

Environmental conditions of the maximum phase of the Last Glaciation: reconstruction based on the studies of sediments of lakes Chukhlomskoye and Galichskoye

Short communicationLIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Borisova O.K. *, Filippova K.G., Konstantinov E.A., Zakharov A.L.

Institute of Geography RAS, 29 building 4 Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russia

ABSTRACT. The paper discusses new palynological data obtained from the bottom sediments of Lake Chukhlomskoye (Kostroma region). The location of the lake beyond the limits of the Late Valdaian ice sheet made it possible to reconstruct the vegetation changes during the maximum phase of the glaciation and compare them with previously obtained data from sediments of Lake Galichskoye. 25-21 thousand calibrated years BP, the region was occupied by open periglacial steppe with limited participation of birch and spruce open forests in the most protected habitats, with continuous spread of permafrost. Climatic reconstructions based on the modern geographical analogue of the fossil pollen flora indicate that mean annual temperature in the region was about -4°C (7°C below modern), and annual precipitation was at near-present level.

Keywords: lake deposits, pollen analysis, vegetation and climate reconstructions, Last Glacial Maximum

For citation: Borisova O.K., Filippova K.G., Konstantinov E.A., Zakharov A.L. Environmental conditions of the maximum phase of the Last Glaciation: reconstruction based on the studies of sediments of lakes Chukhlomskoye and Galichskoye // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 304-309. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-304

1. Introduction

Lake Chukhlomskoye is situated on the Galich-Chukhloma Upland with elevations ranging from 150.0 to 293 m above sea level, within the southern taiga zone with a temperate continental climate. It is the second largest lake in the Kostroma region, following Lake Galichskoye, with a water surface area of approximately 49 km² and a drainage area of ~270 km². Both Galichskoye and Chukhlomskoye lakes are located outside the boundaries of the Last (Late Valdaian) Glaciation (Map of Quaternary..., 1972). Therefore, the sedimentation process in these lakes has been continuous throughout the last glacial epoch. Comprehensive analyses of the lake sediments offer a valuable opportunity to reconstruct the vegetation and climatic dynamics during the Last Glacial Maximum (LGM). These reconstructions can be reliably correlated with the timescale by radiocarbon dating, thus enabling a more accurate understanding of past environmental changes.

2. Materials and methods

Borehole Chu13a was drilled in the deepest central part of Lake Chukhlomskoye, at a depth of 4.0 m (Filippova et al., 2023). With the upper weakly consolidated layer of silt, the thickness of the collected core was 745 cm. Eight 14C AMS dates on total organic carbon were obtained on this core at the Center for Collective Use "Laboratory of Radiocarbon Dating and Electron Microscopy" of the Institute of Geography RAS and at the Center for Isotope Research of the University of Georgia (USA) and calibrated using the OxCal20 calibration curve (Reimer et al., 2020). The most ancient date from the base of the section (IGANams-9358) is 21110 ± 55 14C yr BP (25460 ± 110 cal BP) (Filippova et al., 2022). The series of calibrated dates made it possible to develop an age-depth model for the Chu-13a section.

For pollen extraction from sediments, separation with heavy liquid with a density of $2.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ was

*Corresponding author.

E-mail address: olgakborisova@gmail.com (O.K. Borisova)

Received: June 08, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

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



used (Grichuk and Zaklinskaya, 1948), with the propionic anhydride and concentrated sulfuric acid applied for acetolysis (Mazei and Novenko, 2021). Statistical processing of palynological data and construction of diagrams were carried out using the TILIA and TILIA*GRAPH software (Grimm, 1990).

3. Results and discussion

In Lake Chukhlomskoye, laminated grey silt with a median particle size of $\sim 16 \mu\text{m}$ accumulated during the maximum phase of the last glaciation (Filippova et al., 2023). In this layer, the contents of organic matter and carbonates in the sediments do not exceed 5% and 8-10%, respectively (Filippova et al., 2023). The depth-age model shows that from 25 to 21 thousand cal BP a stable accumulation took place at average rate of $0.7\text{-}0.8 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$. The detailed palynological record from the Chu-13a core enables a reconstruction of flora and vegetation changes in the Lake Chukhlomskoye area during this time interval with a temporal resolution of about 150 years.

