

# Lake evolution and climate change in the South-West Siberia



Maltsev A.E.<sup>1\*</sup>, Krivonogov S.K.<sup>1,2</sup>, Solotchina E.P.<sup>1</sup>, Smolentseva E.N.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Academician Koptyug ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia

<sup>2</sup> Korkyt-Ata Kyzylorda University, Aiteke bi 29A, Kyzylorda, 120014, Kazakhstan

<sup>3</sup> Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Academician Lavrentiev ave., 8/2, Novosibirsk, 630090, Russia

**ABSTRACT.** A complex of mineralogical and geochemical data from the south of Western Siberia indicates that the middle Holocene warm and dry epoch ended 5.5–4 cal ka BP with the further onset of more humid and cold conditions in the region. Significant changes in the regional climate probably occurred about 3.6–3.1 cal ka BP that is marked by an increase in the content of carbonates in the sediments, and by changes in vegetation. A general trend in the content of Mg in the carbonate fraction of lake sediments clearly shows a variation in water salinity as a response to climate change. There was a cyclical change of periods of drying/humidification of the Holocene climate of southern Western Siberia.

**Keywords:** Salt lakes, paleoclimate, mineralogical and geochemical indicators, carbonates, Holocene, bottom sediments, Western Siberia

**For citation:** Maltsev A.E., Krivonogov S.K., Solotchina E.P., Smolentseva E.N. Lake evolution and climate change in the South-West Siberia // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 421-427. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-421

## 1. Introduction

Complex mineral-geochemical studies of bottom sediments of a number of lakes of the region (Figure 1) showed significant changes in the natural and climatic conditions during the Holocene (Krivonogov et al., 2012a;b; 2023; Solotchina et al., 2019; 2021; Maltsev et al., 2020; 2022). These changes are also reflected in lithological, mineralogical, and geochemical features of bottom sediments due to aridization/humidization cycles of the regional climate (Figure 2).

Thus, our data from the brackish-water lakes Bolshie Toroki and Itkul indicate warm and moist climate for the period of 8.7–7.8 and arid conditions 7.8–5.3 cal ka BP. The latter, with a time lag, may probably correspond to the global climate event Bond-4 of 5.9–5.3 ka BP. Our data suggests that climate was cooler but still dry 5.3–3.1 cal ka BP, as evidenced by the rather intense precipitation of authigenic carbonates. Similarly, pollen data from Lake Bolshie Toroki (Zhilich et al., 2017) show the warmest and driest climate between 7.0 and 5.5 cal ka BP and a cooling trend

later. Humidity increases from 3.1 ka BP till 0 BP, but an increase in Ca and carbonates in the last centimeters of the sediments may indicate an increase in aridity at the present stage.

## 2. Materials and methods

A complex study of Lake Beloye in the north-eastern part of the region (Krivonogov et al., 2012a;b) revealed colder and drier stages 3.4–2.3 and 2.8–1.7 cal ka BP, respectively. The dry stage coincides with the low lake level of 2.6–1.5 cal ka BP. The climate later became warmer and wetter, causing the highest level of the lake to be 1.3–0.2 cal ka BP, with the next decrease occurring today. Sedimentation and the related biogeochemical proxies showed a sharp change of the lake ecosystem from eutrophic to oligotrophic about 3.4 cal ka BP. This could be caused primarily by climate change, which was warmer and wetter up to 3.4 cal ka BP and after that - cooler and drier.

\*Corresponding author.

E-mail address: [maltsev@igm.nsc.ru](mailto:maltsev@igm.nsc.ru) (A.E. Maltsev)

**Received:** June 10, 2024; **Accepted:** July 01, 2024;

**Available online:** August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



### 3. Results and discussion

Biogeochemical and paleontological proxies from Lake Chany also show a climatic change about 4 cal ka BP (Krivonogov et al., 2023). Summer temperatures were relatively low between 3.6 and 2.2 cal ka BP, gradually increasing with a maximum of 0.7–0.4 cal ka BP and further decreasing. Biomarkers identified three colder and wetter episodes: 3.3–2.1, 1.4–1.0 and 0.45–0.15 cal ka BP. The lake was significantly reduced or did not exist in the earlier stages of the Holocene.

