

Late Pleistocene and Holocene sediments of Lake Chukhlomskoye



Filippova K.G.^{1*}, Konstantinov E.A.¹, Zakharov A.L.¹, Kuzmenkova N.V.^{1,2}

¹Institute of Geography RAS, 29/4 Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Chemistry Department, Radiochemistry Division, 1/10 Kolmogorov str., Moscow, 119234, Russia

ABSTRACT. The paper discusses the structure of the bottom sediments of Lake Chukhlomskoye (Kostroma region, Russia). The results of complex lithological analysis and ¹⁴C AMS dating (TOC) of the sediments revealed in two boreholes located in different geomorphological positions of the bottom relief allowed to reconstruct stages and conditions of sedimentation in the lake. Mass accumulation rate (MAR) was calculated. High values of MAR correspond to 25.4–17.5 cal. ka BP (up to 0.192 g/cm² per year), a sharp decrease of MAR corresponds to 17.9–16.7 cal ka BP, and another stage of sediment influx occurred in Younger Dryas. Holocene MAR is low (0.001–0.053 g/cm² per year).

Keywords: lake deposits, paleolimnology, radiocarbon dating, accumulation rate, paleogeographic reconstructions

For citation: Filippova K.G., Konstantinov E.A., Zakharov A.L., Kuzmenkova N.V. Late Pleistocene and Holocene sediments of Lake Chukhlomskoye // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 334-339. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-334

1. Introduction

Lake Chukhlomskoe is situated in the Kostroma-Volga river basin, on the elevated Galich-Chukhloma Upland (the watershed of Kostroma and Unzha rivers (150–293 m a.s.l.), in the northern part of the Kostroma region). The area is located south of the boundary of the last Valdai glaciation (Map of Quaternary..., 1972) which suggests the lake's sediments to be the key paleo-archive for the region.

Lake Chukhlomskoe has a catchment of about 270 km², the lake's area is 49.15 km² (including the bay to the dam, built in 1963 on the outflowing Veksa River), and the volume of water is 0.1084 km³. The maximum depth in the hollows in the central part (and for the entire lake) reaches 5.4 m. The average depth of the lake, determined by a set of measurement points, is 2.4 m (and V/S depth is 2.2 m) (Filippova et al., 2023). All tributaries are small rivers, and the lake's coast is waterlogged.

The lake's geomorphological position and its basin's morphometric characteristics create the prerequisites for stable and continuous sedimentation.

Lithological analyses and detailed radiocarbon dating allow us to calculate sediment accumulation rates, which is important for reconstructions of hydro-

logical processes and landscape-climatic conditions changes in the Late Pleistocene and Holocene.

Calculations of linear sedimentation rate (LSR) and mass accumulation rate (MAR, which is more objective criteria of the sedimentation process, because it considers the density of the sediment) in lakes are widely used for paleogeographic reconstructions (Svendsen et al., 2018; Zander et al., 2021). In the centre of the East European Plain, lake sediments of the Last Glacial Maximum were studied only in Lake Galichskoe (Velichko et al., 2001), but without any LSR or MAR calculations.

2. Materials and methods

Two winter (drilling the bottom sediments from ice using the Livingston Piston Sampler) and one summer (bathymetric survey) fieldwork expeditions were completed in 2021–2022.

Borehole Chu13A was drilled in the deep central part of Lake Chukhlomskoye (in a hollow), at a depth of 4.0 m (the thickness of the collected core is 7.45 m) (Filippova et al., 2023) and borehole Chu22-39A was drilled on a background bottom surface at the depth of 2.5 m (the thickness of the collected core is 13.9 m).

*Corresponding author.

E-mail address: xenia.filippova@igras.ru (K.G. Filippova)

Received: June 04, 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.



