

Polyunsaturated long-chain alkenones in bottom sediments of the meromictic Lake Shira (southern Siberia) as a paleo-indicator of climate change

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYBulkhin A.O.^{1*}, Zykov V.V.¹, Rogozin D.Y.^{1,2}, Bezrukova E.V.³¹ Institute of Biophysics, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences (IBP SB RAS), Akademgorodok Str., 50/50, Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk, 660036, Russia² Siberian Federal University (SibFU), 79 Svobodny Ave, Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk, 660041, Russia³ Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Favorsky St., 1A, Irkutsk, 66403, Russia

ABSTRACT. To understand long-term climate variability and its connection with modern global warming, this study analyzed the composition of long-chain alkenones in the bottom sediments of Lake Shira (North-Minusinsk valley) over the past 3000 years. In the ICE2023, Shira-I-21 and Shira-II-21 cores, gas chromatography-mass spectrometry revealed methyl- and ethyl-alkenones, predominantly C₃₇ and C₃₈, with double bonds ranging from two to four. The vertical profiles show substantial fluctuations in total concentration (1-355 µg/g), likely associated with changes in water level, salinity, and organic matter preservation conditions. Alkenone peaks coincide with light (carbonate-rich) layers, reflecting phases of lake level decline and increased salinity. Elevated alkenone concentrations in the clay-rich sections of the core may indicate enhanced adsorption and preservation. The results confirm the potential of long-chain alkenones as a proxy for paleo-salinity and, consequently, paleo-humidity in arid regions of Siberia.

Keywords: long-chain alkenones, salinity indicator, lake sediments, haptophyte algae, South Siberia, paleoclimatology

For citation: Bulkhin A.O., Zykov V.V., Rogozin D.Y., Bezrukova E.V. Polyunsaturated long-chain alkenones in bottom sediments of the meromictic Lake Shira (southern Siberia) as a paleo-indicator of climate change // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 824-833. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-4-824](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-824)

1. Introduction

Understanding the relationship between modern global warming and natural climate variability requires knowledge of climate changes over the past millennia. The study of climate change in Asia is a topical area of palaeoclimate research. However, climate fluctuations in Siberia remain insufficiently explored (Bezrukova et al., 2010; Rudaya et al., 2020; Novenko et al., 2022). The North-Minusinsk hollow is of particular interest for paleoclimate research, as it is located within the steppe zone of southern Siberia and is surrounded by mountain ranges that block the inflow of moist air. As a result, the hollow has developed a semi-arid microclimate that is milder compared to the surrounding regions. In arid and semi-arid regions, endorheic lakes are highly sensitive to the balance between precipitation and evaporation, which is reflected in fluctuations in water volume and salinity (Last and Ginn, 2005). Lake bottom sediments serve as a valuable archive of information

about the history of ecosystem. By reconstructing the chronology of salinity based on bottom sediments from such lakes, it is possible to obtain valuable information about changes in overall humidity and hydrological conditions in the past. To date, there are no universal and reliable indicators of salinity. Proposed proxies, such as the content and isotopic composition of carbonates in lake sediments, may be influenced by the input of terrigenous material (Zhao et al., 2010). Ostracods and diatoms assemblages (De Deckker and Forester, 1988) have the potential to reflect salinity fluctuations. However, the application of this approach requires good preservation of organic remains, which is often hindered in mid-latitude Asian lakes due to unstable hydrological conditions. Therefore, the development of new salinity indicators with broader applicability remains a pressing challenge in paleolimnological research.

Currently, molecular approaches are gaining increasing significance, offering the ability to analyze

*Corresponding author.

E-mail address: bulkhinlive@yandex.ru (A.O. Bulkhin)

Received: July 31, 2025; **Accepted:** August 15, 2025;

Available online: August 31, 2025

© Author(s) 2025. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



organic compounds that can be preserved in lake sediments for thousands of years. Polyunsaturated long-chain alkenones (C_{37} - C_{42}), produced by haptophyte algae of the order Isochrysidales, are among the most promising emerging paleo-indicators sensitive to both temperature and salinity, owing to their excellent long-term preservation in sedimentary records (Zhao et al., 2014; Longo et al., 2016; 2018; Bulkhin et al., 2023). Originally, long-chain alkenones were established as a reliable bioindicator for reconstructing past sea surface temperatures (Brassell et al., 1986; Müller et al., 1998). However, similar temperature reconstructions in continental lakes have proven difficult due to the simultaneous presence of several species of haptophytes exhibiting different responses to temperature (Araie et al., 2018; Theroux et al., 2020). Nevertheless, ongoing research focuses on developing alkenone-based proxies for paleo-salinity in lacustrine environments (Chu et al., 2005; Zhao et al., 2014; Song et al., 2016; He et al., 2020). A study of surface sediments from 22 lakes in the North-Minusinsk hollow demonstrated that the relationship between total alkenone concentration and salinity follows a unimodal pattern, which can serve as a qualitative indicator of transitions across a critical salinity threshold of 20 g l⁻¹ (Bulkhin et al., 2023). This pattern was also observed in sediment records from lake Utichye-3, where a positive correlation between the average chain length (ACL) of alkenones and salinity was identified (Bulkhin et al., 2024). In 2021, researchers from the Vinogradov Institute of Geochemistry collected several sediment cores from Lake Shira, each approximately 1.5 meters long and deeper (Bezrukova et al., 2024), enabling alkenone analysis in a core spanning approximately 3000 years.

Thus, the aim of this study is to analyze the composition of long-chain alkenones in bottom sediments from lake Shira and to evaluate their potential as paleo-salinity indicators for reconstructing past humidity in the North-Minusinsk hollow region.

2. Methods

In 2021, researchers from the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry collected two sediment cores from Lake Shira: Shira-I-21 (159 cm) using a corer sampler UWITEC (Austria), and Shira-II-21 (244 cm) using a drilling rig. This study focused on the lower part of the second core (146 cm). Samples from Shira-I-21 were taken at 5 cm intervals, while those from Shira-II-21 were selected based on visual indicators of abrupt changes in the lake, such as distinct light and dark layers. In March 2023, an ICE2023 core (approximately 40 cm) was collected using a freeze corer developed at the Institute of Biophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Two vertical parallel bars measuring approximately 3 × 3 cm were extracted from the core and then sliced at 1 cm intervals using a heated nichrome wire. One of these bars was used for analysis of alkenone content.

Radiocarbon dating (¹⁴C) of a 146 cm-long sediment core from Lake Shira was conducted by researchers at the Vinogradov Institute of Geochemistry (Bezrukova

et al., 2024). Based on the presence of characteristic colored layers, the obtained age model was correlated with the Shira-I-21 and Shira-II-21 cores. The age of the frozen core was determined using distinct white layers previously identified in sediment cores from Lake Shira (Zykov et al., 2012).

Prior to analysis, all the sediment samples were freeze-dried using an AK 4-50 lyophilizer (ProfLab) at a pressure of 0.2 mbar and a heating temperature of 40 °C. The freeze-drying process lasted for approximately 12 hours.