Pollen assemblages from the Chu-13a core, dating to the maximum (coldest) stage of the Last Glaciation, are relatively uniform. Pollen of trees and shrubs is 25-35% of the total pollen sum of terrestrial plants Σ . Tree pollen belongs mainly to hardy species, such as *Picea*, *Betula* sect. *Albae* and *Pinus sylvestris*. The proportion of pollen from each of these species does not exceed 6-8% of the spectra. Pollen from trees, currently associated with colder and more continental climates, such as *Abies*, *Larix*, and *Pinus sibirica*, is constantly present in small quantities ($<1\%$). The composition of the spectra is dominated by pollen of herbaceous plants, which ranges from 65 to 75% Σ . In the lower part of the profile, Poaceae pollen makes up 30-40%, *Artemisia* – 10-15%, Chenopodiaceae – up to 10% Σ . In its upper part, the share of *Artemisia* increases to 20-25% Σ , mainly due to a decrease in the share of Poaceae pollen. Palynological data point to the extreme richness of meadow and steppe vegetation during the maximum phase of the Last Glaciation: pollen of forbs from 20 families were identified within this interval, many of which are represented by several species, genera, or morphological types. The proportion of forb pollen slightly decreases up the section. These changes may indicate the transition from the cryohygrotic phase of the Late Valdai glaciation to the cryoxerotic one corresponding to the maximum cooling (Grichuk, 1960).

The pollen flora found in the Chu-13a record includes species belonging to a wide range of ecological and phytocenotic groups: (1) microthermal mesophilous plants, e.g. shrub birches *Betula nana* and *B. humilis*, shrub alder *Alnaster fruticosus*, *Selaginella selaginoides* and *Botrychium boreale*; (2) mesophilous meadow forbs (*Sanguisorba*, *Thalictrum*, *Valeriana* and many others); (3) relatively cold-resistant xerophytes – inhabitants of modern dry steppes and semi-deserts (*Ephedra*, *Eurotia ceratoides*); (4) halophytes (Plumbaginaceae); (5) heliophytes (*Helianthemum*, *Bupleurum*); (6) bare/eroded ground plants (*Centaurea cyanus*, *Chenopodium album*, *Cannabis*, etc.); (7) a variety of hardy mire, lake-

shore and aquatic plants.

This high diversity of flora is consistent with data from other Late Valdai pollen records of the East European Plain (Grichuk, 1982). In particular, the composition of the pollen spectra and fossil flora of the LGM from the Chu-13a section is very close to the characteristics established earlier for the same time interval based on the study of bottom sediments of Lake Galichskoye (Velichko et al., 2001; Borisova et al., 2022). Analysis of the modern geographical distribution of species of fossil pollen flora from sediments of Lake Galichskoye, accumulated from 22 to 20 thousand cal BP, showed that the closest region-analogue for this flora is in Eastern Altai Mountains, at the upper reaches of the Abakan River, east of Lake Teletskoye (Borisova, 2021). This small area supports spruce, pine and larch mountain forests, subalpine meadows and shrub thickets, and relatively widespread open herbaceous communities, including xerophilous associations on steep southern slopes.

From the modern climatic conditions within this floristic region-analogue (so-called centre of present concentration of the fossil flora), we estimated the main climatic indexes for the maximum phase of the Last Glaciation in the Kostroma region. The reconstruction showed that the average temperature of the coldest month (January) during this period was $-19 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($6 \pm 3^\circ$ lower than today), with that of the warmest month (July) $11 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($7 \pm 3^\circ$ lower than today). With regard to the annual amount of precipitation, the uncertainty in the estimate is very high (500-800 mm) because of the mountainous terrain in the region-analogue. It is possible that mean annual precipitation at the LGM was at near-present level ($\sim 550 \text{ mm}$).

