

# Vegetation reconstruction based on a modelling approach applied to Holocene pollen records from Lakes Ladoga and Onega

Short communication

LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGY

Vasilyeva A.V.<sup>1\*</sup>, Savelieva L.A.<sup>1</sup>, Krikunova A.I.<sup>2</sup>, Tarasov P.E.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, Universitetskaya Naberezhnaya 7/9, St. Petersburg, 199034, Russia

<sup>2</sup>Institute of Geological Sciences, Palaeontology Section, Freie Universität Berlin, Malteserstraße 74–100, Building D, 12249, Berlin, Germany

**ABSTRACT.** Quantitative reconstruction of vegetation abundance utilising pollen records from Lake Ladoga, Lake Onega, and Lake Lembolovskoye in north-western Russia was conducted using the REVEALS model. Two modelling approaches, integrated with three sets of relative pollen productivities and fall speeds, produced divergent outcomes. The option that most accurately reflected the vegetation composition was selected for further analysis. The comparison of modern vegetation with sub-recent spectra from surface samples in the study region enabled an evaluation of the reliability of the model.

**Keywords:** quantitative reconstructions, REVEALS, sub-recent spectra, Lake Lembolovskoye, north-western Russia

**For citation:** Vasilyeva A.V., Savelieva L.A., Krikunova A.I., Tarasov P.E. Vegetation reconstruction based on a modelling approach applied to Holocene pollen records from Lakes Ladoga and Onega // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 718-725. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-718

## 1. Introduction

The reconstruction of vegetation and climate of the past is one of the most significant goals of pollen analysis, along with the determination of relative age. Quantitative reconstructions of vegetation based on palynological data are of particular interest. However, such studies encounter complexities, as the pollen-vegetation relationship is not linear, influenced by pollen productivity, pollen preservation, pollen transport methods and some other factors. Therefore, a comprehensive examination of surface soil and bottom samples, as well as the composition of modern vegetation, is crucial for each geographical focus area. The Holocene vegetation of the Lake Ladoga and Lake Onega regions is well-studied, resting on the results of pollen analysis of bog and lacustrine sediments (Arslanov et al., 1999; 2001; Elina et al., 2000; and many others), including the bottom sediments of Lakes Ladoga and Onega themselves (Delusin, 1991; Savelieva et al., 2019; Lavrova, 2004; Sapelko et al., 2021; Savelieva et al., 2023; and many others). However, studies of surface samples are scarce in the Lake Ladoga region (Malyasova, 1976; Chernova et al., 2006) and the northeastern Lake Onega region (Filimonova, 2005; Elina and Filimonova, 2007). Meanwhile, these studies are the basis for the interpretation of fossil spectra. Therefore, an important

research method may be the modelling of vegetation cover based on pollen data, as it solves several problems. At first, it provides quantitative data on vegetation and therefore excludes subjective interpretation of fossil spectra, which, at second, allows comparison of materials from different authors. One such model is REVEALS (Sugita, 2007), developed for regional vegetation reconstructions.

This paper presents the results of REVEALS modelling for the two largest lakes in Europe, Lakes Ladoga and Onega, as well as for the comparatively small Lake Lembolovskoye, located on the Karelian Isthmus. Surface soil samples were analysed to allow a more reliable interpretation of fossil pollen spectra, to expand the database of surface samples, and to verify the modelling outcomes. The results obtained were also compared with the composition of modern vegetation.

## 2. Materials and Methods

Fieldwork was conducted in August – September 2022 and involved sampling around Lakes Ladoga and Onega, covering the most diverse natural and anthropogenically influenced landscapes. A total of 60 samples were collected. One sample from the upper 5 cm of soil was taken in the centre of a 1 x 1 m plot. A

\*Corresponding author.

E-mail address: [aleksandra.vasilieva@spbu.ru](mailto:aleksandra.vasilieva@spbu.ru) (A.V. Vasilyeva)

**Received:** June 10, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

**Available online:** August 26, 2024

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



vegetation survey and a detailed description of plants within the plot were carried out, including the foliage projection cover in percentages. The Co1309 core from Lake Ladoga (Savelieva et al., 2019), the Sp0002 core from Lake Onega (Savelieva et al., 2023), and the Lembolovskoye core (Arslanov et al., 2001) were selected for the Holocene vegetation modelling; all of them were studied previously. The Holocene parts of the sediment cores were 1.99 m, 3.13 m, and 6.6 m, respectively. The samples were studied every 2 to 10 cm. Sample preparation followed the standard protocol (Berglund and Ralska-Jasiewiczowa, 1986). The samples were microscopied using a Labomed-3 variant 2 microscope with 400× magnification.