In the analytical laboratory of the Institute of Biophysics SB RAS, dried samples weighing approximately 0.4-0.5 g from the frozen ICE2023 core (40.5 cm), 0.4-1 g from the Shira-I-21 core (159 cm, 33 samples), and 1-2 g from the Shira-II-21 core (146 cm, 67 samples) were extracted for 24 hours at room temperature using a chloroform-methanol mixture (7:3, v/v) with the addition of 50 µL of hexatriacontane (C_{36}) as an internal standard. After extraction, the samples were filtered, evaporated, and saponified for 1 hour at 90 °C using 5 mL of 6% KOH. Subsequently, 10 mL of distilled water and 5 mL of hexane were added to the flasks and thoroughly mixed. The combined hexane extracts were washed three times with water, passed through a sodium sulfate, and then evaporated.

The unsaponifiable fractions were separated using a GC-MS 7890/5975C system (Agilent Technologies, USA) equipped with a VF-200MS capillary column (60 m × 250 µm × 0.10 µm). Helium was used as the carrier gas at a flow rate of 1.2 ml min⁻¹. Samples were injected in split mode, with the injector temperature set to 260 °C. The interface temperature was 230 °C, the ion source temperature was 150 °C, and the ionization energy was 70 eV. Mass fragments were scanned over a range of 30-700 amu at a rate of 0.5 s scan⁻¹. The initial oven temperature was 60 °C, followed by a ramp of 20 °C min⁻¹ to 255 °C, then 5 °C min⁻¹ to 285 °C, and finally 2 °C min⁻¹ to 320 °C, which was held isothermal for 10 minutes.

The alkenone peaks were identified based on the known molecular masses of the compounds, the mass-to-charge ratio (m/z) of the base peak, and characteristic fragment ions, as well as by comparing the obtained mass spectra with previously published reference data (de Leeuw et al., 1980; Marlowe et al., 1984; Rontani et al., 2006).

3. Results and discussion

Long-chain alkenones C_{37} - C_{40} with 2 to 4 double bonds were detected in all sediment cores from Lake Shira (ICE2023, Shira-I-21, Shira-II-21). Alkenones C_{37} and C_{39} were identified as methyl ketones, while C_{38} and C_{40} were ethyl ketones. The alkenone composition in the cores was dominated by C_{37} and C_{38} compounds, whereas C_{39} and C_{40} were present in lower concentrations. The relative distribution of alkenones in the sediment cores generally showed a predominance of C_{37} compounds. Typically, C_{39} alkenones were detected together with C_{40} alkenones, in a total of 38 samples and most commonly with three and two double bonds.

This alkenone composition is typical for saline lakes in temperate latitudes (Fig. 1) (Plancq et al., 2018; He et al., 2020).

The vertical profiles of alkenones in the analyzed sediment cores reveal substantial variations in the concentrations of long-chain alkenones across different depositional periods. These fluctuations likely reflect the response of haptophyte algae to changing environmental conditions during alkenone burial, influenced by factors such as water column circulation, temperature, and chemical composition (Toney et al., 2010; Plancq et al., 2018) (Fig. 2). Total alkenone concentrations in the cores varied widely, ranging from 1 µg/g to 355 µg/g (Fig. 2). Some discrepancies in alkenone concentrations among samples from the analyzed cores may be attributed to differences in sample preparation protocols. Specifically, a smaller sample mass was used during the preparation of the Shira-I-21 core (159 cm). Additionally, the sampling location may have influenced the results. The Shira-I-21 core could have been collected from an area of sediment accumulation, and since alkenone producers represent only one group of microorganisms in the lake, an increase in total organic matter content could lead to a relative decrease in alkenone concentration when calculated per dry weight and LOI₅₅₀. However, the general trends of increasing and decreasing total alkenone content were preserved across the cores (102-160 cm, Fig. 2B). In the upper section of the ICE2023 core, elevated alkenone concentrations of approximately 190 µg/g were observed at depths of 7-8 to 10-11 cm, corresponding to the last 100-150 years. A similar pattern was also observed in the Shira-I-21 core (Fig. 2). Such variations may indicate that changes in sedimentation occurred during this period, affecting both the production and preservation of alkenones. It is well documented that the

lake has experienced significant fluctuations in water level throughout its history. For instance, between the 1910s and 1930s, corresponding approximately to the 7-10 cm depth interval (Fig. 2A), all endorheic lakes in the North-Minusinsk hollow underwent a drying phase reaching minimum levels, followed by a rapid rise to near-modern levels (Rogozin et al., 2010; Rogozin et al., 2018). Increased water inflow likely enhanced meromixis, which could have a beneficial effect on the preservation of alkenones and explain the similar distribution of the total alkenone content. Also, a light-colored layer (carbonate layer) is visible in this section of the core (Fig. 2B), which likely formed due to a drop in lake level. Consequently, the resulting increase in salinity and/or a shift in the community composition of alkenone-producing organisms could also explain the elevated concentrations of long-chain alkenones.

Similar pronounced peaks were also recorded at a depth of 34-39 cm in the core, corresponding to approximately 650-820 years ago. These peaks were also detected in the upper part of core Shira-I-21 (Fig. 2B) and also corresponded to the light layers of the core. Comparable patterns were observed further downcore at depths of 94-102 cm, where the maximum total alkenone concentration of up to 355 µg/g was detected (approximately 2000 years ago), as well as at 138-148 cm and 178-189 cm. It is important to note that increases in total alkenone concentrations were accompanied by the appearance of longer-chain alkenones, up to C₄₀. Additionally, in the lower part of core Shira-II-21, within the 220-230 cm interval, elevated alkenone concentrations were observed, reaching up to 256 µg/g (Fig. 2B). This may be preliminarily attributed to the accumulation of massive clay deposits starting from 220 cm (approximately 4750 years ago) and continued until the end of the core. It is well