Data on the ostracods of Lake Sargul showed two stages of its evolution during the Holocene (Konovalova et al., 2022). The water in the lake was warm and mineralized before 4.3 cal ka BP; later the water became colder and less mineralized, and the lake level became more volatile. The lake level considerably dropped about 3.3–2.2 cal ka BP and the lake had a low level of water exchange since then. Thus, a cardinal change of the lake ecosystem occurred about 4.3 cal ka BP.

Pollen and diatom data from salt Lake Bolshoye Yarovoye, located further south in the Kulunda lowland, showed a general predominance of steppe conditions in the region during the last 4.4 cal ka BP (Rudaya et al., 2012). The climate was mostly warm and dry with an extension of semi-desert landscapes between 4.4 and 3.75 cal ka BP. The intrazonal pine forests appeared in Kulunda after 3.75 cal ka BP.

Arid steppe and semi-desert landscapes also prevailed in northern Kazakhstan earlier 5.5 ka BP. After this period, the climate became wetter (Kremenetski et al., 1997).

Both pollen (Rudaya et al., 2020) and geochemical data from salt Lake Maloye Yarovoye characterize climate and vegetation changes in Kulunda since the late glacial time. Steppe and desert biomes dominated in the region throughout the Holocene, but data indicate significant changes in the level of the lake, reflecting variations in humidity. The lake existed from ca. 13 cal ka BP and had a rather high water level in the



Fig.1. Location of studied lakes.

beginning of the Holocene. A considerable salinization occurred 10.4–8.9 cal ka BP resulted in abundant precipitation of gypsum, halite and calcite; the lake temporarily transformed to playa between 10.2 and 10.0 cal ka BP. The maximum salinity of the lake is recorded for a period of 9.8–9.4 cal ka BP, when ternadite and hydroglauberite were deposited. However, vegetation proxy indicate a total maximum in annual precipitation (PANN) 9.8–9.7 cal ka BP. Precipitation decreased 9.3–7 cal ka BP combined with a cooling manifested by declining vegetation diversity.

Geochemical conditions changed and carbonates actively precipitated in the interval of 8.9–6.4 cal ka BP. This change precedes the climatic optimum of the Holocene, which began 7.5–7 and terminated 3.6–2.7 cal ka BP in the region (Rudaya et al., 2020). Significant change in the mineral and geochemical composition of the sediments suggests deep-water lake conditions of 6.4–0 cal. ka BP. The sediment is dominated by terrigenous quartz, chlorite and potassium feldspar, the