The REVEALS (Regional Estimates of VEgetation Abundance from Large Sites) model is part of the LRA (Landscape Reconstruction Algorithm) and was developed for regional vegetation reconstructions (Sugita, 2007). The model is used for lakes larger than 1–5 km<sup>2</sup> and reconstructs the vegetation cover of an area of 10<sup>4</sup>–10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>. The input parameters of the model are pollen counts, relative pollen productivities (RPPs), pollen fall speed (FSs, calculated according to Stoke's law), size (diameter) and type (lake or bog) of the basin, mean wind speed, and maximum range of the regional vegetation. The result of modelling is the percentages of areas occupied by different plant species or their corresponding pollen taxa. In this paper, we used two modelling approaches (Theuerkauf et al., 2016; Abraham et al., 2014), which are freely available. We also used three datasets of RPPs and FSs: a set of synthesised (averaged) values for the whole of Europe (Serge et al., 2023), a set of values obtained in separate regional studies from a long list of regions and taxa (Czech Republic, Slovakia, Estonia, Sweden, Norway; from the database of Wiczorek and Herzsuh, 2020), and the same values from a short list (Sweden, Estonia).

Lakes Ladoga and Onega are extremely large, and their areas are comparable to the range within which the REVEALS model reconstructs vegetation cover. Therefore, the relatively small Lake Lembolovskoye, with an area of about 20 km<sup>2</sup>, was chosen to compare the modelling results. Additionally, land use and land cover (LULC) classification in ArcGIS was performed for the lake area (within a radius of 50 km).

### 3. Results and Discussion

The results of pollen analysis of surface samples were compared with the modern vegetation composition. It was shown that the spectra from soil samples to a greater extent reflect the features of local vegetation. The proportion of arboreal pollen in samples from forests is usually more than 80–90%. However, it is only 50–70% in samples from meadows and forests near settlements. The spectra are dominated by *Pinus* pollen. Its value exceeds 40% in half of the samples; in pine forests it reaches 70%. The content of *Picea* does not exceed 10%, even in spruce forests. The values of *Betula* sect. *Albae* in spruce and spruce and birch forests can reach 50–70%, although usually not exceeding 40%. These three taxa also represent the main forest-form-

ing species in the region. According to vegetation surveys, spruce, pine, and birch occur in an average ratio of 4:4:2, with pine being more common in the Lake Ladoga region and spruce in the Lake Onega region. Among herbaceous taxa, the Poaceae family is most represented. In samples from meadow communities, the content of this taxon reaches 10%–20%. In other samples, Poaceae values are generally ~1%. *Artemisia* pollen is present in almost all samples, although this species has not occurred at the surveyed sites. Ericales contents are typically ~0–2%, even though different Ericales plants are quite widely and frequently represented at the sampling sites.

Based on the results of the study of lake bottom sediments, percentage pollen diagrams were constructed. Pollen assemblage zones and climatostratigraphic periods were established according to the Blitt-Sernander sequence adapted for Northern Eurasia (Khotinsky, 1987).

A total of 6 modelling variants were performed for each lake. In our opinion, the best result is obtained using synthesised values of RPPs (Serge et al., 2023). The synthesised, i.e., averaged, values are calculated using data from different authors (Githumbi et al., 2022; Serge et al., 2023) and give a balanced result. Data from different individual studies, where slightly different techniques are used, may overestimate area percentages for some taxa and underestimate them for others. Speaking of the two model approaches, the algorithm proposed by Abraham et al. (2014) is preferred as the modelled percentages for plant species, yielded for the surface bottom sample, are closest to the actual composition of modern vegetation. For example, spruce and pine are almost equally represented in the regional vegetation. However, the results of the land use and land cover (LULC) classification for the Lake Lembolovskoye region are roughly comparable with the modelling results. According to REVEALS, the study area is dominated by pine, the total forest cover is 70–75%, whereas modern vegetation cover is dominated by spruce, and forests cover only 45% of the area within a 50-km radius of the lake.

The method we have chosen (Abraham et al., 2014) yields the following reconstruction. The Preboreal time is characterised by the dominance of herbaceous taxa, with open areas reaching 50–60%. Note that the model does not reconstruct how much area is occupied by vegetation and how much is not in the first place. Among trees, birch dominates (~30%). Among herbaceous plants, grasses and sedges prevail, and the latter predominates, especially within the basins of the large lakes. The areas of Lake Onega and Lake Ladoga are also characterised by the wide distribution of willow, although its share is minimal in the area of Lake Lembolovskoye. In our opinion, high percentages of willow and sedges may be a feature of large water bodies with their long shorelines, where these plants prefer to settle. In this case, their distribution in the region is overestimated by the model. Another inaccuracy is the presence of hazel and broad-leaved species. It is, however, explained by the findings of their single pollen grains, which are likely to be redeposited or of non-lo-