Complex lithological analysis including loss on ignition (550 and 950°C), grain size analysis (using Malvern Mastersizer 3000 laser diffractometer), magnetic susceptibility (using ZH Instruments SM 150 L device) and volumetric density measurements of the samples was made in the Laboratory of Environmental Palearchives of the Institute of Geography RAS.

The content of ^{137}Cs radioactive isotope of the upper weakly consolidated layer of silt for Chu13A core was measured at the Radiochemistry Division of the Chemistry Department of Moscow State University.

^{14}C AMS dating on total organic carbon (TOC) was made for both cores 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).

Eight AMS dates for Chu13A core and ten AMS dates for Chu22-39A core allowed to calculate age-depth models using rBacon package for R (Blaauw and Christen, 2011) and then mass accumulation rates (MAR, g/cm^2 per year) (Zander et al., 2021).

3. Results

Complex lithological analysis revealed a similar structure of the Lake Chukhlomskoye sediment in both cores. The bottom sediments are composed mainly of silt (the content of the silt fraction reaches 70–80%). The upper layer of sediment is weakly consolidated organic silt, which is underlain by organomineral silt (organic matter content is 40–60%). Below lies a layer of carbonate silt (the CaCO_3 content in this layer reaches 60%), underlain by mineral silt, which is sandy in the upper part of the layer. The boundary between the carbonate silt layer and the upper laid organomineral silt layer is abrupt, which suggests a hiatus in sedimentation. When comparing the structure of sediments in cores, it was revealed that in the Chu13A core located in the hollow, the thickness of the organomineral silt was significantly reduced, which suggests the erosive origin of this bottom landform.

The results of ^{137}Cs radioactive isotope measurements for the upper part of Chu13A core revealed that there is a maximum of its content in the sediments corresponding to 1986 (Filippova et al., 2023), which was applied for age-depth model calculation.

The analysis of the proportion of mineral matter, organic matter and CaCO_3 content allows us to identify three stages of sedimentation. The mineral silt layer with a low content of organic and carbonate matter corresponds to 25–12 cal. yr BP, a layer of carbonate silt accumulated 12–11 cal yr BP, and organomineral silt began to accumulate in the Holocene. The hiatuses were found by sharp boundaries between carbonate and organomineral silt and the age gap.

MAR calculation revealed stages of sedimentation. High values of MAR calculated for Chu22-39A core relate to 25.0–23.0 cal ka BP (0.110–0.182 g/cm^2 per year) with the peak value of 0.175–0.182 g/cm^2 per year at 24.5 cal ka BP. The next stage with high

MAR values was noted at 21.5–17.5 cal ka BP (0.100–0.192 g/cm^2 per year) with the highest peak for the entire paleoarchive reaching 0.192 g/cm^2 per year at 18.8 cal ka BP. Then at 17.5–16.7 cal ka BP there was a sharp decrease in sediment accumulation from 0.134 to 0.012 g/cm^2 per year. And during 12.7–11.0 cal ka BP there was another stage of sediment influx with MAR values of 0.012–0.018 g/cm^2 per year. A hiatus in sedimentation was noted at 11.0–7.0 cal ka BP according to the age-depth model. After the hiatus, a low sedimentation rate (0.001–0.007 g/cm^2 per year) has been typical for Chu22-39A core sediments and persists to the present.

High values of MAR calculated for Chu13A core relate to 25.4–24.1 cal ka BP (0.080–0.095 g/cm^2 per year) with the peak value of 0.095 g/cm^2 per year at 25.4 cal ka BP. The next stage with high MAR values was noted at 23.0–21.0 cal ka BP (0.093–0.117 g/cm^2 per year) with the highest peak for the entire paleoarchive reaching 0.117 g/cm^2 per year at 22.9 cal ka BP. At 18.2 cal ka BP MAR is 0.061 g/cm^2 per year and after that we also see a sharp decrease in sediment accumulation from 0.060 to 0.016 g/cm^2 per year which occurred 17.9–16.9 cal ka BP. During 12.7–11.0 cal ka BP the next stage of sediment influx was noted with MAR values of 0.009–0.012 g/cm^2 per year. A hiatus in sedimentation was noted at 11.0–5.5 cal ka BP. In Chu13A core there was another hiatus from 4.8 cal ka BP to 50–60 years ago. For the last 50–60 years MAR in the hollow is 0.011–0.053 g/cm^2 per year.

