

Fossil cladoceran record from Lake Beloe in the Altai region (Western Siberia) during the late Holocene



Frolova L.A.^{1,2*}, Nigmatullin N.M.¹, Ibragimova A.G.¹, Li H.C.³, Nurgaliev D.K.¹

¹Kazan Federal University, Kremlyovskaya Str., 4/5, Kazan, 420008, Russia

²Institute of archaeology and ethnography of the Russian Academy of Sciences, Acad. Lavrentiev Avenue 17, Novosibirsk, 630090, Russia

³Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan, POC

ABSTRACT. An analysis of subfossil Cladocera in a 193-cm sediment core from Lake Beloe (Altai region) was conducted to trace the history of limnological conditions in the lake over the past 4600 years. Currently, a total of 34 Cladocera taxa were identified in the taphocenosis. The greatest cladoceran species richness was observed among littoral forms of Cladocera, reflecting the presence of shallow areas overgrown with macrophytes. The highest concentration of cladoceran remains was observed in the lower horizons of the core (150-191 cm, 3600-4600 cal yr BP). In this zone, the highest values of Hill indices are recorded, indicating high taxonomic diversity in the community. At a depth of 141 cm (3500 cal yr BP), significant changes in community structure occur, with *Chydorus* cf. *sphaericus* beginning to dominate. Taxonomic diversity of Cladocera noticeably increases in the upper part of the core.

Keywords: paleoecology, Altai region, subfossil Cladocera

For citation: Frolova L.A., Nigmatullin N.M., Ibragimova A.G., Li H.C., Nurgaliev D.K. Fossil cladoceran record from Lake Beloe in the Altai region (Western Siberia) during the late Holocene // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 346-351. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-346

1. Introduction

Cladocera (Crustacea: Branchiopoda) are benthic and planktonic microcrustaceans playing a key role in freshwater ecosystems worldwide (Nevalainen et al., 2011). Lake sediments typically contain natural archives of zooplankton remains, including Cladocera, offering an excellent opportunity to study past communities (Battarbee, 2000). The most common fossilized remains in lake sediments are fragments of Cladocera exoskeletons (Frolova et al., 2018). Subfossil Cladocera remains have become reliable ecological indicators for freshwater ecosystems and have been frequently used in paleolimnological reconstructions in recent decades (Frolova et al., 2014; Nigmatullin et al., 2021). Combined with the widely used palynological (Nigamatzyanova et al., 2020) and diatom (Valieva et al., 2020) analyses, the use of cladoceran remains in sediment cores allows for the most comprehensive reconstruction of the paleoecological conditions of a region. The aim of this study is to examine the changes in the subfossil Cladocera community in a sediment core from Lake Beloe (Altai region) to identify the characteristics of the formation and development of the lake and its paleoecological conditions.

*Corresponding author.

E-mail address: larissa.frolova@kpfu.ru (L.A. Frolova)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

2. Materials and Methods

During the summer research expedition in 2022, paleoecological studies were conducted at Beloe Lake (51°17.420' E 082°39.100' N) in the Altai Krai region. There was abundant development of macrophytes along the shores of the lake. Using a UVITEC gravity corer (Austria), a 193 cm long sediment core, labeled 22-Bel-01 C, was collected from the maximum depth of the lake. The analysis of subfossil Cladocera was carried out according to standard methods (Korhola and Rautio, 2001). Identification keys for Cladocera in sediments and zooplankton were used (Szeroczyńska and Sarmaja-Korjonen, 2007; Kotov et al., 2010; Korovchinskii et al., 2021). Ecological zones in the sediment core were distinguished using CONISS cluster analysis in the Tilia 3.0.1 software. The richness and diversity of cladoceran were calculated as the effective taxon numbers N0 (total taxa richness), N1 (common taxa richness), and N2 (dominant taxa richness) proposed by Hill (1973). Evenness (E) was calculated as the N2/N0 ratio (Hill, 1973).

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



3. Results and Discussion

The cladoceran analysis of the samples revealed 34 taxa of subfossil Cladocera from 8 families, with the highest diversity in the Chydoridae family (71%). In the lower part of the core, the maximum concentration of remains is observed, with a peak at 160-161 cm (4100 cal yr BP) (7.6 thousand ind./g), indicating favorable conditions for Cladocera during that period. Most of the identified subfossil remains belong to littoral-benthic forms of Cladocera. The dominant taxon was identified as *C. cf. sphaericus* (35.1%). Littoral taxa also reach significant numbers: *Alona quadrangularis*, *Alonella nana*, *Biapertura affinis*, *Acroperus harpae*, *Bosmina (Eubosmina) longispina* and *Alona guttata / Coronatella rectangula*. Among the conditionally planktonic group, the most numerous species was *Bosmina longirostris*, which can be abundant in both pelagic and littoral zones of the water body.