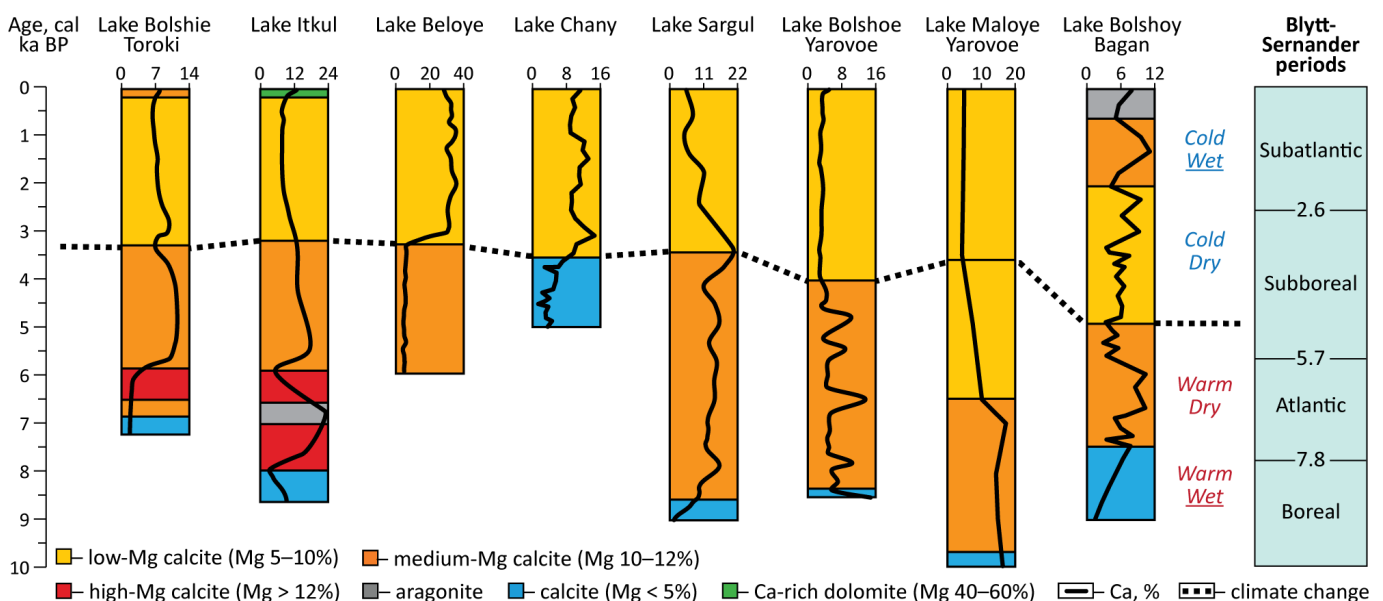


Fig.2. Indication of climate changes by changes in carbonate minerals and total Ca in sediments of studied lakes in the south of Western Siberia.

autigenic halite and low-Mg calcite content is small, and sulfate minerals are absent. The pollen data confirm high level of the lake between 6.6 and 1.3 cal ka BP with a maximum at 6.6–6 cal ka BP.

Our data from salt Lake Bolshoy Bagan also indicate several (cyclic) climate fluctuations during the last 9 ka BP (Maltsev et al., 2022). The climate was warmer and wetter 9–7.5 cal ka BP and became drier 7.5–5.3 cal ka BP with a peak in carbonates precipitation in the lake falls to 6.9–5.8 cal ka BP, which may correspond to Bond-4 drought event. These results are similar to the results from lakes Itkul and Bolshie Toroki. The unstable climate with frequent alternation of short dry and wet episodes was characterized by a time interval of 5.3–2.1 cal ka BP, and the cooling trend is well visible for 2.1–0.2 cal ka BP. Thus, the Bolshoy Bagan data clearly indicates that the climate was warmer and drier prior to 5.3 cal ka BP and colder afterwards.

#### 4. Conclusions

Summarizing the reviewed data, we can say that the middle Holocene warm and dry epoch ended in the south of Western Siberia 5.5–4 cal ka BP with the further onset of more humid and cold conditions. Significant changes in the regional climate probably occurred about 3.6–3.1 cal ka BP that is marked by an increase in the content of carbonates in the sediments, and by changes in vegetation (Krivonogov et al., 2012a;b; 2023; Zhilich et al., 2017; Solotchina et al., 2019; 2021; Maltsev et al., 2020). In addition, we see a general trend in the content of Mg in carbonate fraction of the lake sediments (Figure 2), indicating a variation in the water salinity as a consequence of the regional climate change.

#### Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR according to the research Projects 19-29-05085 mk, 21-55-53037 GFEN\_a, 19-05-00403 A, and Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Work is done on state assignment of V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IGM SB RAS), Projects No 122041400193-7. Analytical studies were conducted in the Analytical Center for multi-elemental and isotope research IGM SB RAS.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