4. Discussion and conclusions

Svendsen et al. (2018) at the Polar Urals Mountains lake Bolshoye Shchuchye obtained that the sedimentation rates in the lake remained high and stable in the time interval 23.8–18.7 cal ka BP, after which it gradually decreased until 11.6 cal ka BP. They postulate that sediment influx before 18.7 cal ka BP is due to abundant sediment supply from meltwater rivers draining glaciers within the catchment.

Our study area is located south of the boundary of the last glaciation, so we assume the following factors caused high sediment influx: permafrost, increased river runoff and fluctuations in the composition of plant communities (Velichko et al., 2001). We suggest that permafrost melted ~ 17.9–16.7 cal ka BP when MAR decreased sharply. The next sediment influx occurred 12.7–11.0 cal ka BP corresponding to Younger Dryas cooling which could cause the return of the permafrost (but MAR is ten times lower than in LGM) and forest landscape degradation. The Early Holocene hiatus could mark the low level of the lake drained by the Veksa River. Mid to Late Holocene hiatus in Chu13A core marks the erosional process in the hollow during this period. We assume that the erosion in a hollow stopped after the dam on the Veksa River was built in 1963 (Filippova et al., 2023). Holocene MAR is low due to the slow erosional process in the lake’s catchment caused by forest distribution and waterlogging of the shores.

Acknowledgements

The work was funded by the Russian Science Foundation project No. 23-77-10063, “Reconstruction of natural events based on high-resolution sedimentation paleoarchives from the center of the East European Plain over the past 25 thousand years.”

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6(3): 457–474. DOI: [10.1214/11-BA618](https://doi.org/10.1214/11-BA618)

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* 54(4): 145–162. DOI: [10.31857/S2949178923040047](https://doi.org/10.31857/S2949178923040047) (in Russian)

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: 1:200000. Moscow: Vsesoyuzny Aerogeological Trust of the Ministry of Geology of the USSR. (in Russian)

Svendsen J.I., Færseth L.M.B., Gyllencreutz R. et al. 2018. Glacial and environmental changes over the last 60 000 years in the Polar Ural Mountains, Arctic Russia, inferred from a high-resolution lake record and other observations from adjacent areas. *Boreas* 48(2): 407–431. DOI: [10.1111/bor.12356](https://doi.org/10.1111/bor.12356)

Velichko A.A., Kremenetsky K.V., Negendank J. et al. 2001. Late Quaternary history of vegetation of the Kostroma Volga region according to palynological studies of Lake Galichskoye bottom sediments (Pozdnechetvertichnaya istoriya rastitelnosti Kostromskogo Zavolzhya po dannym palinologicheskogo izucheniya donnikh osadkov Galichskogo ozero). *Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period (Byulleten' komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda)* 64: 5–21. (in Russian)

Zander P., Żarczyński M., Vogel H. et al. 2021. A high-resolution record of Holocene primary productivity and water-column mixing from the varved sediments of Lake Żabińskie, Poland. *Science of The Total Environment* 755(2): 143713. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.143713](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143713)