Four ecological zones are clearly distinguished in the sediment core. In zone I (150-191 cm, 3600-4600 cal yr BP), high species richness was recorded, primarily consisting of littoral organisms. The most abundant taxa in terms of remains were *B. longirostris* (25.6%) and *A. harpae* (19.3%). There is significant diversity among the benthic-phytophilic taxa: *A. nana*, *Sida crystallina*, *A. guttata / C. rectangula*, *C. cf. sphaericus*, *A. quadrangularis*, *Eurycercus* sp., *B. affinis*, and *A. excisa*. Presumably, the lake was highly productive and had a higher trophic status than it does today. In this zone, the highest values of Hill indices ($N_0 = 13.6$; $N_1 = 8.8$; $N_2 = 6.7$; $E = 0.49$) are recorded, indicating high species diversity during that period.

Zone II (90-141 cm, 2100-3600 cal yr BP) is characterized by a slight decrease in the taxonomic diversity of cladocerans (15 taxa identified). Significant changes are observed in the structure of the Cladocera community: the share of *C. cf. sphaericus* (54.0%) in the subfossil remains sharply increases, while the share of *A. harpae* critically decreases, and the share of *B. longirostris* also declines. We can assume that these community changes are related to some transformations in the littoral zone, which led to changes in the habitat conditions for benthic-phytophilic forms.

In Zone III (50-81 cm, 1200-2100 cal yr BP), while there is a slight decrease in the number of *C. cf. sphaericus* (46.5%) which still remains a dominant species in the assemblage, there is an increase in the remains of such taxa as *A. quadrangularis*, *B. affinis*, *B. longirostris*, and *A. nana*. The abundance of phytophilic taxa indicate the presence of macrophyte thickets in the littoral zone of the lake. An increase in the share of the taxon *B. longirostris* often indicates an increase in the trophic status of the water body.

The maximum taxonomic richness was recorded in the upper part of the core in Zone IV (0-46 cm, modern-1200 cal yr BP) (24 Cladocera taxa). This increase is primarily due to the rise in littoral-benthic forms of Cladocera. *C. cf. sphaericus* still dominates the community (35.3%). The increase in diversity of littoral taxa indicates higher productivity of the water body, which may be associated with anthropogenic impact.

4. Conclusions

The study revealed 34 taxa of subfossil Cladocera, with the greatest richness belonging to the Chydoridae family. The highest density of Cladocera remains (7.6 thousand ind./g) was registered at a depth of 160-161 cm (4100 cal yr BP), indicating optimal conditions for their development during this period. Littoral forms of cladocerans made the largest contribution to the taxonomic diversity. True planktonic taxa were represented by occasional findings, indicating a shallow depth of the water body throughout the studied period and a high degree of macrophyte development.

Acknowledgements

The work was carried out as part of the RSF project 22-47-08001. Thanks the NTUAMS Lab for chronology construction.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Battarbee R.W. 2000. Palaeolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record. *Quaternary Science Reviews* 19: 107–124. DOI: [10.1016/S0277-3791\(99\)00057-8](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00057-8)
- Frolova L., Nazarova L., Pestryakova L. et al. 2014. Subfossil Cladocera from surface sediment in thermokarst lakes in northeastern Siberia, Russia, in relation to limnological and climatic variables. *Journal of Paleolimnology* 52: 107-119. DOI: [10.1007/s10933-014-9781-7](https://doi.org/10.1007/s10933-014-9781-7)
- Frolova L., Nigmatullin N., Frolova A. 2018. Paleolimnological studies of tundra lakes in the Pechora delta (Nenets Autonomous Region, Russia). *Proceedings of 18th International multidisciplinary scientific Geoconference, SGEM 18*: 621-627. DOI: [10.5593/sgem2018/5.1/S20.080](https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.080)
- Hill M. 1973. Diversity and evenness: A unifying notation and its consequences. *Ecology* 54: 427–432.
- Korhola A., Rautio M. 2001. Cladocera and other branchiopod crustaceans. In: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M. (Eds.), *Tracking environmental change using lake sediments*. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 4: 125-165. DOI: [10.1007/0-306-47671-1_2](https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2)
- Korovchinskii N.M., Kotov A.A., Sinev A.Yu. et al. 2021. Water fleas (Crustacea: Cladocera) of Northern Eurasia. Moscow: Tov-vo. Nauchn. Izd. KMK. 2. (in Russian)
- Kotov A.A., Sinev A.Ju., Glagolev S.M. et al. 2010. Water fleas (Cladocera). In: *Identification key to zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia*. Moscow: Tov-vo. Nauchn. Izd. KMK. 1: 151-276. (in Russian)
- Nevalainen L., Sarmaja-Korjonen K., Luoto T.L. 2011. Sedimentary Cladocera as indicators of past water-level changes in shallow northern lakes. *Quaternary Research* 75: 430-437. DOI: [10.1016/j.yqres.2011.02.007](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.02.007)
- Nigmatzyanova G., Frolova L., Nigmatullin N. et al. 2020. Vegetation and climate changes in the Northeast European Russia (Nenets Autonomous Okrug, Russia). In: *20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Energy and Clean Technologies, SGEM 2020 4.1*: 547-552. DOI: [10.5593/sgem2020/4.1/s19.068](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.068)
- Nigmatullin N., Frolova A., Nigmatzyanova G. et al. 2021. Reconstruction of lacustrine environmental evolu-