#### References

- Konovalova V.A., Krivonogov S.K., Leonova G.A. et al. 2022. Paleocological reconstruction of Lake Sargul in Holocene based on ostracod analysis. *Limnology and Freshwater Biology*. 2022 (4): 1438–1440.
- Kremenetski C.V., Tarasov P.E., Cherkinsky A.E. 1997. The Latest Pleistocene in Southwestern Siberia and Kazakhstan. *Quaternary International*. 41-42: 125–134.
- Krivonogov S.K., Takahara H., Yamamuro M. et al. 2012. Regional to local environmental changes in southern Western Siberia: Evidence from biotic records of mid to late Holocene sediments of Lake Belye. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 331–332 (1): 177–193.
- Krivonogov S.K., Yamamuro M., Takahara H. et al. 2012. An abrupt ecosystem change in Lake Belye, southern Western Siberia: palaeoclimate versus local environment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 331–332, 194–206.
- Krivonogov S.K., Zhdanova A.N., Solotchin P.A. et al. 2023. The Holocene environmental changes revealed from the sediments of the Yarkov sub-basin of Lake Chany, south-western Siberia. *Geoscience Frontiers*. 14: 101518.
- Maltsev A.E., Leonova G.A., Bobrov V.A. et al. 2020. Geochemistry of Carbonates in Small Lakes of Southern West Siberia Exemplified from the Holocene Sediments of Lake Itkul. *Russ. Geol. Geophys.* 61 (3): 303–321. DOI: [10.15372/RGG2019081](https://doi.org/10.15372/RGG2019081)
- Maltsev A.E., Krivonogov S.K., Miroshnichenko L.V. et al. 2022. Geochemical indication of the Holocene climatic changes in sediments of Bolshoi Bagan Lake, Southern West Siberia. *Limnology and Freshwater Biology*. 2022 (4): 1485–1487. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1485](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1485)
- Rudaya N., Nazarova L., Nourgaliev D. et al. 2012. Mid-late Holocene environmental history of Kulunda, southern West Siberia: vegetation, climate and humans. *Quaternary Science Reviews*. 48: 32–42.
- Rudaya N., Krivonogov S., Słowinski M. et al. 2020. Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity. *Quat. Sci. Rev.* 249: 106616.
- Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Solotchin P.A. et al. 2019. Authigenic Carbonates from Holocene Sediments of Lake Itkul (South of West Siberia) as Indicators of Climate Changes. *Dokl. Earth Sci.* 487 (1): 745–750. DOI: [10.1134/S1028334X19070079](https://doi.org/10.1134/S1028334X19070079)
- Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Solotchin P.A. et al. 2021. Mineralogical Indicators of Climate Changes in Southwestern Siberia in Holocene Sediments of Bolshie Toroki Lake. *Dokl. Earth Sci.* 496 (1): 17–23. DOI: [10.1134/S1028334X21010220](https://doi.org/10.1134/S1028334X21010220)
- Zhilich S., Rudaya N., Krivonogov S. et al. 2017. Environmental dynamics of the Baraba forest-steppe (Siberia) over the last 8000 years and their impact on the types of economic life of the population. *Quaternary Science Reviews*. 163 (1): 152–161.

# Эволюция озер и изменение климата юга Западной Сибири

Краткое сообщение

LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGYМальцев А.Е.<sup>1\*</sup>, Кривоногов С.К.<sup>1,2</sup>, Солотчина Э.П.<sup>1</sup>, Смоленцева Е.Н.<sup>3</sup><sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. Соболева В.С. СО РАН, пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup>Кызылординский университет им. Коркыт-Ата, Айтеке би, 29А, Кызылорда, 120014, Казахстан<sup>3</sup>Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирск, 630090, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Теплый и сухой период в середине голоцена (до ~5.5–4 тыс. л. н.) с последующим увлажнением и похолоданием фиксируется в районе юга Западной Сибири по данным осадков ряда озер. На рубеже около 3.6–3.1 тыс. л.н. на исследуемой территории произошло существенное изменение природно-климатических обстановок, которое отражается как в росте содержания карбонатов в осадках, так и в изменении спорово-пыльцевых ассоциаций. Наблюдается единый тренд изменения содержания Mg в карбонатах, свидетельствующий о колебаниях солености воды, что является следствием региональных палеоклиматических флуктуаций. Зафиксирована циклическая смена периодов иссушения/увлажнения голоценового климата юга Западной Сибири.

**Ключевые слова:** Соленые озера, палеоклимат, минералого-геохимические индикаторы, карбонаты, голоцен, донные отложения, Западная Сибирь

Для цитирования: Мальцев А.Е., Кривоногов С.К., Солотчина Э.П., Смоленцева Е.Н. Эволюция озер и изменение климата юга Западной Сибири // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 421-427. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-421

## 1. Введение

Комплексные минералого-геохимические исследования донных отложений ряда озер юга Западной Сибири (Рис. 1) показали, что во второй половине голоцена на исследуемой территории имели место значительные изменения природно-климатических обстановок (Krivonogov et al., 2012a; b; 2023; Solotchina et al., 2019; 2021; Maltsev et al., 2020; 2022). Они нашли свое отражение в литолого-минералогических и геохимических особенностях донных осадков, за последние примерно 9 кал. тыс. л. н., определяемые циклами аридизации/гумидизации регионального климата (Рис. 2).