4. Conclusions

Composition of pollen assemblages and fossil floras from deposits of lakes Chukhlomskoye and Galichskoye reveal that during the maximum phase of the Last Glaciation the region was occupied by open periglacial steppe vegetation with small patches of birch and spruce open forests and individual groups of trees in the most protected habitats, along with diverse mire, meadow, and riverine communities. Climatic reconstructions based on the modern geographical analogue of the fossil pollen flora indicate that in the LGM mean annual temperature in the region was about $-4 \text{ }^\circ\text{C}$, that is about $7 \text{ }^\circ\text{C}$ lower than that of today ($+3 \text{ }^\circ\text{C}$), which should have caused the continuous spread of permafrost. The annual temperature amplitude (an indicator of climate continentality) and the amount of precipitation were at near-present level.

5. Acknowledgments

The research was funded by the Russian Science Foundation project No. 23-77-10063.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Borisova O.K. 2021. Landscape and climatic conditions in the central East European Plain in the last 22 thousand years: reconstruction based on paleobotanical data. *Water Resources* 48(6): 886-896. DOI: [10.1134/S0097807821060038](https://doi.org/10.1134/S0097807821060038)
- Borisova O., Konstantinov E., Utkina A. et al. 2022. On the existence of a large proglacial lake in the Rostov-Kostroma lowland, north-central European Russia. *Journal of Quaternary Science* 37(8): 1442-1459. DOI: [10.1002/jqs.3454](https://doi.org/10.1002/jqs.3454)
- Filippova K.G., Konstantinov E.A., Borisova O.K. et al. 2022. Lake Chukhlomskoe in the Late Pleistocene and Holocene (Kostroma region, Russia). *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1417-1420. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1417](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1417)
- Filippova K.G., Konstantinov E.A., Zakharov A.L. et al. 2023. Structure and origin of the bottom relief of Lake Chukhlomskoe (Kostroma Region). *Geomorfologiya i Paleogeografiya* [Geomorphology and Paleogeography] 54(4): 145-162. DOI: [10.31857/S2949178923040047](https://doi.org/10.31857/S2949178923040047) (in Russian)
- Grichuk M.P. 1960. Common features in the natural history of the middle part of the Yenisei and Ob basins and their significance for the stratigraphy of Quaternary deposits. In: *Sbornik materialov po geologii Krasnoyarskogo kraja* [Collection of materials on the geology of the Krasnoyarsk Territory]. Moscow: GOSGEOLTEKHIZDAT, pp. 121-131. (in Russian)
- Grichuk V.P. 1982. Vegetation of Europe in Late Pleistocene. In: *Paleogeografiya Evropy za poslednie sto tysyach let* [Paleogeography of Europe during the Last One Hundred Thousand Years]. Moscow: Nauka, pp. 92-109. (in Russian)
- Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. 1948. Analiz iskopayemykh pyl'tsy i spor i yego primeneniye v paleogeografii [Analysis of fossil pollen and spores and its application in palaeogeography]. Moscow: OGIZ. (in Russian)
- Grimm E.C. 1990. TILIA and TILIA*GRAPH.PC spreadsheet and graphics software for pollen data. INQUA, Working Group on Data-Handling Methods. Newsletter 4: 5-7.
- Map of Quaternary deposits: O-38-VII. 1972. In: Borozdina Z.I. (Ed.), *Geological map of the USSR. Map of Quaternary deposits. Mezenskaya series. Scale: 1:200 000*. Moscow: Vsesoyuzny Aerogeological Trust of the Ministry of Geology of the USSR. (in Russian)
- Mazei N.G., Novenko E.Yu. 2021. The use of propionic anhydride in the preparation of samples for pollen analysis. *Nature Conservation Research. Zapovednaya Nauka* [Nature Conservation Research. Reserved Nature] 6(3): 110-112. DOI: [10.24189/ncr.2021.036](https://doi.org/10.24189/ncr.2021.036) (in Russian)
- Reimer P., Austin W.E.N., Bard E. et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4): 725-757. DOI: [10.1017/RDC.2020.41](https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41)
- Velichko A.A., Kremenetski K.V., Negendank J. et al. 2001. Late Quaternary history of vegetation of the Kostroma Transvolga according to the data of the palynological study of bottom sediments of the Galich Lake. *Byulleten' Komissii po Izucheniyu Chetvertichnogo Perioda* [Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period] 64: 5-20. (in Russian)

Природная обстановка максимальной фазы последнего оледенения: реконструкция по данным изучения осадков Чухломского и Галичского озер

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Борисова О.К. *, Филиппова К.Г., Константинов Е.А., Захаров А.Л.