cal origin. In the Boreal period, pine dominates in all basins, reaching ~20% in the basins of the large lakes and 70% in the Lake Lembolovskoye area. The forest cover is close to the modern one, as shown by the ratio of arboreal to herbaceous species. During the Atlantic period, spruce propagates and reaches ~50% by the end of the period. In the areas of Lakes Ladoga and Lembolovskoye, elm (20%), linden (up to 10%), and hazel (5–10%) are present in the forests. The Onega region is characterised by a low percentage of broad-leaved species (less than 10% in total) and absolute dominance of spruce (up to 80%). During the Subboreal period, the presence of broad-leaved species decreases, and spruce dominates within all basins, occupying 60–80% of the area. Transitioning into the Subatlantic time, pine spreads again. Pine and spruce occupy the territory almost equally, so the reconstruction does not contradict the modern vegetation composition. Also at this time, the percentage of grasses, especially cereals, increases in the vegetation cover, which is usually associated with human impact.

#### 4. Conclusions

The REVEALS modelling results reflect changes in vegetation composition in a more accurate way than classical percentages of pollen taxa. In addition, the model offers an independent interpretation of palynological data. Relative pollen productivities are a key parameter for modelling. The modelled percentages of areas occupied by different plant species strongly depend on the given RPP values. In our opinion, the model yields better results when using a database of synthesised data (Serge et al., 2023). The REVEALS algorithm presented by Abraham et al. (2014) also offers the most realistic area percentages. It is important that the model does not provide information on vegetation cover in absolute values. It may be crucial for reconstructions of the early Holocene, when vegetation cover was not continuous. A weakness of the model is that it does not take into account those taxa whose pollen may be redeposited or transported by wind over long distances. However, this may be indirectly indicated by pollen preservation and the ecological incompatibility of different species. Nevertheless, the REVEALS model is a real tool for quantitative vegetation reconstruction. Despite all the inaccuracies of the modelling, the results can be easily adjusted, even at the user level, if appropriate information on modern vegetation is available. Thus, the results of pollen analysis of surface samples serve as an auxiliary tool for model adjustment. In addition, their study is important for expanding databases, which are often used in quantitative vegetation and climate reconstruction.

#### Acknowledgements

The collection and analysis of surface samples were supported by the project 'Individual life histories in long-term culture change: Holocene hunter-gatherers in Northern Eurasia' (<https://baikalproject.artsrn.ualberta.ca/>).

#### Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

#### References

- Abraham V., Oušková V., Kuneš P. 2014. Present-Day Vegetation Helps Quantifying Past Land Cover in Selected Regions of the Czech Republic. *PLoS ONE* 9: 100–117. DOI: [10.1371/journal.pone.0100117](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100117)
- Arslanov K., Savelieva L.A., Klimanov V.A. et al. 2001. New data on chronology of landscape-paleoclimatic stages in Northwestern Russia during the Late Glacial and Holocene. *Radiocarbon* 43: 545–558. DOI: [10.1017/S0033822200041230](https://doi.org/10.1017/S0033822200041230)
- Arslanov K., Saveljeva L.A., Gey N.A. et al. 1999. Chronology of vegetation and paleoclimatic stages of North-Western Russia during the Late Glacial and Holocene. *Radiocarbon* 41: 22–45. DOI: [10.1017/S0033822200041230](https://doi.org/10.1017/S0033822200041230)
- Berglund B. E., Ralska-Jasiewiczowa M. 1986. Pollen analysis and pollen diagram. In Berglund B. E. (Ed.): *Handbook of Holocene. Palaeoecology and Palaeohydrology*. New York, Wiley Interscience: 455–484. DOI: [10.1002/jqs.3390010111](https://doi.org/10.1002/jqs.3390010111)
- Chernova G.M., Denisenkov V.P., Lomova E.I. 2006. Subrecent spore-pollen spectra of the northwestern Ladoga region (on the example of the Ladoga educational and geographical base). *Vestnik SPbGU [Bulletin of St. Petersburg State University]* 1: 70–79. (in Russian)
- Delusin I. 1991. The Holocene pollen stratigraphy of Lake Ladoga and the vegetation history of its surroundings. *Academia Scientifica Fennica, Geologica-Geographica, Series A III* 153: 66 p.
- Elina G.A., Lukashov A.D., Yurkovskaya T.K. 2000. The Late Glacial and Holocene of Eastern Fennoscandia (paleovegetation and paleogeography). Petrozavodsk: Publishing House of the KSC RAS, 242 p. (in Russian)
- Elina G.A., Filimonova L.V. 2007. Paleovegetation of the Late Glacial-Holocene of Eastern Fennoscandia and problems of mapping. III Vserossiyskaya shkola-konferenciya 'Aktual'nye problemy geobotaniki' [III All-Russian school-conference "Current problems of geobotany"]. Petrozavodsk: KRC RAS, pp. 117–143. (in Russian)
- Filimonova L.V. 2005. Vegetation dynamics of the Middle Taiga Subzone of Karelia in the Late Glacial and Holocene (Paleoecological Aspects). PhD thesis, Institute of Biology, Karelian Scientific Center RAS, Petrozavodsk. (in Russian)
- Githumbi E., Fyfe R., Gaillard M.-J. et al. 2022. European Pollen-Based REVEALS Land-Cover Reconstructions for the Holocene: Methodology, Mapping and Potentials. *Earth Syst. Sci. Data* 14: 1581–1619. DOI: [10.5194/essd-14-1581-2022](https://doi.org/10.5194/essd-14-1581-2022)
- Khotinsky N.A. 1987. Radiocarbon chronology and correlation of natural and anthropogenic boundaries of the Holocene. *Novye dannye po geokhronologii chetvertichnogo perioda [New data on the geochronology of the Quaternary period]*. Moscow, Science: pp. 39–45. (in Russian)
- Lavrova N.B. 2004. Palynological description of bottom sediments of Lake Onega. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii [Geology and Mineral Resources of Karelia]* 7: 207–218. (in Russian)
- Malyasova E.S. 1976. Assessment of the degree of detail of phytocenological reconstructions based on the results of spore-pollen analysis of sediments of various genesis. *Severo-Zapad Evropejskoj chasti SSSR [North-West of the European part of the USSR]*, pp. 71–98. (in Russian)
- Sapelko T.V., Ludikova A.V., Kuznetsov D.D. et al. 2021. Reflection of climatic and anthropogenic changes of the Late Glacial and Holocene in bottom sediment cores of Lake Ladoga. In: Kondratieva S.A., Pozdnyakova S.R., Rummyantseva V.A. (Eds.), *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogen-*