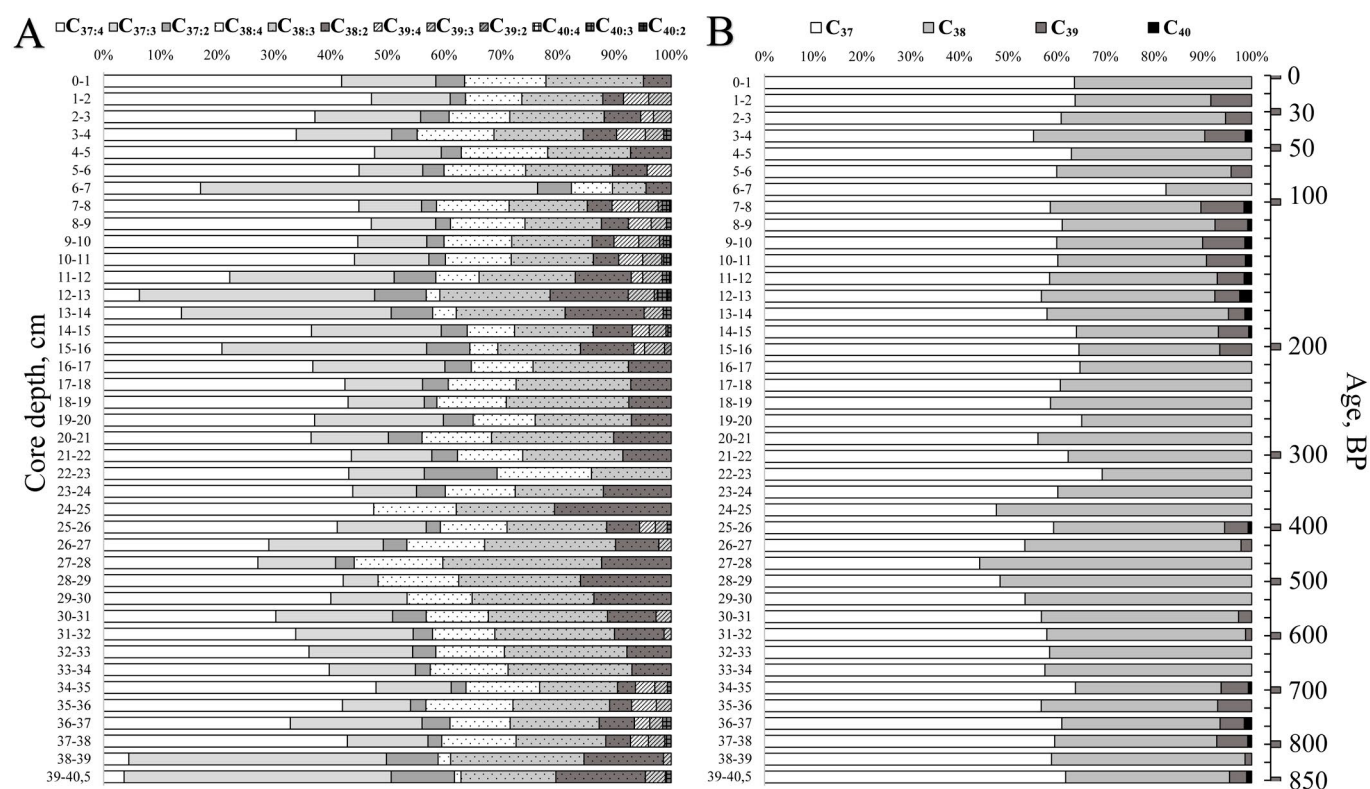


Fig.1. Relative distribution of alkenones in Lake Shira based on the ICE2023 core, 40.5 cm long. A – distribution of all alkenones. B – total distribution of alkenones C₃₇, C₃₈, C₃₉, C₄₀.

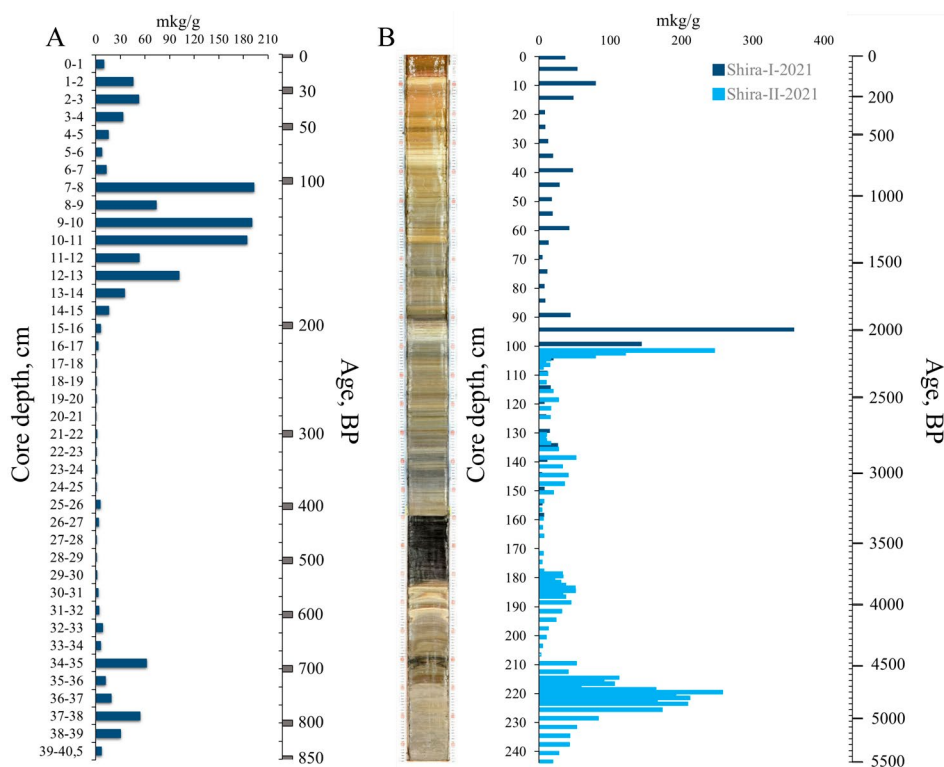


Fig.2. Vertical distribution of total alkenone concentrations. A – quantitative distribution of alkenones in the frozen core ICE2023 (40.5 cm). B – quantitative distribution of alkenones in the spliced cores Shira-I-21 and Shira-II-21.

established that organic compounds adsorbed onto clay surfaces in aquatic environments are less susceptible to degradation. In a stratified saline lake, where bottom waters may become anoxic, the combination of binding clays and low oxygen concentrations can significantly enhance the preservation of alkenones. Thus, it becomes possible to suggest that elevated alkenone concentrations in sediment cores from saline lakes experiencing abrupt water-level fluctuations may reflect changes in salinity and, consequently, serve as a paleo-humidity proxy for the surrounding region.

4. Conclusions

Long-chain alkenones C_{37} - C_{40} were reliably detected in the bottom sediments of Lake Shira (cores ICE2023, Shira-I-21, Shira-II-21). Total alkenone concentrations varied widely (1-355 $\mu\text{g/g}$), exhibiting distinct peaks in the light-colored carbonate and clay-rich layers. These peaks correspond to intervals of lowered lake levels (1910s-1930s) and to older clay-rich deposits (~2000 and ~4750 years ago). The comparison of alkenone profiles with sediment lithology suggests that alkenone accumulation is maximized during drought periods and increasing lake salinity, possibly when inflow events enhance anoxic conditions in bottom waters and promote the preservation of organic compounds. Additionally, clay-rich deposits may have contributed to the effective preservation of alkenones. The observed patterns in alkenone concentration, in conjunction with lithological changes, confirm their potential as a qualitative proxy for paleo-salinity. Thus, the profile of long-chain alkenones in the sediment core from Lake Shira can be used to assess paleo-humidity in the North-Minusinsk hollow.

Acknowledgements

This research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-17-00185-II, <https://rscf.ru/en/project/22-17-00185-II/>.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Araie H., Nakamura H., Toney J.L. et al. 2018. Novel alkenone-producing strains of genus *Isochrysis* (Haptophyta) isolated from Canadian saline lakes show temperature sensitivity of alkenones and alkenoates. *Organic Geochemistry* 121: 89–103. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2018.04.008](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2018.04.008)
- Bezrukova E.V., Reshetova S.A., Kulagina N.V. et al. 2024. Vegetation and Climate in the North of the Minusinsk Basin in the Late Holocene: A Record from Shira Lake Resolved by Decade. *Doklady Earth Sciences* 518: 1–6. DOI: [10.1134/S1028334X2460316X](https://doi.org/10.1134/S1028334X2460316X)
- Bezrukova E.V., Tarasov P.E., Solovieva N. et al. 2010. Last glacial-interglacial vegetation and environmental dynamics in southern Siberia: Chronology, forcing and feedbacks. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 296: 185–198. DOI: [10.1016/j.palaeo.2010.07.020](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.07.020)
- Brassell S.C., Eglinton G., Marlowe I.T. et al. 1986. Molecular stratigraphy: a new tool for climate assessment. *Nature* 320: 129–133.
- Bulkhin A.O., Zykov V.V., Marchenko D.N. et al. 2024. Long-Chain Alkenones in Sediments of Lake Utichye-3 (Southern Siberia, Khakassia) as a Paleo-Indicator of Climate Change. *Contemporary Problems of Ecology* 17(3): 412–423. DOI: [10.1134/S1995425524700185](https://doi.org/10.1134/S1995425524700185)
- Bulkhin A.O., Zykov V.V., Marchenko D.N. et al. 2023. Long-chain alkenones in the lake sediments of North-Minusinsk Valley (southern Siberia): implications for paleo-

climate reconstructions. *Organic Geochemistry* 176: 104541. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2022.104541](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2022.104541)