tion using records of subfossil Cladocera from an unnamed lake in Western Siberia (Russia). In: Proceedings of 21th International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM. 4(19): 423-428. DOI: [10.5593/sgem2021/4.1/s19.54](https://doi.org/10.5593/sgem2021/4.1/s19.54)

Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. 2007. Atlas of subfossil Cladocera from central and northern Europe. Friends Lower Vistula Soc.

Valieva E., Frolova L., Nigamatzyanova G. et al. 2020. Diatoms in bottom sediments of the arctic lake in the Pechora River delta (Nenets Autonomous Okrug, Russia). In: 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Energy and Clean Technologies, SGEM 2020 4.1: 391-398. DOI: [10.5593/sgem2020/4.1/s19.049](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.049).

Субфоссильные кладоцерные сообщества донных отложений оз. Белое (Алтайский край, Сибирь) в позднем голоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYФролова Л.А.^{1,2*}, Нигматуллин Н.М.¹, Ибрагимова А.Г.¹,
Li H.C.³, Нургалиев Д.К.¹¹ Казанский федеральный университет, Ул. Кремлевская д. 4/5, Казань, 420008, Россия² Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН, пр. Академика Лаврентьева д. 17, Новосибирск, 630090, Россия³ Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan, ROC

АННОТАЦИЯ. Был выполнен анализ субфоссильных Cladocera в 193 см колонке донных отложений озера Белое (Алтайский край). В составе кладоцерных сообществ было идентифицировано 34 таксона ветвистоусых ракообразных. Оценка альфа разнообразия показала, что наибольшее видовое разнообразие наблюдалось в группе литоральных организмов, отражая представленность мелководных участков заросших макрофитами. Максимальная концентрация остатков кладоцер наблюдается в нижней части колонки ДО (150-191 см, 3600-4600 кал. л.н.). В этой же зоне регистрируются максимальные значения индексов Хилла, указывая на высокое таксономическое разнообразие в сообществе. На глубине 141 см (3500 кал. л.н.) происходят значительные изменения в структуре сообщества, где начинает доминировать *Chydorus cf. sphaericus*. Несколько увеличивается таксономическое разнообразие Cladocera в верхней части колонки.

Ключевые слова: палеоэкология, Алтайский край, субфоссильные Cladocera

Для цитирования: Фролова Л.А., Нигматуллин Н.М., Ибрагимова А.Г., Li H.C., Нургалиев Д.К. Субфоссильные кладоцерные сообщества донных отложений оз. Белое (Алтайский край, Сибирь) в позднем голоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 346-351. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-346

1. Введение

Cladocera (Crustacea: Branchiopoda) — это группа бентосных и планктонных микроракообразных, играющих ключевую роль в пресноводных экосистемах по всему миру (Nevalainen et al., 2011). Донные отложения озер обычно содержат естественный архив остатков зоопланктонных организмов, в том числе и кладоцер, что предоставляет прекрасную возможность для изучения сообществ, обитавших некогда в этом водоеме (Battarbee, 2000). Наиболее распространенными фоссилизированными остатками в озерных отложениях являются фрагменты экзоскелета кладоцер (Frolova et al., 2018). Остатки субфоссильных Cladocera стали надежными экологическими индикаторами для пресноводных экосистем и часто применяются в палеолимнологических реконструкциях в последние десятилетия (Frolova et al., 2014; Nigmatullin et al., 2021). В комплексе с широко распространенным палинологическим (Nigamatzyanova et al., 2020) и диатомовым (Valieva et al., 2020) анализами использование остатков кла-

доцер в донных отложениях позволяет нам провести наиболее полную реконструкцию палеоэкологических условий региона. Целью данной работы является изучение изменений в сообществе субфоссильных Cladocera в колонке донных отложений из озера Белое (Алтайский край) для выявления особенностей формирования и развития водоема и его палеоэкологических условий.