noj transformacii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyah izmenyayushchegosya klimata [Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in conditions of a changing climate]. Moscow: Institute of Lake Science, pp. 59–81. (in Russian)

Savelieva L.A., Andreev A.A., Gromig R. et al. 2019. Vegetation and climate changes during the Lateglacial and Holocene inferred from the Lake Ladoga pollen record. *Boreas* 48: 349–360. DOI: [10.1111/bor.12376](https://doi.org/10.1111/bor.12376)

Savelieva L.A., Ivanova A.V., Rybalko A.E. et al. 2023. New data on the biostratigraphy of late- and post-glacial sediments of Lake Onega. Periglacial Vostochno-Evrojskoj ravniny i Zapadnoj Sibiri. *Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii [Periglacial of East European stability and Siberia. Materials of the All-Russian Scientific Conference]*, [Electronic edition], pp. 123–132. (in Russian) DOI: [10.15356/periglacial978-5-89658-069-0](https://doi.org/10.15356/periglacial978-5-89658-069-0)

Serge M. A., Mazier F., Fyfe R. et al. 2023. Testing the Effect of Relative Pollen Productivity on the REVEALS Model: A Validated Reconstruction of Europe-Wide Holocene Vegetation. *Land* 12 (5), 986. DOI: [10.3390/land12050986](https://doi.org/10.3390/land12050986)

Sugita S. 2007. Theory of quantitative reconstruction of vegetation I: pollen from large sites REVEALS regional vegetation composition. *The Holocene* 17(2): 229–241. DOI: [10.1177/0959683607075837](https://doi.org/10.1177/0959683607075837).

Theuerkauf M., Couwenberg J., Kuparinen A. et al. 2016. A matter of dispersal: REVEALSinR introduces state-of-the-art dispersal models to quantitative vegetation reconstruction. *Vegetation History and Archaeobotany* 25 (6): 541–553. DOI: [10.1007/s00334-016-0572-0](https://doi.org/10.1007/s00334-016-0572-0)

Wieczorek M., Herzsuh U. 2020. Compilation of relative pollen productivity (RPP) estimates and taxonomically harmonised RPP datasets for single continents and Northern Hemisphere extratropics. *Earth System Science Data* 12 (4): 3515–3528. DOI: [10.5194/essd-12-3515-2020](https://doi.org/10.5194/essd-12-3515-2020)

# Реконструкция изменения растительности в голоцене по данным моделирования с использованием результатов спорово-пыльцевого анализа донных отложений Ладожского и Онежского озер

Краткое сообщение

LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGYВасильева А.В.<sup>1\*</sup>, Савельева Л.А.<sup>1</sup>, Крикунова А.И.<sup>2</sup>, Тарасов П.Е.<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург 199034, Россия<sup>2</sup>Институт геологических наук, Отдел палеонтологии, Свободный университет Берлина, Мальтезерштрассе, 74-100, корпус D, 12249, Берлин, Германия

**АННОТАЦИЯ.** Количественная реконструкция растительного покрова с использованием модели REVEALS выполнена на основе ископаемых спорово-пыльцевых спектров донных отложений Ладожского, Онежского и Лемболовского озер, расположенных на северо-западе России. Два варианта моделирования в сочетании с тремя наборами параметров относительной пыльцевой продуктивности и скоростей падения пыльцы показали разные результаты, среди них был выбран наиболее адекватно отражающий состав растительности. Сопоставление состава современной растительности с субрецентными спорово-пыльцевыми спектрами поверхностных проб из региона исследований позволило оценить качество модели.