Chu G., Sun Q., Li S. et al. 2005. Long-chain alkenone distributions and temperature dependence in lacustrine surface sediments from China. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69(21): 4985–5003. DOI: [10.1016/j.gca.2005.04.008](https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.04.008)

De Deckker P., Forester R.M. 1988. The use of ostracods to reconstruct continental palaeoenvironmental records. In: De Deckker P., Colin J.P., Peyrouquet J.P. (Eds.), *Ostracoda in the Earth Sciences*. Amsterdam: Elsevier, pp. 175–199.

de Leeuw J.W., v.d. Meer F.W., Rijpstra W.I.C. et al. 1980. On the occurrence and structural identification of long chain unsaturated ketones and hydrocarbons in sediments. *Physics and Chemistry of the Earth* 12: 211–217. DOI: [10.1016/0079-1946\(79\)90105-8](https://doi.org/10.1016/0079-1946(79)90105-8)

He Y., Wang H., Meng B. et al. 2020. Appraisal of alkenone- and archaeal ether-based salinity indicators in mid-latitude Asian lakes. *Earth and Planetary Science Letters* 538: 116236. DOI: [10.1016/j.epsl.2020.116236](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116236)

Last W.M., Ginn F.M. 2005. Saline systems of the Great Plains of western Canada: an overview of the limnogeology and paleolimnology. *Saline Systems* 1(1): 1–38. DOI: [10.1186/1746-1448-1-10](https://doi.org/10.1186/1746-1448-1-10)

Longo W.M., Huang Y., Yao Y. et al. 2018. Widespread occurrence of distinct alkenones from Group I haptophytes in freshwater lakes: Implications for paleotemperature and paleoenvironmental reconstructions. *Earth and Planetary Science Letters* 492: 239–250. DOI: [10.1016/j.epsl.2018.04.002](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.002)

Longo W.M., Theroux S., Giblin A.E. et al. 2016. Temperature calibration and phylogenetically distinct distributions for freshwater alkenones: Evidence from northern Alaskan lakes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 180: 177–196. DOI: [10.1016/j.gca.2016.02.019](https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.02.019)

Marlowe I.T., Green J.C., Neal A.C. et al. 1984. Long chain (n-c37-c39) alkenones in the prymnesiophyceae. distribution of alkenones and other lipids and their taxonomic significance. *British Phycological Journal* 19(3): 203–216. DOI: [10.1080/00071618400650221](https://doi.org/10.1080/00071618400650221)

Müller P.J., Kirst G., Ruhland G. et al. 1998. Calibration of the alkenone paleotemperature index U_{37K} based on core-tops from the eastern South Atlantic and the global ocean (60°N–60°S). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62(10): 1757–1772.

Novenko E.Y., Rudenko O.V., Mazei N.G. et al. 2022. Late Holocene vegetation and fire history in Western Putorana Plateau (subarctic Siberia, Russia). *The Holocene* 32(5): 433–441. DOI: [10.1177/09596836221074034](https://doi.org/10.1177/09596836221074034)

Plancq J., Cavazzin B., Juggins S. et al. 2018. Assessing environmental controls on the distribution of long-chain alkenones in the Canadian Prairies. *Organic Geochemistry* 117: 43–55. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2017.12.005](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2017.12.005)

Rogozin D.Y., Zykov V.V., Ivanova E.A. et al. 2018. Meromixis and seasonal dynamics of vertical structure of Lake Uchum (South Siberia). *Contemporary Problems of Ecology* 11(2): 195–206. DOI: [10.1134/S1995425518020117](https://doi.org/10.1134/S1995425518020117)

Rogozin D.Y., Genova S.V., Gulati R.D. et al. 2010. Some generalizations on stratification and vertical mixing in meromictic Lake Shira, Russia, in the period 2002–2009. *Aquatic Ecology* 44(3): 485–496. DOI: [10.1007/s10452-010-9328-6](https://doi.org/10.1007/s10452-010-9328-6)

Rontani J.F., Prahll F.G., Volkman J.K. 2006. Characterization of unusual alkenones and alkyl alkenoates by electron ionization gas chromatography/mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 20(4): 583–588. DOI: [10.1002/rcm.2346](https://doi.org/10.1002/rcm.2346)

Rudaya N., Krivonogov S., Słowiński M. et al. 2020. Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity. *Quaternary Science Reviews* 249: 106616. DOI: [10.1016/j.quascirev.2020.106616](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106616)

Song M., Zhou A., He Y. et al. 2016. Environmental controls on long-chain alkenone occurrence and compositional patterns in lacustrine sediments, northwestern China. *Organic Geochemistry* 91: 43–53. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2015.10.009](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2015.10.009)

Theroux S., Huang Y., Toney J.L. et al. 2020. Successional blooms of alkenone-producing haptophytes in Lake George, North Dakota: Implications for continental paleoclimate reconstructions. *Limnology and Oceanography* 65(2): 413–425. DOI: [10.1002/lno.11311](https://doi.org/10.1002/lno.11311)

Toney J.L., Huang Y., Fritz S.C. et al. 2010. Climatic and Environmental Controls on the Occurrence and Distributions of Long Chain Alkenones in Lakes of the Interior United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74: 1563–1578. DOI: [10.1016/j.gca.2009.11.021](https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.11.021)

Zhao C., Yu Z., Zhao Y. et al. 2010. Holocene millennial-scale climate variations documented by multiple lake-level proxies in sediment cores from Hurler Lake, Northwest China. *J. Paleolimnol* 44: 995–1008. DOI: [10.1007/s10933-010-9469-6](https://doi.org/10.1007/s10933-010-9469-6)

Zhao J., An C., Longo W.M. et al. 2014. Occurrence of extended chain length C41 and C42 alkenones in hypersaline lakes. *Organic Geochemistry* 75: 48–53. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2014.06.006](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2014.06.006)

Zykov V.V., Rogozin D.Y., Kalugin I.A. et al. 2012. Carotenoids in Bottom Sediments of Lake Shira as a Paleo Indicator for the Reconstruction of the State of the Lake (Russia, Khakasiya). *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]* 19(4): 585–595. (in Russian)

Полиненасыщенные длинноцепочечные алкеноны в донных отложениях меромиктического озера Шира (Юг Сибири) как палео-индикатор климатических изменений

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYБульхин А.О.^{1*}, Зыков В.В.¹, Рогозин Д.Ю.^{1,2}, Безрукова Е.В.³¹ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН», обособленное подразделение Институт биофизики СО РАН, ул. Академгородок 50 стр.50, Красноярск, 660036, Россия² Сибирский Федеральный Университет (СФУ), пр. Свободный 79, Красноярский край, Красноярск, 660041, Россия³ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, ул. Фаворского, 1А, Иркутск, 66403, Россия

АННОТАЦИЯ. Для понимания долгосрочных климатических изменений и их связи с современным глобальным потеплением в данной работе был проанализирован состав длинноцепочечных алкенонов в донных отложениях озера Шира (Северо-Минусинская котловина) за последние 3000 лет. В кернах ICE2023, Shira-I-21 и Shira-II-21 методом газовой хромато-масс-спектрометрии выявлены метил- и этил-алкеноны, преимущественно C₃₇ и C₃₈, с двойными связями от двух до четырёх. Вертикальные профили демонстрируют значительные колебания общей концентрации (1-355 мкг/г), вероятно связанные с изменением уровня воды, солёности и условий сохранности органики. Пики алкенонов совпадают со светлыми (карбонатными) слоями, отражающими фазы падения уровня и повышения солёности. Высокие концентрации алкенонов в глинистых частях керна могут указывать на их лучшую адсорбцию и консервацию. Результаты подтверждают потенциал длинноцепочечных алкенонов в качестве прокси палео-солёности и, следовательно, палео-влажности в аридных регионах Сибири.