Институт географии РАН, Старомонетный пер, д. 29, стр. 4, Москва, 119017, Россия

АННОТАЦИЯ. Резюме. В статье рассмотрены новые палинологические данные, полученные по донным отложениям Чухломского озера (Костромская область). Озеро находится за пределами распространения поздневалдайского ледникового покрова, что позволило реконструировать изменения растительности в максимальную фазу оледенения и сравнить их с полученными ранее данными по отложениям Галичского озера. 25-21 тыс. лет назад регион был занят перигляциальными степями с ограниченным участием березовых и еловых редколесий в наиболее защищенных местообитаниях при непрерывном распространении вечной мерзлоты. Климатические реконструкции, основанные на определении современного географического аналога ископаемой пыльцевой флоры, показали, что среднегодовая температура в регионе составляла около -4°C , что на 7°C ниже современной), а годовое количество осадков было близким к современному.

Ключевые слова: озерные отложения, пыльцевой анализ, реконструкции растительности и климата, максимум последнего оледенения

Для цитирования: Борисова О.К., Филиппова К.Г., Константинов Е.А., Захаров А.Л. Природная обстановка максимальной фазы последнего оледенения: реконструкция по данным изучения осадков Чухломского и Галичского озер // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 304-309. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-304

1. Введение

Озеро Чухломское расположено на Галичско-Чухломской возвышенности с высотами 150-293 м над ур. моря, в пределах зоны южной тайги с умеренно-континентальным климатом. Это второе по величине озеро в Костромской обл. после Галичского озера с площадью водного зеркала $\sim 49\text{ км}^2$ и площадью водосбора $\sim 270\text{ км}^2$. И Галичское, и Чухломское озера расположены за пределами последнего (поздневалдайского) оледенения (Карта четвертичных..., 1972), следовательно, процесс седиментации в этих озерах развивался непрерывно на протяжении всей последней ледниковой эпохи. Комплексный анализ озерных отложений позволяет восстановить динамику растительности и климата во время последнего ледникового максимума (Last Glacial Maximum – LGM). С помощью радиоуглеродного датирования эти реконструкции надежно привязаны к шкале времени, что способствует лучшему пониманию изменений окружающей среды в прошлом.

2. Материалы и методы

Скважина Chu13a пробурена в центральной части Чухломского озера на глубине 4.0 м. (Филиппова и др., 2023). С учетом верхнего слабо консолидированного слоя ила мощность отобранного керна составила 745 см. Для восьми образцов из колонки Chu13a методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН и в Центре изотопных исследований Университета Джорджии (США) был определен ^{14}C возраст по общему углероду. Калибровка ^{14}C дат выполнена с помощью программы OxCal20 (Reimer et al., 2020). Наиболее древняя датировка в основании разреза составила $21110 \pm 55\text{ }^{14}\text{C}$ л. н. (25460 ± 110 кал. л. н.) (IGANams-9358) (Filippova et al., 2022). Серия калиброванных дат позволила построить модель глубина-возраст для разреза Chu-13a.

Для выделения пыльцы из осадков применялась сепарация тяжелой жидкостью с плотностью

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: olgakborisova@gmail.com (О.К. Борисова)

Поступила: 08 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.



2.25 г·см⁻³ (Гричук и Заклинская, 1948); для ацетоллиза использованы пропионовый ангидрид и концентрированная серная кислота (Мазей и Новенко, 2021). Статистическая обработка палинологических данных и построение диаграмм проводились при помощи программ TILIA и TILIA*GRAPH (Grimm, 1990).