**Ключевые слова:** количественные реконструкции, REVEALS, субрецентные спектры, озеро Лемболовское, северо-запад России

Для цитирования: Васильева А.В., Савельева Л.А., Крикунова А.И., Тарасов П.Е. Реконструкция изменения растительности в голоцене по данным моделирования с использованием результатов спорово-пыльцевого анализа донных отложений Ладожского и Онежского озер // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 718-725. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-718

## 1. Введение

Одной из важнейших целей спорово-пыльцевого анализа, наряду с определением относительного возраста, является реконструкция растительности и климата прошлого. Особый интерес представляют количественные реконструкции растительности, основанные на палинологических данных. Однако, такие исследования – сложная задача, так как зависимость между количеством обнаруженной ископаемой пыльцы и ее обилием в растительном покрове не линейна. Кроме того, на эту зависимость оказывают влияние пыльцевая продуктивность, сохранность пыльцы, способ ее переноса и некоторые другие факторы. Поэтому для понимания и решения таких задач необходимо изучать поверхностные почвенные и донные пробы, а также выявлять зависимость состава субрецентных спорово-пыльцевых спектров и структуры совре-

менной растительности для каждого изучаемого региона. Голоценовая растительность Приладожья и Прионежья относительно хорошо изучена и опирается на результаты палинологического анализа болотных и озерных отложений (Arslanov et al., 1999; 2001; Елина и др., 2000; и мн. др.), включая и донные отложения Ладожского и Онежского озер (Delusin, 1991; Savelieva et al., 2019; Лаврова, 2004; Сапелко и др., 2021; Савельева и др., 2023; и мн. др.). А вот исследования поверхностных образцов, являющихся основой для интерпретации ископаемых спектров, единичны на территории Приладожья (Малясова, 1976; Чернова и др., 2006) и северо-восточного Прионежья (Филимонова, 2005; Елина и Филимонова, 2007). По этим причинам, важным методом исследований может стать моделирование растительного покрова на основе спорово-пыльцевых данных, которое одновременно решает две задачи: дает количественные данные о

\*Автор для переписки.

Адрес e-mail: [aleksandra.vasilieva@spbu.ru](mailto:aleksandra.vasilieva@spbu.ru) (А.В. Васильева)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

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



растительности и исключает субъективную интерпретацию ископаемых спорово-пыльцевых спектров, тем самым позволяя сравнивать материалы разных авторов. Одной из таких моделей является REVEALS (Sugita, 2007), разработанная для региональных растительных реконструкций.

В данной работе представлены результаты моделирования REVEALS для двух крупнейших озер Европы – Ладожского и Онежского, а также для относительно небольшого Лемболовского озера, расположенного на Карельском перешейке. Для повышения достоверности интерпретации фоссильных спорово-пыльцевых спектров, пополнения базы данных и проверки результатов моделирования проанализированы поверхностные образцы почвы. Полученные результаты также сопоставлены с составом современной растительности.

## 2. Материалы и методы

Отбор поверхностных образцов выполнен в августе – сентябре 2022 года. Точки отбора проб расположены вокруг Ладожского и Онежского озер таким образом, чтобы охватить наиболее разнообразные естественные и нарушенные человеком ландшафты. Всего отобрано 60 проб. В центре площадки размером 1 x 1 м отбирался один образец из верхнего 5-см слоя почвы. Проводилось геоботаническое описание растительности в пределах видимости и детальное описание растительности на площадке, включая проективное покрытие каждого вида. Для моделирования растительности голоцена были выбраны колонка Co1309 донных отложений Ладожского озера (Savelieva et al., 2019), колонка Sp0002 из Онежского озера (Савельева и др., 2023) и колонка из Лемболовского озера (Arslanov et al., 2001), изученные ранее. Мощности голоценовых отложений в колонках составили соответственно 1,99 м, 3,13 м и 6,6 м. Спорово-пыльцевой анализ выполнен с шагом 2–10 см. Химическая обработка поверхностных проб выполнена по стандартной методике (Berglund and Ralska-Jasiewiczowa, 1986), микроскопирование образцов – при помощи микроскопа Лабомед-3 вариант 2 с 400-кратным увеличением.