Ключевые слова: длинноцепочечные алкеноны, индикатор солёности, донные отложения, гаптофитовые водоросли, Южная Сибирь, палеоклиматология

Для цитирования: Бульхин А.О., Зыков В.В., Рогозин Д.Ю., Безрукова Е.В. Полиненасыщенные длинноцепочечные алкеноны в донных отложениях меромиктического озера Шира (Юг Сибири) как палео-индикатор климатических изменений // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 824-833. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-824

1. Введение

Для понимания взаимосвязи между современным глобальным потеплением и естественными колебаниями климата необходимо знать, как происходили изменения климата за последние тысячелетия. Изучение климатических изменений Азии – актуальное направление палеоклиматических исследований. Однако недостаточно изучены климатические флуктуации в Сибири (Bezrukova et al., 2010; Rudaya et al., 2020; Novenko et al., 2022). Минусинская котловина вызывает особый интерес для исследования палеоклимата, так как, расположенная в условиях степной зоны юга Сибири и окружена горными хребтами, которые препятствуют проникновению влажного воздуха благодаря чему на ней сформировался полуаридный микроклимат,

который является более мягким по сравнению с окружающей территорией. В засушливых и полувлажных регионах бессточные озера чувствительны к балансу осадков и испарения, что отражается в изменении объема воды и солёности (Last and Ginn, 2005). Донные отложения водоемов являются ценным источником информации о прошлом экосистем. Реконструируя хронологию солёности по донным отложениям таких озер можно получить значимую информацию об изменениях общей влажности и гидрологических условий в прошлом. На сегодняшний день не существует универсальных и надежных индикаторов солёности. Предлагаемые прокси, такие как содержание и изотопный состав карбонатов в озерных отложениях, могут подвергаться влиянию терригенного материала (Zhao et al., 2010). Составы остракод и диатомей (De Deckker

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: bulkhinlive@yandex.ru (А.О. Бульхин)

Поступила: 31 июля 2025; **Принята:** 15 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

© Автор(ы) 2025. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



and Forester, 1988) потенциально отражают колебания солености, но использование данного подхода требует хорошей сохранности органических остатков, что затруднено в озерах умеренных широт Азии из-за нестабильной гидрологической обстановки. Поэтому разработка новых индикаторов солености с более широким спектром применения является актуальной задачей палеолимнологических исследований.

В настоящее время все большее значение приобретают молекулярные подходы, позволяющие исследовать органические соединения, которые способны сохраняться в донных осадках на протяжении многих столетий. В качестве новых и перспективных термо- и солечувствительных палео-индикаторов могут служить полиненасыщенные длинноцепочечные алкеноны (C_{37} - C_{42}), которые хорошо сохраняются в донных отложениях на протяжении тысячелетий и являются продуктами жизнедеятельности представителей гаптофитовых водорослей порядка Isochrysidales (Zhao et al., 2014; Longo et al., 2016; 2018; Bulkhin et al., 2023). Изначально, длинноцепочечные алкеноны зарекомендовали себя как надежный биоиндикатор для реконструкций палеотемпературы поверхности мирового океана (Brassell et al., 1986; Müller et al., 1998), однако подобные температурные реконструкции для континентальных озер оказались затруднены из-за одновременного присутствия нескольких видов гаптофитовых водорослей с различающимся откликом на внешнюю температуру (Araie et al., 2018; Theroux et al., 2020). Тем не менее, в настоящее время ведутся исследования по поиску прокси палео-солености на основе алкенонов в озерных средах (Chu et al., 2005; Zhao et al., 2014; Song et al., 2016; He et al., 2020). В изучении верхних осадков 22 озер на территории Северо-Минусинской котловины было показано, что зависимость общей концентрации алкенонов от солености имеет унимодальную форму, что может быть использовано в качестве качественного маркера переходов через критическое значение солености 20 г л^{-1} (Bulkhin et al., 2023), также данная закономерность прослеживалась и в исследованиях донных отложений озера Утичье-3, с положительной корреляцией средней длины цепи алкенонов (СДЦ) с соленостью (Bulkhin et al., 2024). В 2021 г сотрудниками Института геохимии им. Виноградова были взяты несколько кернов с оз. Шира длиной около 1.5 м и глубже (Bezrukova et al., 2024), что позволяет провести анализ алкенонов в керне возрастом около 3 тыс. лет.

Таким образом целью настоящей работы стало проанализировать состав длинноцепочечных алкенонов в донных отложениях озера Шира, а также дать оценку возможности использования длинноцепочечных алкенонов в качестве индикаторов палео-солености с целью реконструкции влажности в регионе Северо-Минусинской котловины.

2. Методы

Сотрудники Института геохимии им. А.П. Виноградова в 2021 году отобрали два керна из

озера Шира: Shira-I-21 (159 см) с использованием пробоотборника Uwitec (Австрия) и Shira-II-21 (244 см) с помощью буровой установки. В данной работе использована нижняя часть второго керна (146 см). Образцы из Shira-I-21 отбирались с шагом 5 см, а из Shira-II-21 отбирались выборочно, с признаками резких изменений в озере (белые и черные слои). В марте 2023 года был отобран керн ICE2023 (примерно 40 см) с помощью пробоотборника-намораживателя, разработанного в Институте биофизики СО РАН. Из керна выпилили два вертикальных параллельных бруска размером около $3 \times 3 \text{ см}$, которые затем разрезали по глубине с интервалом 1 см при помощи, раскалённой нихромовой нити. Один из брусков использовали для определения содержания алкенонов.

Сотрудниками Института геохимии им. Виноградова методом ^{14}C была осуществлена датировка керна донных отложений озера Шира длиной 146 см (Bezrukova et al., 2024). По характерным цветным слоям датировка данного керна была распространена на керна Shira-I-21 и Shira-II-21. Для определения возраста ледового керна были использованы характерные белые слои у ранее изученных кернов донных отложений озера Шира (Зыков и др., 2012).

Перед анализами все образцы донных отложений были высушены с помощью лиофильной сушилки АК 4-50 («ПроФЛаб») при давлении 0.2 мбар и температурой подогрева 40°C . Процесс лиофильной сушки продолжался примерно 12 часов.