## 2. Материалы и методы

По данным исследования двух солоновато водных озер Восточно-Барабинской низменности (Большие Тороки и Иткуль) нами было установлено, что примерно 8.7–7.8 тыс. л. н. региональный климат был теплым и влажным. Аридизация климата наступает ~7.8–5.3 кал. тыс. л. н. Во временном интервале 5.9–5.3 тыс. л. н. было установлено

проявление (с определенным временным лагом) глобального климатического события Бонда 4. Экологическая реконструкция растительности и климата донных отложений оз. Большие Тороки подтвердила самый теплый и сухой период с 7.0 до 5.0 тыс. л. н. (Zhilich et al., 2017). В суббореале (~5.3–3.1 тыс. л. н.) климат стал более прохладным, однако влажность его не увеличилась, о чем свидетельствует достаточно интенсивное осаждение хемогенных карбонатов. Палеонтологические данные также показывают тенденцию к похолоданию после 5.5 тыс. л. н., когда начала формироваться лесостепь (Zhilich et al., 2017). Около 3.1–0 тыс. л.н. отмечается рост гумидности климата, однако увеличение содержания Са и карбонатов в последних сантиметрах осадков может свидетельствовать о росте аридности на современном этапе.

## 3. Результаты и обсуждение

Палеонтологические данные (пыльца, растительные макроископаемые, диатомовые водоросли и остракоды) из отложений оз. Белое, расположенного в лесостепной зоне юга Западной Сибири,

\*Автор для переписки.

Адрес e-mail: [maltsev@igm.nsc.ru](mailto:maltsev@igm.nsc.ru) (А.Е. Мальцев)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



позволили выделить «холодную» (3.4–2.3 тыс. л. н.) и «сухую» (2.8–1.7 тыс. л. н.) стадии в среднем-позднем голоцене (Krivonogov et al., 2012a,b). Стадия сухого климата совпадает с понижением уровня озера 2.6–1.5 тыс. л. н. В дальнейшем климат стал более теплым и влажным, что привело к максимально высокому уровню озера 1.3–0.2 тыс. л. н., а затем последовало понижение уровня воды. Структура донных отложений и биогеохимические данные показали резкое изменение экосистемы озера около 3.4 кал. тыс. л. н. — тип озера сменился с эвтрофного на олиготрофное. Это могло быть вызвано, в первую очередь, сменой климата, который был более теплым и влажным до 3.4 тыс. л. н., а после этого — более прохладным и сухим (Krivonogov et al., 2012a).

Биогеохимические и палеонтологические данные из донных отложений оз. Чаны также показывают региональное изменение климата с ~4 тыс. л.н. в Западно-Сибирской лесостепи и степи (Krivonogov et al., 2023). Отмечаются относительно низкие температуры между 3.6 и 2.2 тыс. л. н., далее произошло постепенное повышение температур (с максимальными значениями ~0.7–0.4 тыс. л. н.), которое сменилось их последующим снижением. Биомаркеры выявили три более холодных и влажных эпизода: 3.3–2.1, 1.4–1.0 и 0.45–0.15 тыс. л. н. При этом условия до 3.6 тыс. л.н. были достаточно засушливыми, с последующим быстрым увеличением влажности климата (Krivonogov et al., 2023).

Палеоэкологическая реконструкция истории развития оз. Саргуль (Барабинская низменность) на основе анализа остракод показала два этапа его эволюции в голоцене (Konovalova et al., 2022). До 4.3 тыс. л. н. вода озера была теплой и минерализованной. После этого отмечается колебания уровня и солености озера, а озерные воды становятся менее минерализованными и более холодными. Около 3.3–2.2 тыс. л. н. уровень озера упал и в дальнейшем в озере наблюдался низкий уровень водообмена. Т.е. на рубеже 4.3 тыс. л. н. произошло кардинальное изменение озерной экосистемы.