2. Материал и методы

В ходе летней научно-исследовательской экспедиции в 2022 году на территории Алтайского края были проведены палеоэкологические исследования на озере Белое (N 51°17.420' E 082°39.100'N). При помощи гравитационного пробоотборника UVITEC (Австрия) была отобрана колонка 22-Bel-01 с донных отложений длиной 193 см с максимальной глубины озера. Анализ субфоссильных Cladocera был выполнен по стандартной методике (Korhola and Rautio, 2001). В работе были использованы опреде-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: larissa.frolova@kpfu.ru (Л.А. Фролова)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

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



лительные ключи для Cladocera в донных отложениях и в зоопланктоне (Szeroczyńska and Sarmaja-Korjonen, 2007; Kotov et al., 2010; Korovchinskii et al., 2021). Экологические зоны в колонке донных отложений были выделены при помощи кластерного анализа CONISS в программе Tilia 3.0.1. Богатство и разнообразие кладоцер были рассчитаны как производные от количества таксонов N0 (общее богатство таксонов), N1 (богатство обычных таксонов) и N2 (богатство доминирующих таксонов), предложенные Хиллом (Hill, 1973). Выравненность (E) была рассчитана как отношение N2/N0 (Hill, 1973).

3. Результаты и обсуждения

В результате кладоцерного анализа образцов было выявлено 34 таксона субфоссильных Cladocera из 8 семейств, где наибольшее разнообразие приходится на семейство Chydoridae (71%). В нижней части колонки наблюдается максимальная концентрация остатков, пик значений приходится на 160-161 см (4100 кал. л.н.) (7.6 тыс. экз./г), что может свидетельствовать о благоприятных условиях для развития Cladocera в указанный период. Большая часть обнаруженных субфоссильных остатков принадлежит литорально-бентосным формам кладоцер. В качестве доминантного таксона был выделен *C. cf. sphaericus* (35.1%). Второстепенными таксонами оказались такие литоральные формы как *Alona quadrangularis*, *Alonella nana*, *Biapertura affinis*, *Acroperus harpae*, *Bosmina (Eubosmina) longispina* и *Alona guttata / Coronatella rectangula*. Из условно планктонной группы наибольшее количество обнаруженных экземпляров принадлежит *Bosmina longirostris*, которая может обильно встречаться как в пелагической, так и в литоральной зоне водоема.

В колонке донных отложений четко выделяются четыре экологические зоны. В зоне I – (150-191 см, 3600-4600 кал. л.н.) зафиксировано высокое видовое богатство, обеспеченное в основном литоральными организмами. Наиболее обильными по количеству остатков были *B. longirostris* (25.6%) и *A. harpae* (19.3%). Большое разнообразие наблюдается в группе второстепенных таксонов: *A. nana*, *Sida crystallina*, *A. guttata / C. rectangula*, *C. cf. sphaericus*, *A. quadrangularis*, *Eurycercus sp.*, *B. affinis* и *A. excisa*. Предположительно водоем был высокопродуктивным и имел более высокий трофический статус, чем сегодня. В этой зоне регистрируются максимальные значения индексов Хилла (N0 = 13.6; N1 = 8.8; N2 = 6.7; E = 0.49), что указывает на высокое видовое разнообразие в тот период.

Зона II (90-141 см, 2100-3600 кал. л.н.) характеризуется некоторым снижением таксономического разнообразия ветвистоусых ракообразных (идентифицировано 15 таксонов). Наблюдаются масштабные изменения в структуре сообщества кладоцер: резко увеличивается доля *C. cf. sphaericus* (54.0%) в субфоссильных остатках, при критическом снижении доли *A. harpae*, снижается доля *B. longirostris*.

В зоне III (50-81 см, 1200-2100 кал. л.н.)

на фоне некоторого снижения количества *C. cf. sphaericus* (46.5%), который остается доминантным видом в сообществе, происходило увеличение количества остатков таких таксонов, как *A. quadrangularis*, *B. affinis*, *B. longirostris* и *A. nana*. Обилие фитофильных таксонов свидетельствует о наличии значительных зарослей макрофитов в литоральной зоне озера. Увеличение доли таксона *B. longirostris* часто указывает на повышение трофности водоема.