Донные отложения позднего плейстоцена и голоцена Чухломского озера



Филиппова К.Г.^{1*}, Константинов Е.А.¹, Захаров А.Л.¹, Кузьменкова Н.В.^{1,2}

¹Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29/4, Москва, 119017, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, Кафедра радиохимии, ул. Колмогорова, 1с10, Москва, 119234, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается строение донных отложений Чухломского озера (Костромская область, Россия). Результаты комплексного литологического анализа и радиоуглеродного датирования методом AMS двух колонок отложений, расположенных на разных геоморфологических позициях рельефа дна, позволили реконструировать этапы и условия осадконакопления в озере. Рассчитан прирост массы осадка (MAR – mass accumulation rate). Высокие значения MAR отмечаются 25.4–17.5 тыс. кал.л.н. (до 0.192 г/см² в год), резкое снижение MAR соответствует 17.9–16.7 тыс. кал.л.н., а следующий этап повышенного притока наносов в озеро наблюдается в позднем дриасе. В голоцене MAR низкий (0.001–0.053 г/см² в год).

Ключевые слова: озерные отложения, палеолимнология, радиоуглеродное датирование, скорость аккумуляции наносов, палеогеографические реконструкции

Для цитирования: Филиппова К.Г., Константинов Е.А., Захаров А.Л., Кузьменкова Н.В. Донные отложения позднего плейстоцена и голоцена Чухломского озера // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 334-339. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-334

1. Введение

Чухломское озеро расположено в Костромском Заволжье, на возвышенной Галичско-Чухломской гряде (водораздел рек Костромы и Унжи, 150–293 м н.у.м.), в северной части Костромской области. Территория находится к югу от границы последнего Валдайского оледенения (Геологическая карта..., 1972), что позволяет рассматривать донные отложения озера в качестве палеоархива регионального значения.

Площадь водосбора Чухломского озера составляет около 270 км², площадь озера – 49.15 км² (включая залив до плотины, построенной в 1963 г. на вытекающей реке Вексе), объем воды – 0.1084 км³. Максимальная глубина в ложбинах в центральной части (и для всего озера) достигает 5.4 м. Средняя глубина озера, определенная по данным эхолотирования, составляет 2.4 м (гидрологическая глубина V/S – 2.2 м) (Филиппова и др., 2023). Притоками являются небольшие реки, берега озера заболочены.

Геоморфологическое положение озера и морфометрические характеристики его котловины создают предпосылки для стабильного и непрерывного осадконакопления.

Литологические анализы и детальное радиоуглеродное датирование отложений позволяют рассчитать скорость осадконакопления, что важно для реконструкции гидрологических процессов и изменений ландшафтно-климатических условий в позднем плейстоцене и голоцене.

Оценка скоростей осадконакопления в озерах широко используется для палеогеографических реконструкций (Svendsen et al., 2018; Zander et al., 2021). Рассчитывается как линейная скорость осадконакопления, так и прирост массы осадка – MAR (mass accumulation rate). Этот показатель процесса осадконакопления является более объективным, так как учитывает плотность осадка. В центре Восточно-Европейской равнины озерные отложения последнего ледникового максимума вскрыты только в Галичском озере (Величко и др., 2001), но расчеты скоростей осадконакопления и прироста массы осадка для него не производились.

2. Материалы и методы исследования

В 2021–2022 гг. были проведены две зимние (бурение донных отложений со льда с помощью поршневого бура Ливингстона) и одна летняя (батиметрическая съемка) полевые экспедиции.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: [Xenia.filippova@igras.ru](mailto: Xenia.filippova@igras.ru) (К.Г. Филиппова)

Поступила: 04 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.



Скважина Chu13A была пробурена в глубокой центральной части Чухломского озера (в ложбине), на глубине 4.0 м (получен керн длиной 7.45 м) (Филиппова и др., 2023), а скважина Chu22-39A – на фоновой поверхности дна на глубине 2.5 м (длина керна 13.9 м).

Комплексный литологический анализ, включающий определение потерь при прокаливании (550 и 950°C), гранулометрический анализ (при помощи лазерного дифрактометра Malvern Mastersizer 3000), измерение магнитной восприимчивости (на приборе ZH Instruments SM 150 L) и объемной плотности осадка, был выполнен в Лаборатории палеоархивов природной среды Института географии РАН.