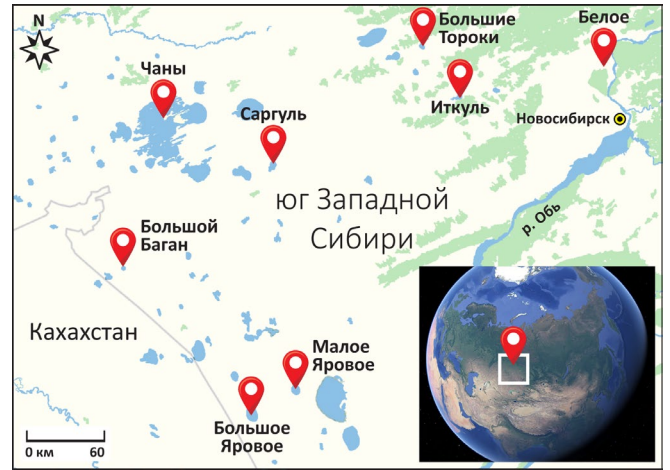


Рис.1. Расположение исследованных озер.

Экологическая реконструкция растительности и климата на основе данных о пыльце и диатомовых водорослях соленого озера Большое Яровое в Кулунде, на юге Западной Сибири, показала общее преобладание степи в течение последних 4.4 тыс. л. н. в районе исследования (Rudaya et al., 2012). В условиях относительно теплого и сухого климата открытые полупустынные и сухие степи с березовыми лесами распространялись между 4.4 и 3.75 тыс. л. н. Появление хвойных лесов в Кулунде началось после 3.75 тыс. л. н. (Rudaya et al., 2012).

Данные пыльцевого и геохимического анализов для донных отложений соленого оз. Малое Яровое позволили провести реконструкцию климата и биоразнообразия Кулундинской степи (Rudaya et al., 2020). Увеличение влажности климата в Степном Алтае пришлось на начало голоцена (11.7 тыс. л. н.), со значительным ростом в интервале 9.8–9.7 тыс. л. н., что привело к подъему уровня озера после 10.6 тыс. л. н. Около 10.4–8.9 тыс. л. н. отмечается рост солености озера, когда содержания аутигенных минералов в осадке резко возрастает, и они представлены преимущественно

