolimnological reconstruction of Late Glacial and Holocene environments of Middle Urals. *Lithosphere (Russia)*, (6), 166-176. (In Russ.)
- Maslov A.V. (2005) Sedimentary rocks: methods for studying and interpreting the data. Ekaterinburg, UGGU Press, 289 p. (In Russ.)
- Panova N.K. (1982) The history of mountain forests of the central part of the Southern Urals in the Holocene. *Lesovedenie*, (1), 26-34. (In Russ.)
- Panova N.K., Antipina T.G. (2016) Late Glacial and Holocene environmental history on the eastern slope of the Middle Ural mountains, Russia. *Quat. Int.*, **420**, 76-89. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.035
- Perel'man A.I. (1975) Landscape geochemistry. Moscow, Vysshaya shkola Press, 342 p. (In Russ.)
- Prikhod'ko E.V., Ivanov I.V., Manakhov D.V., Gerasimenko N.P., Inubushi K., Kawahigashi M., Nagano Kh., Sugihara S. (2013) Soils, vegetation, and climate of the Southern Transural region in the Middle Bronze Age (be the example of the Arkaim fortress). *Euras. Soil Sci.*, **46**, 925-934. doi:10.1134/S1064229313090032
- Rasmussen S.O., Bigler M., Blockley S.P. et al. (2014) A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quat. Sci. Rev.*, **106**, 14-28. http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.007
- Reimer P., Austin W., Bard E., Bayliss A., Blackwell P., Bronk Ramsey C., Talamo S. (2020) The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, **62**(4), 725-757. https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41
- Stewart R.E., Kantrud H.A. (1971) Classification of natural ponds and lakes in the Glaciated Prairie Region. Resource Publication 92, Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, DC
- Stobbe A., Gumnior M., Rühl L., Schneider H. (2016) Bronze Age human-landscape interactions in the southern Transural steppe, Russia – Evidence from high-resolution palaeobotanical studies. *Holocene*, **26**, 1692-1710. https://doi.org/10.1177/0959683616641740
- Subetto D.A. (2009) Lake sediments: paleolimnological reconstructions. St.Petersburg, Publishing House of the Russian State Pedagogical University, 344 p. (In Russ.)
- Sun Q., Wang S., Zhou J., Chen Z., Shen J., Xiuping X., Wu F., Chen P. (2010) Sediment geochemistry of Lake Daihai, north-central China: implications for catchment weathering and climate change during the Holocene. *J. Paleolimnol.*, (43), 75-87. https://doi.org/10.1007/s10933-009-9315-x
- Uniform methods of analysis of silicate rocks using che-

- latometry. Instruction number 163-X M. (1979) St.Petersburg, Min. geol. USSR, 43 p. (In Russ.)
- Walker M.J.C., Berkelhammer M., Björck S. et al. (2012) Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *J. Quat. Sci.*, **27**(7), 649-659.
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2000) Fundamentals of lithochemistry. St.Petersburg, Nauka Publ., 480 p. (In Russ.)
- Yusupova A.R., Nourgalieva N.G., Kuzina D.M. (2022) A Holocene climatic record indicated by geochemical indicators and granulometry from Bannoe Lake in the Southern Urals. *X International Siberian Early Career GeoScientists Conference. Proceedings of the Conference*. Novosibirsk, Novosibirsk State University, 128-129.
- Zaretskaya N.E., Panova N.K., Zhilin M.G., Antipina T.G., Uspenskaya O.N., Savchenko S.N. (2014) Geochronology, stratigraphy, and evolution of Middle uralian peatlands during the Holocene (exemplified by the shigir and gorbunovo peat bogs). *Stratigr. Geol. Correl.*, **22**(6), 632-654. <https://doi.org/10.1134/S0869593814060082>
- Zeeb B.A., Smol J.P. (1995) A weighted-averaging regression and calibration model for inferring lakewater salinity using chrysophycean stomatocysts from lakes in western Canada. *Int. J. Salt Lake Res.*, **4**, 1-23. <https://doi.org/10.1007/BF01992411>
- Zhang E., Jones R.T., Bedford A.P., Langdon P.G., Tang H. (2007) A chironomid-based salinity inference model from lakes on the Tibetan Plateau. *J. Paleolimnol.*, **38**, 477-491. <https://doi.org/10.1007/S10933-006-9080-Z>
- Zhilina T.N. (2012) Natural and climatic conditions of 1550–1850 AD as a risk factor for agricultural development in Western Siberia. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, **354**, 77-80. (In Russ.)
- Zou C., Mao L., Tan Z., Zhou L., Liu L. (2021) Geochemistry of major and trace elements in sediments from the Lubei Plain, China: Constraints for paleoclimate, paleosalinity, and paleoredox environment. *J. Asian Earth Sci.*, **X**, (6), 100071. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2021.100071>