Модель REVEALS (Regional Estimates of VEgetation Abundance from Large Sites) является частью алгоритма LRA (Landscape Reconstruction Algorithm) и разработана для региональных растительных реконструкций (Sugita, 2007). Модель подходит для озер площадью более 1–5 км<sup>2</sup> и реконструирует растительный покров территории в 10<sup>4</sup>–10<sup>5</sup> км<sup>2</sup>. Исходными параметрами модели являются пыльцевые насчеты, значения относительной пыльцевой продуктивности (relative pollen productivity, RPP), скорости падения пыльцы (fall speed, FS, рассчитываются по закону Стокса), диаметр и тип изучаемого объекта (озеро или болото), средняя скорость ветра и максимальный радиус распространения региональной растительности. Результат моделирования – процентные соотношения площадей, занимаемых различными видами растений

и соответствующими им пыльцевыми таксонами. В работе мы использовали два варианта модели, которые находятся в свободном доступе (Theuerkauf et al., 2016; Abraham et al., 2014), в сочетании с тремя наборами данных относительной пыльцевой продуктивности RPP и скоростей падения FS: набором синтезированных (осредненных) значений для всей Европы (Serge et al., 2023), набором результатов региональных исследований из расширенного списка регионов и таксонов (Чехия, Словакия, Эстония, Швеция, Норвегия; из базы Wiczorek and Hertzschuh, 2020) и теми же значениями из сокращенного списка (Швеция, Эстония).

Ладожское и Онежское озера – это крупные водоемы, чьи площади сравнимы с территорией, в пределах которой реконструируется растительный покров по модели REVEALS. Поэтому для сравнения результатов моделирования выбрано относительно небольшое озеро Лемболовское площадью около 20 км<sup>2</sup>. С этой же целью для района озера (в пределах радиуса 50 км) была выполнена классификация почвенно-растительного покрова (land use and land cover, LULC) в ArcGIS.

## 3. Результаты и обсуждение

Сравнение результатов спорово-пыльцевого анализа поверхностных проб и состава современной растительности на основе геоботанического описания показало, что спектры из почвенных проб отражают в большей степени особенности локальной растительности. Доля древесной пыльцы в образцах из сомкнутых лесов обычно составляет более 80–90%, но падает до 50–70% в пробах, отобранных на лугах и в лесах вблизи населенных пунктов. В спектрах преобладает пыльца *Pinus*, доля которой в половине образцов больше 40%, а в сосновых лесах – достигает 70%. Содержание *Picea* не превышает 10% даже в еловых лесах. Доля *Betula sect. Albae* в еловых и березово-еловых лесах может достигать 50–70%, хотя обычно не превышает 40%. Эти три таксона представляют основные лесообразующие породы в регионе. По данным геоботанических описаний ель, сосна и береза встречаются в среднем в соотношении 4:4:2, причем, в Ладожском регионе чаще встречается сосна, а в Онежском – ель. Из травянистых таксонов наиболее представлено семейство Poaceae. В образцах из луговых сообществ содержание этого таксона достигает 10%–20%, в остальных образцах Poaceae присутствует в количестве ~1%. Почти во всех образцах присутствует пыльца *Artemisia*, хотя полынь и не встречалась на описанных площадках. Пыльца Ericales в пыльцевых спектрах обычно составляет ~0–2%, несмотря на то, что верескоцветные были довольно широко и часто представлены в местах отбора образцов.

По результатам исследования донных отложений озер построены спорово-пыльцевые диаграммы, на которых выделены пыльцевые зоны и климато-стратиграфические периоды согласно схеме Блитта-Сернандера, адаптированной для Северной Евразии (Хотинский, 1987).

Всего выполнено 6 вариантов моделирования для каждого озера. На наш взгляд, наилучший результат дает использование синтезированных значений относительной пыльцевой продуктивности (Serge et al., 2023). Синтезированные, то есть осредненные, значения рассчитываются с использованием данных разных авторов (Githumbi et al., 2022; Serge et al., 2023) и дают сбалансированный результат. Данные разных отдельных исследований, полученные с использованием различных методик, могут показывать завышенные проценты площадей для одних таксонов и заниженные для других. Из двух вариантов модели предпочтение отдается алгоритму, предложенному Abraham et al. (2014), так как смоделированные для поверхностных донных образцов площади покрытия разных видов растений наиболее близки реальному составу современной растительности. Например, ель и сосна в выбранном нами варианте модели практически одинаково представлены в региональной растительности. Однако, результаты классификации почвенно-растительного покрова оз. Лемболовское лишь очень приблизительно сопоставляются с результатами моделирования. Согласно REVEALS в районе исследований преобладает сосна и облесенность составляет 70–75%, тогда как в современном растительном покрове доминирует ель, а леса занимают 45% территории в радиусе 50 км от озера.