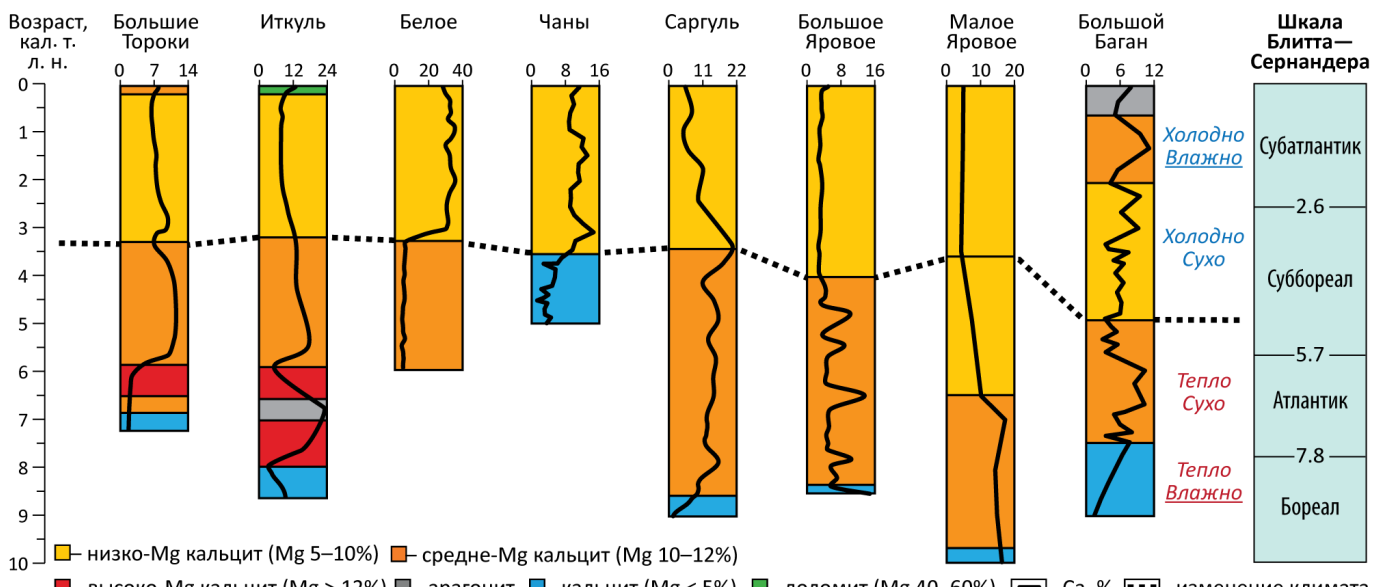


Рис.2. Минералого-геохимические индикаторы изменения климата голоцена и эволюция озер юга Западной Сибири.

водорастворимыми солями: гипсом, ангидритом, галитом, а также кальцитом. Пик солености приходится на 9.8–9.4 тыс. л. н., что сопровождается осаждением тернадита и гидроглауберита. Количество осадков незначительно уменьшилось около 9.3–7 тыс. л. н., что, вероятно, сопровождалось тенденцией похолодания, которая отражается в уменьшении растительного разнообразия (Rudaya et al., 2020). Это привело к активному осаждению карбонатов и росту их содержания в осадке 8.9–6.4 тыс. л. н. Изменение минерального и химического состава донных отложений 6.4–0 тыс. л. н. указывает на усиление береговой эрозии и соответствует стадии «глубокого озера». Минеральный состав осадка представлен большим количеством терригенного материала (кварц, хлорит, КППШ) и меньшими содержаниями галита, низко-магнезиального кальцита, полным отсутствием сульфатных минералов. Данные пылецевого анализа подтверждают высокое стояние озерных вод между 6.6 и 1.3 тыс. л. н., с максимальным уровнем 6.6–6 тыс. л. н. Оптимальные условия для растительного разнообразия на Степном Алтае и юге Западной Сибири начинаются 7.5–7 и заканчиваются 3.6–2.7 тыс. л. н. (Rudaya et al., 2020).

Геохимия осадков соленого оз. Большой Баган подтверждает циклы аридизации/гумидизации в голоцене (Maltsev et al., 2022). Летопись донных отложений озера охватывает временной период в 9 тыс. лет, что позволяет получить данные о ранних этапах голоцена (после 7 тыс. л. н.). Так, около 9–7.5 кал. тыс. л. н. в районе исследования был теплый и влажный климат, который сменили засушливые природные обстановки примерно 7.5–5.3 кал. тыс. л. н. с пиком карбонатности осадка 6.9–5.8 кал. тыс. л. н., который может соответствовать глобальному климатическому событию Бонда 4. Что совпадает с результатами, полученными из осадков озер Иткуль и Большие Тороки. Для временного интервала 5.3–2.1 кал. тыс. л. н. характерен неустойчивый климат, с частой сменой коротких сухих и влажных эпизодов, а ~2.1–0.2 кал. тыс. л. н. наметился тренд на похолодание климата. Таким образом, летопись донных отложений оз. Большой Баган фиксируются теплый и сухой период голоцена на протяжении ~9–5.3 кал. тыс. л. н. с последующим похолоданием. В северном Казахстане (который граничит с озером) также до ~5.5 тыс. л.н. преобладали засушливые степные и полупустынные ландшафты. После этого периода климат стал влажнее (Kremenetski et al., 1997).