Содержание радиоактивного изотопа ^{137}Cs в верхнем слое слабоконсолидированного ила колонки Chu13A измерено на кафедре радиохимии химического факультета МГУ.

Радиоуглеродное датирование методом ускорительной масс-спектрометрии по общему углероду выполнено для обоих кернов в Центре коллективного пользования «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН и в Центре изотопных исследований Университета Джорджии (США).

Восемь AMS дат для керна Chu13A и десять AMS дат для керна Chu22-39A позволили построить возрастную модель осадконакопления при помощи пакета *rBacon* для среды программирования R (Blaauw and Christen, 2011), а затем рассчитать прирост массы осадка (MAR, г/см² в год) (Zander et al., 2021).

3. Результаты исследования

Комплексный литологический анализ выявил сходное строение донных отложений Чухломского озера в обоих кернах. Донные отложения представлены преимущественно илами (содержание илистой фракции достигает 70–80%). Верхний слой осадка – слабо консолидированный органический ил, подстилаемый органоминеральным илом (содержание органического вещества 40–60%). Ниже залегает слой карбонатного ила (содержание CaCO_3 в этом слое достигает 60%), подстилаемый минеральным илом, который опесчанен в верхней части слоя. Граница между слоем карбонатного ила и вышележащим слоем органоминерального ила резкая, что свидетельствует о перерыве в осадконакоплении. При сравнении последовательностей отложений в двух кернах было выявлено, что в колонке Chu13A, расположенной в ложбине, мощность органоминерального ила значительно сокращена, что свидетельствует об эрозионном происхождении этой формы донного рельефа.

Для верхней части керна Chu13A измерено содержание радиоактивного изотопа ^{137}Cs и обнаружен пик содержания, соответствующий 1986 г. (Филиппова и др., 2023). Датировка использована при построении возрастной модели.

Анализ соотношения минерального, органи-

ческого вещества и содержания CaCO_3 позволяет выделить три стадии осадконакопления. Слой минерального ила с низким содержанием органического и карбонатного вещества соответствует 25–12 тыс. кал.л.н., слой карбонатного ила накапливался 12–11 тыс. кал.л.н., а органоминеральный ил начал накапливаться в голоцене. Перерывы в осадконакоплении отмечены по резким границам между слоями карбонатного и органоминерального илов и скачку возраста.

Расчет MAR выявил этапы осадконакопления в Чухломском озере. Высокие значения MAR, рассчитанные для керна Chu22-39A, отмечаются 25.0–23.0 тыс. кал.л.н. (0.110–0.182 г/см² в год) с пиковым значением 24.5 тыс. кал.л.н. (0.175–0.182 г/см² в год). Следующий этап с высокими значениями MAR отмечается 21.5–17.5 тыс. кал.л.н. (0.100–0.192 г/см² в год) с максимумом для всей колонки, достигшим 0.192 г/см² в год, 18.8 тыс. кал.л.н. Затем 17.5–16.7 тыс. кал.л.н. произошло резкое снижение прироста массы осадка с 0.134 до 0.012 г/см² в год. А в период 12.7–11.0 тыс. кал.л.н. принос наносов снова вырос до 0.012–0.018 г/см² в год. Перерыв в осадконакоплении произошел 11.0–7.0 тыс. кал.л.н., согласно модели осадконакопления. Для второй половины голоцена получены низкие значения прироста массы осадка (0.001–0.007 г/см² в год).