В аналитической лаборатории Института Биофизики СО РАН высушенные образцы массой около 0.4-0.5 г из замороженного керна ICE2023 (40.5 см), 0.4-1 г из керна Shira-I-21 длиной 159 см (33 шт.), 1-2 г из керна Shira-II-21 длиной 146 см (67 шт) экстрагировали 24 часа при комнатной температуре смесью хлороформа и метанола (7:3, v/v) с добавлением 50 мкл гексатриаконтана (C_{36}) в качестве внутреннего стандарта. После пробы фильтровали, испаряли и подвергали 1 ч омылению при температуре 90°C (5 мл 6% KOH). Затем в колбы добавляли 10 мл дистиллированной воды и 5 мл гексана и тщательно перемешивали. Объединенные гексановые экстракты трижды промывали водой и пропускали через безводный сернокислый натрий и затем выпаривали.

Неомыляемые компоненты делили на ГХ-МС 7890/5975C (Agilent Technologies, США) с капиллярной колонкой VF-200MS ($60 \text{ м} \times 250 \text{ мкм} \times 0.10 \text{ мкм}$). Расход гелия, используемого в качестве газа-носителя, составлял 1.2 мл мин^{-1} , ввод пробы производился в режиме деления потока (Split), температура инжектора 260°C . Температура интерфейса составляла 230°C , температура источника ионов 150°C , энергия ионизации детектора – 70 эВ, сканирование фрагментов атомной массы от 30 до 700 ам при 0.5 с скан^{-1} . Начальная температура 60°C с подъемом $20^\circ\text{C мин}^{-1}$ до 255°C , затем последующее повышение температуры до 285°C со скоростью 5°C мин^{-1} , затем подъем температуры до 320°C со скоростью нагрева 2°C мин^{-1} и 10 минут в изотермальном режиме.

Пики алкенонов идентифицировались на основе известных молекулярных масс соединений, соотношения массы к заряду базового пика и характерных ионов, а также путём сопоставления полученных масс-спектров с опубликованными литературными данными (de Leeuw et al., 1980; Marlowe et al., 1984; Rontani et al., 2006).

3. Результаты и обсуждение

Во всех отобранных кернах донных отложений озера Шира (ICE2023, Shira-I-21, Shira-II-21) были детектированы длинноцепочечные алкеноны C_{37} - C_{40} с количеством двойных связей от 2-х до 4-х. Алкеноны C_{37} и C_{39} были представлены метил-кетонами, а C_{38} и C_{40} – этил-кетонами. Основной состав алкенонов в кернах был представлен C_{37} и C_{38} алкенонами, в то время как C_{39} и C_{40} встречались в меньших количествах. Относительное распределение алкенонов в кернах как правило демонстрировало преобладание C_{37} . Обычно, там, где детектируются алкеноны C_{39} – детектировались и алкеноны C_{40} , всего в 38 образцах и чаще с 3-мя и 2-мя двойными связями. Состав алкенонов является типичным для соленых озёр умеренных широт (Рис. 1) (Plancq et al., 2018; He et al., 2020).

Анализ вертикального профиля алкенонов в исследованных кернах показывает заметные изменения в концентрациях длинноцепочечных алкенонов за разные периоды формирования донных отложений, что может говорить об отклике гаптофитовых водорослей на изменяющиеся внешние условия при которых происходило захоронение алкенонов в водоёме, связанных как с режимом циркуляции, так и с температурой и химическим составом воды

(Toney et al., 2010; Plancq et al., 2018) (Рис. 2). Общее содержание алкенонов в кернах варьировало в широких пределах от 1 мкг/г до 355 мкг/г (Рис. 2). Некоторое несовпадение концентраций алкенонов в образцах исследованных кернов, может быть объяснено разными условиями на этапе пробоподготовки. При пробоподготовке керна Shira-I-21 (159 см) использовалось меньшее по массе количество образца. Так же здесь может влиять фактор места пробоотбора. Керна Shira-I-21 мог быть отобран в месте скопления осаждаемого материала, а так как алкенон-продуценты являются только одной из групп микроорганизмов озера при возрастании содержания органического вещества их концентрация в расчёте на сухой вес и LOI_{550} будет снижаться. Однако в кернах сохранились общие тенденции на повышение и понижение общего содержания алкенонов (102-160 см, Рис. 2 Б). В верхней части керна ICE2023 наблюдалось повышенное содержание алкенонов около 190 мкг/г на глубинах от 7-8 до 10-11 см, соответствующем последним 100-150 годам. Подобная закономерность прослеживалась и в кернах Shira-I-21 (Рис. 2). Такие вариации могут свидетельствовать о том, что в этот период происходили изменения в осадкообразовании, влияющие на продукцию и сохранность алкенонов. Известно, что в своей истории озеро демонстрировало существенные колебания уровня воды. Так, в период с 1910-х до 1930-х годов, соответствующим примерно 7-10 см (Рис. 2 А), все бессточные озёра Северо-Минусинской котловины переживали фазу усыхания до минимальных значений, за которой последовал резкий подъём почти до современного уровня (Rogozin et al., 2010; Rogozin et al., 2018). Приток воды усиливал меромиксию, что могло бла-

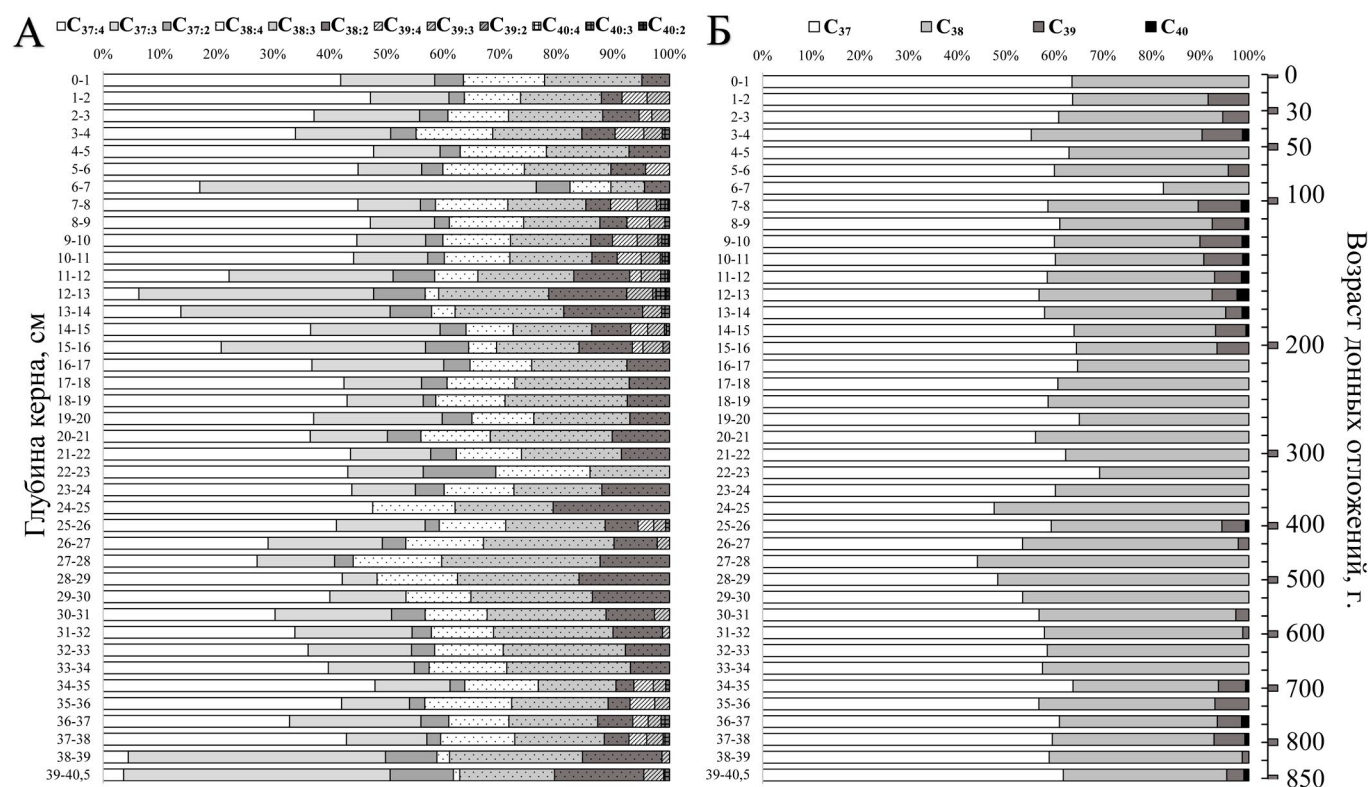


Рис.1. Относительное распределение алкенонов в оз. Шира на примере керна ICE2023 длиной 40.5 см. А – распределение всех алкенонов. Б – суммарное распределение алкенонов C_{37} , C_{38} , C_{39} , C_{40} .