#### 4. Заключение

Можно заключить, что теплый и сухой период в середине голоцена с последующим увлажнением и похолоданием фиксируется в районе юга Западной Сибири до ~5.5–4 тыс. л. н. На рубеже около 3.6–3.1 тыс. л. н. на исследуемой территории произошло существенное изменение природно-климатических обстановок, которое отражается как в росте содержания карбонатов в осадках, так и в измене-

нии спорово-пыльцевых ассоциаций (Krivonogov et al., 2012a; b; 2023; Zhilich et al., 2017; Solotchina et al., 2019; 2021; Maltsev et al., 2020). Наблюдается единый тренд изменения содержания Mg в карбонатах донных отложений региональных озер (Рис. 2), свидетельствующий о колебаниях солености воды, что является следствием региональных палеоклиматических флуктуаций. Однако следует отметить, что циклическая смена периодов иссушения/увлажнения голоценового климата, зафиксированная в карбонатсодержащих донных осадках озер юга Западной Сибири, наблюдается и для большинства озер Западной Сибири. Таким образом, речь идет о влиянии глобальных климатических процессов, протекавших на территории Северного полушария в позднечетвертичное время.

#### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 19-29-05085 мк, 21-55-53037 ГФЕН\_а, 19-05-00403 А. Работа выполнена по государственному заданию Института геологии и минералогии СО РАН (проект № 122041400193-7) в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Список литературы

- Konovalova V.A., Krivonogov S.K., Leonova G.A. et al. 2022. Paleocological reconstruction of Lake Sargul in Holocene based on ostracod analysis. *Limnology and Freshwater Biology*. 2022 (4): 1438–1440.
- Kremenetski C.V., Tarasov P.E., Cherkinsky A.E. 1997. The Latest Pleistocene in Southwestern Siberia and Kazakhstan. *Quaternary International*. 41-42: 125–134.
- Krivonogov S.K., Takahara H., Yamamuro M. et al. 2012. Regional to local environmental changes in southern Western Siberia: Evidence from biotic records of mid to late Holocene sediments of Lake Belye. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 331–332 (1): 177–193.
- Krivonogov S.K., Yamamuro M., Takahara H. et al. 2012. An abrupt ecosystem change in Lake Belye, southern Western Siberia: palaeoclimate versus local environment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 331–332, 194–206.
- Krivonogov S.K., Zhdanova A.N., Solotchina P.A. et al. 2023. The Holocene environmental changes revealed from the sediments of the Yarkov sub-basin of Lake Chany, southwestern Siberia. *Geoscience Frontiers*. 14: 101518.
- Maltsev A.E., Leonova G.A., Bobrov V.A. et al. 2020. Geochemistry of Carbonates in Small Lakes of Southern West Siberia Exemplified from the Holocene Sediments of Lake Itkul. *Russ. Geol. Geophys.* 61 (3): 303–321. DOI: [10.15372/RGG2019081](https://doi.org/10.15372/RGG2019081)
- Maltsev A.E., Krivonogov S.K., Miroshnichenko L.V. et al. 2022. Geochemical indication of the Holocene climatic changes in sediments of Bolshoi Bagan Lake, Southern West Siberia. *Limnology and Freshwater Biology*. 2022 (4): 1485–1487. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1485](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1485)

Rudaya N., Nazarova L., Nourgaliev D. et al. 2012. Mid-late Holocene environmental history of Kulunda, southern West Siberia: vegetation, climate and humans. *Quaternary Science Reviews*. 48: 32–42.

Rudaya N., Krivonogov S., Słowinski M. et al. 2020. Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity. *Quat. Sci. Rev.* 249: 106616.

Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Solotchin P.A. et al. 2019. Authigenic Carbonates from Holocene Sediments of Lake Itkul (South of West Siberia) as Indicators of Climate Changes. *Dokl. Earth Sci.* 487 (1): 745–750. DOI: [10.1134/S10283334X19070079](https://doi.org/10.1134/S10283334X19070079)

Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Solotchin P.A. et al. 2021. Mineralogical Indicators of Climate Changes in Southwestern Siberia in Holocene Sediments of Bolshie Toroki Lake. *Dokl. Earth Sci.* 496 (1): 17–23. DOI: [10.1134/S10283334X21010220](https://doi.org/10.1134/S10283334X21010220)

Zhilich S., Rudaya N., Krivonogov S. et al. 2017. Environmental dynamics of the Baraba forest-steppe (Siberia) over the last 8000 years and their impact on the types of economic life of the population. *Quaternary Science Reviews*. 163 (1): 152–161.