3. Результаты и обсуждение

В максимальную фазу последнего оледенения в Чухломском озере накапливался слоистый серый ил с медианным размером частиц ~16 мкм (Филиппова и др., 2023). Содержания органического вещества и карбонатов в этом слое не превышают 5% и 8-10%, соответственно (Филиппова и др., 2023). Глубинно-возрастная модель показывает, что с 25 до 21 тыс. кал. л. н. происходило устойчивое осадконакопление со средней скоростью 0.7-0.8 мм·год⁻¹. Подробные палинологические данные по колонке Chu-13а позволяют реконструировать изменения флоры и растительности в районе Чухломского озера за этот период с разрешением по времени около 150 лет.

Пыльцевые спектры осадков максимальной (наиболее холодной) стадии последнего оледенения в разрезе Chu-13а довольно однородны. Пыльца деревьев и кустарников составляет 25-35% от общей суммы пыльцы наземных растений Σ. Пыльца деревьев принадлежит в основном наиболее выносливым видам, таким как *Picea*, *Betula sect. Albae* и *Pinus sylvestris*. Доля пыльцы каждого из этих видов не превышает 6-8% спектров. Пыльца деревьев, распространенных в настоящее время в регионах с более холодным и континентальным климатом, таких как *Abies*, *Larix* и *Pinus sibirica*, постоянно присутствует в небольших количествах (<1%). В спектрах преобладает пыльца травянистых растений (65-75%). В нижней части профиля пыльца Poaceae составляет 30-40%, *Artemisia* – 10-15%, *Chenopodiaceae* – до 10% Σ. В верхней его части доля пыльцы полыни увеличивается до 20-25%, в основном за счет сокращения доли пыльцы злаков. Палинологические данные свидетельствуют о богатстве лугового и степного разнотравья в максимальную фазу оледенения: в этом интервале определена пыльца трав из 20 семейств, многие из которых представлены несколькими видами, родами или морфологическими типами пыльцы. Доля пыльцы разнотравья уменьшается вверх по разрезу, что может указывать на переход от криогигротической фазы поздневалдайского оледенения к его криоксеротической фазе, соответствующий максимальному похолоданию (Гричук, 1960).

Пыльцевая флора, обнаруженная в разрезе Chu-13а, включает виды, принадлежащие к различным эколого-фитоценотическим группам: 1 – микротермные мезофильные растения (кустарниковые березы *Betula nana* и *B. humilis*, ольховник *Alnaster fruticosus*, *Selaginella selaginoides* и *Botrychium boreale*); 2 – мезофильные луговые травы (*Sanguisorba*, *Thalictrum*, *Valeriana* и многие другие); 3 – отно-

сительно холодостойкие ксерофиты – обитатели современных сухих степей и полупустынь (*Ephedra*, *Eurotia ceratoides*); 4 – галофиты (*Plumbaginaceae*); 5 – гелиофиты (*Helianthemum*, *Vupleurum*); 6 – виды нарушенных грунтов (*Centaurea cyanus*, *Chenopodium album*, *Cannabis* и др.); 7 – разнообразные выносливые болотные, прибрежно-водные и водные растения.

Такое разнообразие флоры хорошо согласуется с имеющимися палинологическими данными по поздневалдайским отложениям Восточно-Европейской равнины (Гричук, 1982). В частности, состав пыльцевых спектров и ископаемой флоры LGM из разреза Chu-13а близок к характеристикам, установленным для того же временного интервала по донным осадкам Галичского озера (Величко и др., 2001; Borisova et al., 2022). Анализ современного географического распространения видов ископаемой пыльцевой флоры из отложений Галичского озера, накопившихся 22-20 тыс. кал. л. н., показал, что ближайший район-аналог для этой флоры находится на Алтае, в верховьях бассейна р. Абакан, к востоку Телецкого озера (Борисова, 2021). На этой территории соседствуют еловые, сосновые и лиственничные горные леса, субальпийские луга и заросли кустарников и довольно широко распространены открытые травянистые сообщества, в том числе ксерофильные ассоциации на крутых склонах южной экспозиции.

По современным климатическим условиям в пределах этого района-аналога (т. наз. центра современной концентрации ископаемой флоры) были реконструированы основные климатические показатели максимальной фазы последнего оледенения на территории Костромского региона: средняя температура наиболее холодного месяца (января) составила $-19 \pm 3^\circ\text{C}$, что на $6 \pm 3^\circ$ ниже современной, а средняя температура наиболее теплого месяца (июля) – $11 \pm 3^\circ\text{C}$ (на $7 \pm 3^\circ$ ниже современной). Неопределенность оценки годовой суммы осадков очень велика из-за гористого рельефа региона-аналога: 500-800 мм. Возможно, среднегодовое количество осадков в LGM было близким к современному (~550 мм).