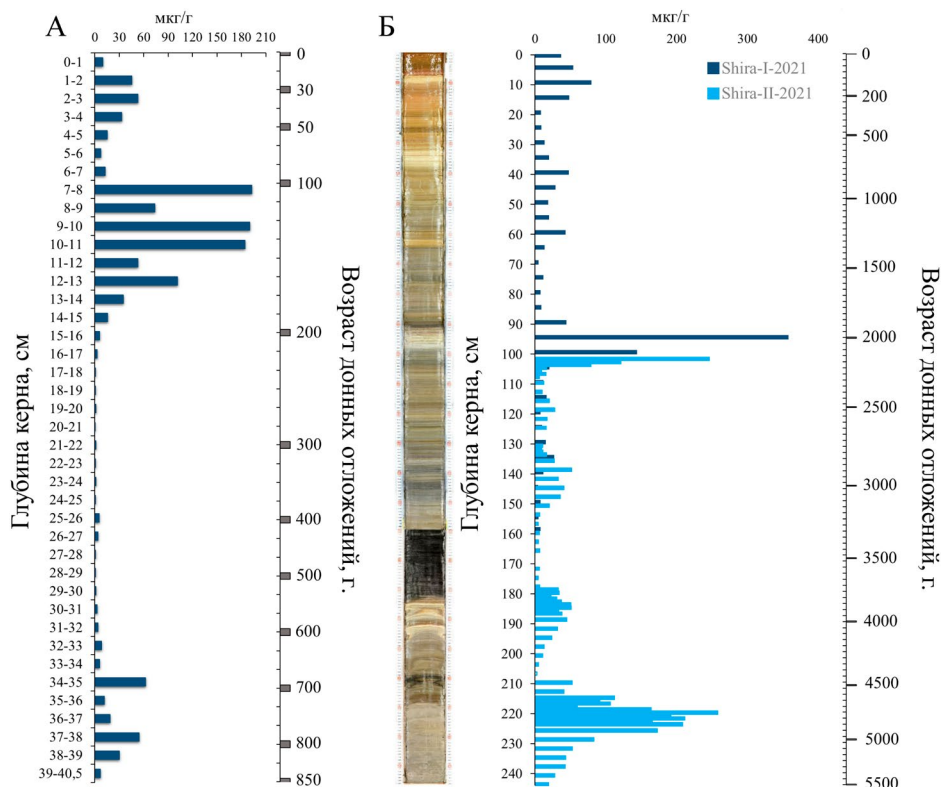


Рис.2. Вертикальное распределение общего количества алкенонов. А – количественное распределение алкенонов в замороженном керне ICE2023 (40.5 см). Б – количественное распределение алкенонов в состыкованных кернах Shira-I-21 и Shira II-21.

гоприятно сказать на сохранности алкенонов и объяснить подобное распределение общего содержания алкенонов. Также на данном участке керна, заметен светлый слой (карбонатные слои) (Рис. 2 Б), сформировавшейся из-за падения уровня воды и, следственно, повышение солености водной среды и/или изменение видового состава алкенон-продуцентов также могло дать объяснение повышенным концентрациям длинноцепочечных алкенонов.

Подобные контрастные пики были зафиксированы и на глубине керна 34-39 см около 650-820 лет назад, которые были повторно детектированы и в верхней части керна Shira-I-21 (Рис. 2 Б) и тоже соответствовали светлым слоям керна. Схожие ситуации прослеживались и далее на глубине 94-102 см, где был обнаружен максимум общего содержания алкенонов до 355 мкг/г (около 2000 лет назад), на 138-148 см и 178-189 см. Важно отметить, что с повышением общей концентрации алкенонов в образцах наблюдался рост цепи алкенонов до C_{40} . Дополнительно, в нижней части керна Shira-II-21 на участке 220-230 см наблюдаются большие концентрации алкенонов до 256 мкг/г (Рис. 2 Б). Предварительно, это можно объяснить скоплением массивных глин начиная с 220 см (примерно 4750 лет назад) и до самого низа керна. Известно, что органические вещества, адсорбированные на глинистых поверхностях в водоемах менее подвержены разложению. В стратифицированном соленом озере, где придонные воды могут стать бескислородными, сочетание связующей глины и низкого содержания кислорода могут значительно способствовать сохранению алкенонов. Следовательно, появляется возможность предполагать, что повы-

шенное содержание алкенонов в кернах соленых озер, испытывающих резкие колебания уровня воды может указывать на изменения солености и, следовательно, являться палео-индикатором влажности климата прилегающих территорий.

4. Выводы

В донных отложениях озера Шира (керны ICE2023, Shira-I-21, Shira-II-21) достоверно детектированы длинноцепочечные алкеноны C_{37} - C_{40} . Общая концентрация алкенонов варьировала в широких пределах (1-355 мкг/г), демонстрируя чётко выраженные пики в «светлых» карбонатных и глинистых слоях. Данные пики соответствовали интервалам понижения уровня воды (1910-1930-е гг.) и более древним глинистым отложениям (~2000 и ~4750 лет назад). Сопоставление профилей алкенонов с литологией свидетельствует о том, что их накопление максимизируется в периоды засухи и роста солёности озера, возможно, когда после притока воды усиливаются анаэробные условия придонных вод и повышается сохранность органических соединений. Также, хорошей консервации алкенонов могли способствовать глинистые отложения. Обнаруженные закономерности в распределении концентраций алкенонов в связке с литологическими изменениями подтверждают их потенциал в качестве качественного маркера палео-солености. Таким образом было показано, что профиль длинноцепочечных алкенонов в керне озера Шира возможно использовать для оценки палео-влажности на территории Северо-Минусинской котловины.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, грант № 22-17-00185-П, <https://rscf.ru/en/project/22-17-00185-П/>.

Конфликт интересов

Авторы не имеют конфликта интересов.

Список литературы

Зыков В.В., Рогозин Д.Ю., Калугин И.А. и др. 2012. Каротиноиды в донных отложениях озера Шира как палеоиндикатор для реконструкции состояния озера (Россия, Хакасия). *Сибирский экологический журнал* 19(4): 585–595.