Выбранный нами способ (Abraham et al., 2014) дает следующую реконструкцию. Пребореальное время характеризуется доминированием травянистых таксонов, доля открытых площадей достигает 50–60%. Необходимо помнить, что модель не дает информации о соотношении площадей, занятых какой-либо растительностью или свободных от нее. Среди древесных таксонов доминирует береза (~30%). Среди травянистых растений преобладают осоковые, особенно в районах крупных озер, и злаковые. Для районов Онежского и Ладожского озер также характерны высокие проценты площадей с зарослями ивы, но в районе Лемболовского озера ее доля минимальна. На наш взгляд, высокие доли ивы и осоковых могут быть особенностью крупных водоемов с их протяженными береговыми линиями, где эти растения предпочитают селиться. В таком случае, их смоделированные площади распространения в регионе завышены. Еще одна неточность реконструкции – присутствие лещины и широколиственных пород, что объясняется находками их пыльцевых зерен, которые, скорее всего, находятся во вторичном залегании или имеют заносное происхождение. В бореальное время во всех разрезах доминирует сосна, процент ее распространения достигает ~20% в крупных озерах и 70% в районе Лемболовского озера. Облесенность в это время близка современной, о чем свидетельствует соотношение древесных и травянистых. В атлантическое время растет доля ели, и к концу периода она составляет более 50%. В районах Ладожского и Лемболовского озер в лесах значительно участие вяза (20%), липы (до 10%) и лещины (5–10%). Прионежье же характеризуется низким процентом

широколиственных пород (менее 10%) и абсолютным доминированием ели (до 80%). В суббореальное время широколиственные породы начинают выпадать из состава растительности, в районе всех озер доминирует ель, доля которой достигает 60–80%. В субатлантическое время вновь распространяется сосна. Сосна и ель занимают примерно равные доли площадей; в этом реконструкция не противоречит структуре современной растительности. Также в это время растет доля трав в растительном покрове, особенно злаковых, что обычно связывается с антропогенным влиянием.

#### 4. Заключение

Таким образом, результаты моделирования REVEALS более адекватно отражают изменения состава растительности, чем классические процентные соотношения пыльцевых таксонов. К тому же, модель предлагает независимую интерпретацию палинологических данных. Значения относительной пыльцевой продуктивности – это ключевой параметр для моделирования. От заданных значений сильно зависят смоделированные процентные соотношения площадей, приходящихся на различные виды растений. На наш взгляд, при использовании базы синтезированных данных модель дает более удачные результаты (Serge et al., 2023). Вариант алгоритма REVEALS, представленный Abraham et al. (2014), также предлагает наиболее реалистичные значения площадей. Важно, что модель не дает информации о растительном покрове территории в абсолютных значениях, что может быть критично для реконструкций раннего голоцена, когда растительный покров не был сплошным. Слабой стороной модели является то, что она не учитывает те таксоны, пыльца которых может находиться во вторичном залегании или занесена ветром. Однако, об этом может косвенно свидетельствовать сохранность пыльцы и экологическая несовместимость разных видов. Тем не менее, модель REVEALS – это реальный инструмент для количественных растительных реконструкций: несмотря на все допущения и неточности моделирования, результаты могут быть скорректированы даже на пользовательском уровне при наличии соответствующих сведений о современной растительности. Так, вспомогательными материалами при корректировке модели служат результаты спорово-пыльцевого анализа поверхностных проб. К тому же, их изучение важно для пополнения баз данных, которые часто используются в количественных реконструкциях растительности и климата.

#### Благодарности

Сбор и анализ поверхностных проб осуществлялся при поддержке проекта «Individual life histories in long-term culture change: Holocene hunter-gatherers in Northern Eurasia» (<https://baikalproject.artsrn.ualberta.ca/>).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Список литературы

Елина Г.А., Лукашов А.Д., Юрковская Т.К. 2000. Позднеледниковье и голоцен восточной Фенноскандии (палеорастиельность и палеогеография). Петрозаводск, Издательский дом КарНЦ РАН: 242 с.

Елина Г.А., Филимонова Л.В. 2007. Палеорастиельность позднеледниковья–голоцена Восточной Фенноскандии и проблемы картографирования. В: Кутенков С.А., Сони́на А.В., Тимофеева В.В. (ред.), Актуальные проблемы геоботаники. III Всероссийская школа-конференция. Петрозаводск, КарНЦ РАН: сс. 117–143.

Лаврова Н.Б. 2004. Палинологическая характеристика донных отложений Онежского озера. Геология и полезные ископаемые Карелии 7: 207–218.

Малясова Е.С. 1976. Оценка степени детальности фитоценологических реконструкций по результатам спорово-пыльцевого анализа осадков различного генезиса. Северо-Запад Европейской части СССР, сс. 71–98.