4. Заключение

Состав пыльцевых комплексов и ископаемых флор в осадках Чухломского и Галичского озер показывает, что в максимальную фазу последнего оледенения регион был занят перигляциально-степной растительностью с небольшими участками березовых и еловых редколесий и отдельными группами деревьев в наиболее защищенных местообитаниях, а также разнообразными болотными, луговыми и речными сообществами. Климатические реконструкции на основе современного географического аналога ископаемой пыльцевой флоры показывают, что в LGM среднегодовая температура в регионе составляла около -4°C , т.е. была на 7°C ниже современной ($+3^\circ\text{C}$), что должно было вызвать непрерывное распространение вечной мерзлоты. Годовая

амплитуда температуры (показатель континентальности климата) и количество осадков были близки к современным.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-77-10063.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Борисова О.К. 2021. Ландшафтно-климатические условия в центральной части Восточно-Европейской равнины в последние 22 тысячи лет (реконструкция по палеоботаническим данным). *Водные ресурсы* 48(6): 664-675. DOI: [10.31857/S0321059621060031](https://doi.org/10.31857/S0321059621060031)

Borisova O., Konstantinov E., Utkina A. et al. 2022. On the existence of a large proglacial lake in the Rostov-Kostroma lowland, north-central European Russia. *Journal of Quaternary Science* 37(8): 1442-1459. DOI: [10.1002/jqs.3454](https://doi.org/10.1002/jqs.3454)

Filippova K.G., Konstantinov E.A., Borisova O.K. et al. 2022. Lake Chukhlomskoe in the Late Pleistocene and Holocene (Kostroma region, Russia). *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1417-1420. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1417](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1417)

Филиппова К.Г., Константинов Е.А., Захаров А.Л. и др. 2023. Строение и происхождение донного рельефа Чухломского озера (Костромская область).

Геоморфология и палеогеография 54(4): 145-162. DOI: [10.31857/S2949178923040047](https://doi.org/10.31857/S2949178923040047)

Гричук М.П. 1960. Общие черты в истории природы средней части бассейнов Енисея и Оби и их значение для стратиграфии четвертичных отложений. В: Сборник материалов по геологии Красноярского края. М.: Госгеолтехиздат, С. 121-131.

Гричук В.П. 1982. Растительность Европы в позднем плейстоцене. В: Герасимов И.П., Величко А.А. (ред.), Палеогеография Европы за последние сто тысяч лет (Атлас-монография). Москва, С. 92-109.

Гричук В.П., Заклинская Е.Д. 1948. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. Москва: ОГИЗ ГЕОГРАФИЗ.

Grimm E.C. 1990. TILIA and TILIA*GRAPH.PC spreadsheet and graphics software for pollen data. INQUA, Working Group on Data-Handling Methods. Newsletter 4: 5-7.

Карта четвертичных отложений: О-38-VII. 1972. В кн.: Бороздина З.И. (ред.). Геологическая карта СССР. Карта четвертичных отложений. Серия Мезенская, масштаб: 1:200 000. Москва: Всесоюзный аэрогеологический трест Министерства геологии СССР.

Мазей Н.Г., Новенко Е.Ю. 2021. Применение пропионового ангидрида при подготовке проб для спорово-пыльцевого анализа. *Nature Conservation Research. Заповедная наука* 6(3): 110-112. DOI: [10.24189/ncr.2021.036](https://doi.org/10.24189/ncr.2021.036)

Reimer P., Austin W.E.N., Bard E. et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4): 725-757. DOI: [10.1017/RDC.2020.41](https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41)

Величко А.А., Кременецкий К.В., Негенданк Й. и др. 2001. Позднечетвертичная история растительности Костромского Заволжья по данным палинологического изучения донных осадков Галичского озера. *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода* 64: 5-20.