Araie H., Nakamura H., Toney J.L. et al. 2018. Novel alkenone-producing strains of genus *Isochrysis* (Haptophyta) isolated from Canadian saline lakes show temperature sensitivity of alkenones and alkenoates. *Organic Geochemistry* 121: 89–103. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2018.04.008](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2018.04.008)

Bezrukova E.V., Reshetova S.A., Kulagina N.V. et al. 2024. Vegetation and Climate in the North of the Minusinsk Basin in the Late Holocene: A Record from Shira Lake Resolved by Decade. *Doklady Earth Sciences* 518: 1–6. DOI: [10.1134/S1028334X2460316X](https://doi.org/10.1134/S1028334X2460316X)

Bezrukova E.V., Tarasov P.E., Solovieva N. et al. 2010. Last glacial-interglacial vegetation and environmental dynamics in southern Siberia: Chronology, forcing and feedbacks. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 296: 185–198. DOI: [10.1016/j.palaeo.2010.07.020](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.07.020)

Brassell S.C., Eglinton G., Marlowe I.T. et al. 1986. Molecular stratigraphy: a new tool for climate assessment. *Nature* 320: 129–133.

Bulkhin A.O., Zikov V.V., Marchenko D.N. et al. 2024. Long-Chain Alkenones in Sediments of Lake Utichye-3 (Southern Siberia, Khakassia) as a Paleo-Indicator of Climate Change. *Contemporary Problems of Ecology* 17(3): 412–423. DOI: [10.1134/S1995425524700185](https://doi.org/10.1134/S1995425524700185)

Bulkhin A.O., Zikov V.V., Marchenko D.N. et al. 2023. Long-chain alkenones in the lake sediments of North-Minusinsk Valley (southern Siberia): implications for paleoclimate reconstructions. *Organic Geochemistry* 176: 104541. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2022.104541](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2022.104541)

Chu G., Sun Q., Li S. et al. 2005. Long-chain alkenone distributions and temperature dependence in lacustrine surface sediments from China. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69(21): 4985–5003. DOI: [10.1016/j.gca.2005.04.008](https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.04.008)

De Deckker P., Forester R.M. 1988. The use of ostracods to reconstruct continental palaeoenvironmental records. In: De Deckker P., Colin J.P., Peyrouquet J.P. (Eds.), *Ostracoda in the Earth Sciences*. Amsterdam: Elsevier, pp. 175–199.

de Leeuw J.W., v.d. Meer F.W., Rijpstra W.I.C. et al. 1980. On the occurrence and structural identification of long chain unsaturated ketones and hydrocarbons in sediments. *Physics and Chemistry of the Earth* 12: 211–217. DOI: [10.1016/0079-1946\(79\)90105-8](https://doi.org/10.1016/0079-1946(79)90105-8)

He Y., Wang H., Meng B. et al. 2020. Appraisal of alkenone- and archaeal ether-based salinity indicators in mid-latitude Asian lakes. *Earth and Planetary Science Letters* 538: 116236. DOI: [10.1016/j.epsl.2020.116236](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116236)

Last W.M., Ginn F.M. 2005. Saline systems of the Great Plains of western Canada: an overview of the limnogeology and paleolimnology. *Saline Systems* 1(1): 1–38. DOI: [10.1186/1746-1448-1-10](https://doi.org/10.1186/1746-1448-1-10)

Longo W.M., Huang Y., Yao Y. et al. 2018. Widespread occurrence of distinct alkenones from Group I haptophytes in

freshwater lakes: Implications for paleotemperature and paleoenvironmental reconstructions. *Earth and Planetary Science Letters* 492: 239–250. DOI: [10.1016/j.epsl.2018.04.002](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.002)

Longo W.M., Theroux S., Giblin A.E. et al. 2016. Temperature calibration and phylogenetically distinct distributions for freshwater alkenones: Evidence from northern Alaskan lakes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 180: 177–196. DOI: [10.1016/j.gca.2016.02.019](https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.02.019)

Marlowe I.T., Green J.C., Neal A.C. et al. 1984. Long chain (n-c37-c39) alkenones in the prymnesiophyceae. distribution of alkenones and other lipids and their taxonomic significance. *British Phycological Journal* 19(3): 203–216. DOI: [10.1080/00071618400650221](https://doi.org/10.1080/00071618400650221)

Müller P.J., Kirst G., Ruhland G. et al. 1998. Calibration of the alkenone paleotemperature index U_{37K} based on core-tops from the eastern South Atlantic and the global ocean (60°N–60°S). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62(10): 1757–1772.

Novenko E.Y., Rudenko O.V., Mazei N.G. et al. 2022. Late Holocene vegetation and fire history in Western Putorana Plateau (subarctic Siberia, Russia). *The Holocene* 32(5): 433–441. DOI: [10.1177/09596836221074034](https://doi.org/10.1177/09596836221074034)

Plancq J., Cavazzin B., Juggins S. et al. 2018. Assessing environmental controls on the distribution of long-chain alkenones in the Canadian Prairies. *Organic Geochemistry* 117: 43–55. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2017.12.005](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2017.12.005)

Rogozin D.Y., Zikov V.V., Ivanova E.A. et al. 2018. Meromixis and seasonal dynamics of vertical structure of Lake Uchum (South Siberia). *Contemporary Problems of Ecology* 11(2): 195–206. DOI: [10.1134/S1995425518020117](https://doi.org/10.1134/S1995425518020117)

Rogozin D.Y., Genova S.V., Gulati R.D. et al. 2010. Some generalizations on stratification and vertical mixing in meromictic Lake Shira, Russia, in the period 2002–2009. *Aquatic Ecology* 44(3): 485–496. DOI: [10.1007/s10452-010-9328-6](https://doi.org/10.1007/s10452-010-9328-6)

Rontani J.F., Prah F.G., Volkman J.K. 2006. Characterization of unusual alkenones and alkyl alkenoates by electron ionization gas chromatography/mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 20(4): 583–588. DOI: [10.1002/rcm.2346](https://doi.org/10.1002/rcm.2346)

Rudaya N., Krivonogov S., Słowiński M. et al. 2020. Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity. *Quaternary Science Reviews* 249: 106616. DOI: [10.1016/j.quascirev.2020.106616](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106616)

Song M., Zhou A., He Y. et al. 2016. Environmental controls on long-chain alkenone occurrence and compositional patterns in lacustrine sediments, northwestern China. *Organic Geochemistry* 91: 43–53. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2015.10.009](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2015.10.009)

Theroux S., Huang Y., Toney J.L. et al. 2020. Successional blooms of alkenone-producing haptophytes in Lake George, North Dakota: Implications for continental paleoclimate reconstructions. *Limnology and Oceanography* 65(2): 413–425. DOI: [10.1002/lno.11311](https://doi.org/10.1002/lno.11311)

Toney J.L., Huang Y., Fritz S.C. et al. 2010. Climatic and Environmental Controls on the Occurrence and Distributions of Long Chain Alkenones in Lakes of the Interior United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74: 1563–1578. DOI: [10.1016/j.gca.2009.11.021](https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.11.021)

Zhao C., Yu Z., Zhao Y. et al. 2010. Holocene millennial-scale climate variations documented by multiple lake-level proxies in sediment cores from Hurler Lake, Northwest China. *J. Paleolimnol* 44: 995–1008. DOI: [10.1007/s10933-010-9469-6](https://doi.org/10.1007/s10933-010-9469-6)

Zhao J., An C., Longo W.M. et al. 2014. Occurrence of extended chain length C41 and C42 alkenones in hypersaline lakes. *Organic Geochemistry* 75: 48–53. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2014.06.006](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2014.06.006)