Высокие значения MAR, рассчитанные для керна Chu13A, отмечаются 25.4–24.1 тыс. кал.л.н. (0.080–0.095 г/см² в год) с пиковым значением 0.095 г/см² в год 25.4 тыс. кал.л.н. Следующий этап с высокими значениями MAR отмечается 23.0–21.0 тыс. кал.л.н. (0.093–0.117 г/см² в год) с максимумом для всей колонки, достигшим 0.117 г/см² в год, 22.9 тыс. кал.л.н. 18.2 тыс. кал.л.н. MAR составляет 0.061 г/см² в год, после чего так же наблюдается резкое снижение прироста массы осадка с 0.060 до 0.016 г/см² в год, которое произошло 17.9–16.9 тыс. кал.л.н. В период 12.7–11.0 тыс. кал.л.н. принос наносов вырос до 0.009–0.012 г/см² в год. Перерыв в осадконакоплении отмечается 11.0–5.5 тыс. кал.л.н. В керне Chu13A наблюдается второй перерыв в осадконакоплении с 4.8 тыс. кал.л.н. до 50–60 лет назад. За последние 50–60 лет значения прироста массы осадка в ложбине составляют 0.011–0.053 г/см² в год.

4. Обсуждение результатов и выводы

Svendsen et al. (2018) на озере Большое Щучье в горах Полярного Урала получили данные о том, что скорость седиментации в озере оставалась высокой и стабильной 23.8–18.7 тыс. кал.л.н., после чего она постепенно снижалась вплоть до 11.6 тыс. кал.л.н. Они предположили, что приток осадочного материала ранее 18.7 тыс. кал.л.н. связан с обильным поступлением осадка из талых вод рек, дренирующих ледники в пределах водосбора.

Наш объект исследования расположен к югу от границы последнего оледенения, поэтому мы предполагаем влияние следующих факторов на оби-

лие поступающего материала в озеро: наличие многолетней мерзлоты, увеличенные объемы речного стока и флуктуации состава растительных сообществ (Величко и др., 2001). Предположительно, мерзлота растаяла ~17.9–16.7 тыс. кал.л.н. (резкое снижение значений MAR). Следующий этап повышенных значений MAR произошел 12.7–11.0 тыс. кал.л.н., что соответствует похолоданию позднего дриаса, которое могло спровоцировать появление многолетней мерзлоты (но MAR в десять раз ниже, чем во время последнего ледникового максимума) и сократить количество древесной растительности. Перерыв в осадконакоплении в раннем голоцене может маркировать низкий уровень озера, дренируемого рекой Вексой. Средне-позднеголоценовый перерыв в осадконакоплении в керне Chu13A указывает на эрозионный процесс в центральной части озера, в результате чего были сформированы ложбины. Мы предполагаем, что эрозия в ложбинах прекратилась после строительства плотины на реке Вексе в 1963 году (Филиппова и др., 2023). В голоцене прирост массы осадка низкий, что говорит о слабой эрозии на водосборе озера благодаря распространению лесной растительности и заболачиванию берегов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ №23–77–10063 «Реконструкция природных событий по высокоразрешающим седиментационным палеоархивам центра Восточно-Европейской равнины за последние 25 тысяч лет».

Конфликт интересов

У авторов отсутствует конфликт интересов.

Список литературы

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: 5–21.

Геологическая карта СССР. Карта четвертичных отложений. Серия Мезенская, лист О–38–VII, масштаб: 1:200000. 1972. Под ред. З.И. Бороздиной. М.: Всесоюзный аэрогеологический трест Министерства геологии СССР.

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)

Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6(3): 457–474. DOI: [10.1214/11-BA618](https://doi.org/10.1214/11-BA618)

Svendsen J.I., Færseth L.M.B., Gyllencreutz R. et al. 2018. Glacial and environmental changes over the last 60 000 years in the Polar Ural Mountains, Arctic Russia, inferred from a high-resolution lake record and other observations from adjacent areas. *Boreas* 48(2): 407–431. DOI: [10.1111/bor.12356](https://doi.org/10.1111/bor.12356)

Zander P., Żarczyński M., Vogel H. et al. 2021. A high-resolution record of Holocene primary productivity and water-column mixing from the varved sediments of Lake Żabińskie, Poland. *Science of The Total Environment* 755(2): 143713. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.143713](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143713)