Савельева Л.А., Иванова А.В., Рыбалко А.Е. и др. 2023. Новые данные по биостратиграфии поздне- и послеледниковых отложений Онежского озера. Перигляциал Восточно-Европейской равнины и Западной Сибири. Материалы Всероссийской научной конференции [Электронное издание], сс. 123–132. DOI: [10.15356/periglacial978-5-89658-069-0](https://doi.org/10.15356/periglacial978-5-89658-069-0)

Сапелко Т.В., Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д. и др. 2021. Отражение климатических и антропогенных изменений позднеледниковья и голоцена в колонках донных отложений Ладожского озера. В: Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Румянцева В.А. (ред.), Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. Москва, Институт озероведения СПб ФИЦ РАН, сс. 59–81.

Филимонова Л.В. 2005. Динамика растительности среднетаежной подзоны Карелии в позднеледниковье и голоцене (палеоэкологические аспекты). Дис... канд. биол. наук, Институт биологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск.

Хотинский Н.А. 1987. Радиоуглеродная хронология и корреляция природных и антропогенных рубежей голоцена. Новые данные по геохронологии четвертичного периода. Москва, Наука: сс. 39–45.

Чернова Г.М., Денисенков В.П., Ломова Е.И. 2006. Субрецентные спорово-пыльцевые спектры северо-западного Приладожья (на примере Ладожской учебно-географической базы). Вестник СПбГУ 1: 70–79.

Abraham V., Oušková V., Kuneš P. 2014. Present-Day Vegetation Helps Quantifying Past Land Cover in Selected Regions of the Czech Republic. PLoS ONE 9: 100–117. DOI: [10.1371/journal.pone.0100117](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100117)

Arslanov K., Savelieva L.A., Klimanov V.A. et al. 2001. New data on chronology of landscape-paleoclimatic stages in Northwestern Russia during the Late Glacial and Holocene. Radiocarbon 43: 545–558. DOI: [10.1017/S0033822200041230](https://doi.org/10.1017/S0033822200041230)

Arslanov K., Saveljeva L.A., Gey N.A. et al. 1999. Chronology of vegetation and paleoclimatic stages of North-Western Russia during the Late Glacial and Holocene. Radiocarbon 41: 22–45. DOI: [10.1017/S0033822200041230](https://doi.org/10.1017/S0033822200041230)

Berglund B.E., Ralska-Jasiewiczowa M. 1986. Pollen analysis and pollen diagram. In Berglund B. E. (Ed.): Handbook of Holocene. Palaeoecology and Palaeohydrology. New York, Wiley Interscience: 455–484. DOI: [10.1002/jqs.3390010111](https://doi.org/10.1002/jqs.3390010111)

Delusin I. 1991. The Holocene pollen stratigraphy of Lake Ladoga and the vegetation history of its surroundings. Academia Scientifica Fennica, Geologica-Geographica, Series A III 153: 66 p.

Githumbi E., Fyfe R., Gaillard M.-J. et al. 2022. European Pollen-Based REVEALS Land-Cover Reconstructions for the Holocene: Methodology, Mapping and Potentials. Earth Syst. Sci. Data 14: 1581–1619. DOI: [10.5194/essd-14-1581-2022](https://doi.org/10.5194/essd-14-1581-2022)

Savelieva L.A., Andreev A.A., Gromig R. et al. 2019. Vegetation and climate changes during the Lateglacial and Holocene inferred from the Lake Ladoga pollen record. Boreas 48: 349–360. DOI: [10.1111/bor.12376](https://doi.org/10.1111/bor.12376)

Serge M.A., Mazier F., Fyfe R. et al. 2023. Testing the Effect of Relative Pollen Productivity on the REVEALS Model: A Validated Reconstruction of Europe-Wide Holocene Vegetation. Land 12 (5), 986. DOI: [10.3390/land12050986](https://doi.org/10.3390/land12050986)

Sugita S. 2007. Theory of quantitative reconstruction of vegetation I: pollen from large sites REVEALS regional vegetation composition. The Holocene 17(2): 229–241. DOI: [10.1177/0959683607075837](https://doi.org/10.1177/0959683607075837)

Theuerkauf M., Couwenberg J., Kuparinen A. et al. 2016. A matter of dispersal: REVEALSinR introduces state-of-the-art dispersal models to quantitative vegetation reconstruction. Vegetation History and Archaeobotany 25 (6): 541–553. DOI: [10.1007/s00334-016-0572-0](https://doi.org/10.1007/s00334-016-0572-0)

Wieczorek M., Herzsuh U. 2020. Compilation of relative pollen productivity (RPP) estimates and taxonomically harmonised RPP datasets for single continents and Northern Hemisphere extratropics. Earth System Science Data 12 (4): 3515–3528. DOI: [10.5194/essd-12-3515-2020](https://doi.org/10.5194/essd-12-3515-2020)