Максимальное таксономическое богатство было зафиксировано в верхней части керна в зоне IV (0-46 см, (-100)-1200 кал. л.н.) (24 таксона ветвистоусых ракообразных). В первую очередь происходит увеличение литорально-бентосных форм Cladocera. В сообществе по-прежнему доминирует *C. cf. sphaericus* (35.3%). Увеличение разнообразия литоральных таксонов указывает на повышение продуктивности водоема, что может быть связано с антропогенным воздействием.

4. Выводы

Проведенное исследование выявило 34 таксона субфоссильных Cladocera, где наибольшее разнообразие принадлежало семейству Chydoridae. Наибольшая плотность остатков Cladocera (7.6 тыс. экз./г) наблюдается на глубине 160-161 см (4100 кал. л.н.), что указывает на оптимальные условия для их развития в этот период. Наибольший вклад в таксономическое разнообразие внесли литоральные формы ветвистоусых ракообразных. Истинно планктонные таксоны были представлены единичными находками, что свидетельствует о небольшой глубине водоема на протяжении всего изученного периода и высокой степени развития макрофитов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта РФФ 22-47-08001. Отдельную благодарность хотелось бы выразить руководителю и сотрудникам лаборатории NTUAMS (Национальный Тайваньский университет, Тайпэй, Тайвань) за выполнение датирования образцов донных отложений.

5. Конфликты интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Battarbee R.W. 2000. Palaeolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record. *Quaternary Science Reviews* 19: 107–124. DOI: [10.1016/S0277-3791\(99\)00057-8](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00057-8)
- Frolova L., Nazarova L., Pestryakova L. et al. 2014. Subfossil Cladocera from surface sediment in thermokarst lakes in northeastern Siberia, Russia, in relation to limnological and climatic variables. *Journal of Paleolimnology* 52: 107-119. DOI: [10.1007/s10933-014-9781-7](https://doi.org/10.1007/s10933-014-9781-7)
- Frolova L., Nigmatullin N., Frolova A. 2018. Paleolimnological studies of tundra lakes in the Pechora delta

(Nenets Autonomous Region, Russia). Proceedings of 18th International multidisciplinary scientific Geoconference, SGEM 18: 621-627. DOI: [10.5593/sgem2018/5.1/S20.080](https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.080)

Hill M. 1973. Diversity and evenness: A unifying notation and its consequences. *Ecology* 54: 427-432.

Korhola A., Rautio M. 2001. Cladocera and other branchiopod crustaceans. In: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M. (Eds.), *Tracking environmental change using lake sediments*. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 4: 125-165. DOI: [10.1007/0-306-47671-1_2](https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2)

Korovchinskii N.M., Kotov A.A., Sinev A.Yu. et al. 2021. *Water fleas (Crustacea: Cladocera) of Northern Eurasia*. Moscow: Tov-vo. Nauchn. Izd. KMK. 2. (in Russian)

Kotov A.A., Sinev A.Ju., Glagolev S.M. et al. 2010. *Water fleas (Cladocera)*. In: *Identification key to zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia*. Moscow: Tov-vo. Nauchn. Izd. KMK. 1: 151-276. (in Russian)

Nevalainen L., Sarmaja-Korjonen K., Luoto T.L. 2011. Sedimentary Cladocera as indicators of past water-level changes in shallow northern lakes. *Quaternary Research* 75: 430-437. DOI: [10.1016/j.yqres.2011.02.007](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.02.007)

Nigamatzyanova G., Frolova L., Nigmatullin N. et al. 2020. Vegetation and climate changes in the Northeast European Russia (Nenets Autonomous Okrug, Russia). In: 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Energy and Clean Technologies, SGEM 2020 4.1: 547-552. DOI: [10.5593/sgem2020/4.1/s19.068](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.068)

Nigmatullin N., Frolova A., Nigamatzyanova G. et al. 2021. Reconstruction of lacustrine environmental evolution using records of subfossil Cladocera from an unnamed lake in Western Siberia (Russia). In: Proceedings of 21th International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM. 4(19): 423-428. DOI: [10.5593/sgem2021/4.1/s19.54](https://doi.org/10.5593/sgem2021/4.1/s19.54)

Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. 2007. *Atlas of subfossil Cladocera from central and northern Europe*. Friends Lower Vistula Soc.

Valieva E., Frolova L., Nigamatzyanova G. et al. 2020. Diatoms in bottom sediments of the arctic lake in the Pechora River delta (Nenets Autonomous Okrug, Russia). In: 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Energy and Clean Technologies, SGEM 2020 4.1: 391-398. DOI: [10.5593/sgem2020/4.1/s19.049](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.049)