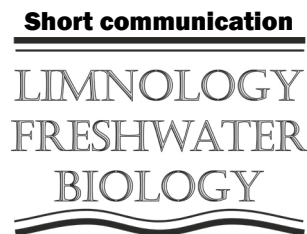


Transformation of local kettle holes based on geological and geophysical evidence, Borisoglebsk Upland, Central European Russia



Garankina E.V.^{1,2*}, Shorkunov I.G.¹, Yurchenko A.P.¹,
Posazhennikova V.S.^{1,2}, Lobkov V.A.¹

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny Lane, 29, Moscow, 119017, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory, 1, Moscow, 119991, Russia

ABSTRACT. Late Pleistocene evolution of Central European glacial landscapes is often narrowed down to the impact of postglacial linear erosion. Yet extensive watersheds in the marginal zone of MIS6 glaciation were protractedly affected by the postglacial flattening in periglacial and interglacial conditions. Local sediment sinks such as kettle holes and dry valleys infilled throughout the postglacial stage can serve not only as records of paleoenvironmental changes but also for assessing the scales of watershed denudation and landscape transformation since the last glacial cover degradation. We attempted to use electrical resistivity tomography for paleogeomorphological survey of a local flat-bottomed depression previously studied by conventional lithological and stratigraphic approaches. The obtained geophysical profile showed a contrasting picture of the relatively higher-resistive glacial base embedded with low-resistive lenses 3-25 m thick a top. The latter were correlated with the postglacial loamy deposits of colluvial and lacustrine origin that infilled the lows of initial glacial topography. It was revealed that the depression has a particularly complex inner structure embodying at least two buried kettle holes divided by a large glacial ridge almost buried under the postglacial infill. They functioned as separate basins during much of the Late Pleistocene and have probably merged only at its final stages. The geophysical cross-section also showed a quite variable bottom relief of each kettle with significantly steeper slopes than the modern sides of the depression. Thus, electrical resistivity tomography prospecting proved to be useful for detecting the postglacial loamy infills of initial lows of the MIS6 glacial topography and can be further employed to better understand the actual scales of the postglacial redeposition and landscape modeling during the last 150–130 ka.

Keywords: glacial landscapes, paleolakes, electrical resistivity tomography, facies analysis, lacustrine deposits, Late Pleistocene

For citation: Garankina E.V., Shorkunov I.G., Yurchenko A.P., Posazhennikova V.S., Lobkov V.A. Transformation of local kettle holes based on geological and geophysical evidence, Borisoglebsk Upland, Central European Russia // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 310-317. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-310

1. Introduction

Late Pleistocene evolution of Central European glacial landscapes is often narrowed down to the impact of postglacial linear erosion. However, extensive watersheds widespread in the marginal zone of MIS6 glaciation were protractedly affected by the postglacial flattening due to the redeposition of glacial load by slope, eolian, and other periglacial processes in local sediment traps, i.a. in lacustrine environments, and their additional infill due to the biogenic accumulation of peat, gyttja, or sapropel during the warmer climatic phases.

However, occasionally mentioned as characteristic of periglacial environments those agents are underestimated as actual drivers of landscape transformation (Garankina et al., 2019). The accurate assessment of such contribution is possible through studying the infill structure and volume of local sediment sinks. As facies and stratigraphical research of postglacial sedimentary sequences of kettle holes, larger glacial closed and semi-closed depressions, and lake basins are quite common there are only a few investigations of the geomorphology of initial lows (e.g., Karasiewicz et al., 2017; Forsytek et al., 2018; Woronko et al., 2018; Hosek et

*Corresponding author.

E-mail address: evgarankina@gmail.com (E.V. Garankina)

Received: June 06, 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.



al., 2019; Hein et al., 2021; Mirosław-Grabowska et al., 2021). That considerably constrains the potential of volumetric estimation of postglacial redeposition and accumulation in the region.

Geophysical prospecting is one useful approach for studying buried morphologies. As the area is dominated by pronounced loamy cover above glacial sands, loams, and diamicts, electrical resistivity tomography (ERT) (Woronko et al., 2018; Hosek et al., 2019, etc.) seems to be more effective than ground penetrating radar profiling yet much more affordable than seismic sounding (Hein et al., 2021). Thus, ERT was chosen as a tool for paleogeomorphological survey of a local flat-bottomed depression previously studied by conventional lithological and stratigraphic approaches (Garankina et al., 2023).

2. Materials and methods

Solovey Kettle is a local depression at the NE Borisoglebsk Upland about 190 km NE of Moscow and 10 km WSW of Rostov (Yaroslavl Oblast) (Fig. 1a). Last glaciated during the MIS6 (Astakhov et al., 2016), the region since has experienced alternations of interglacial (MIS5e, MIS1) and periglacial (MIS5d–MIS2) conditions. Glacial topography of the area is dominated by low-amplitude hilly plains alternating with pronounced hills and shallow depressions. The latter are mostly kettle holes filled with sediments reflected as gentle concavities ranging from 0.5 to 4 km in diameter. Solovey

kettle belongs to the Puzhbol Gully catchment lying beyond the upper reaches of its right tributary (Fig. 1b). From the north and west, the semi-round depression is canvassed by two large hills elevated 25–50 m while smaller knobs 5–7 m high are spread along its southern and eastern margins. The dry, slightly concave flat floor (1.0 km x 0.7 km) has semi-separated S and NE hollows. The southern hollow is slightly soggy, yet a distinct shallow waterbody persisted there until the land reclamation and construction of an artificial drainage system in 1984.

At the bottom and sides of the Solovey Kettle, 15 cores ranging in thickness from 4 to 21.5 m were acquired with an impact hand corer, mechanized rotary corer, and press-auger. The structure of the surrounding watersheds was explored in several quarry walls supplemented by a couple of pits on the shoulders and footslopes of hills. All geological exposures were photographed and provided with thorough field macro-morphological and lithological descriptions, facies and stratigraphic interpretations (Garankina et al., 2019; 2023). Geophysical prospecting was applied to further investigate the structure of the basin's sides and floor. ERT was accomplished with 48-electrode electrical prospecting equipment SKALA 48K12 (Siber 48K12) (Electrometry Design Bureau LLC, Novosibirsk). Pole-dipole array was chosen for achieving the maximal sounding depth while with the dipole-dipole array, it was possible to increase the sounding resolution in the upper part of the cross-section (Loke, 2001). A subme-

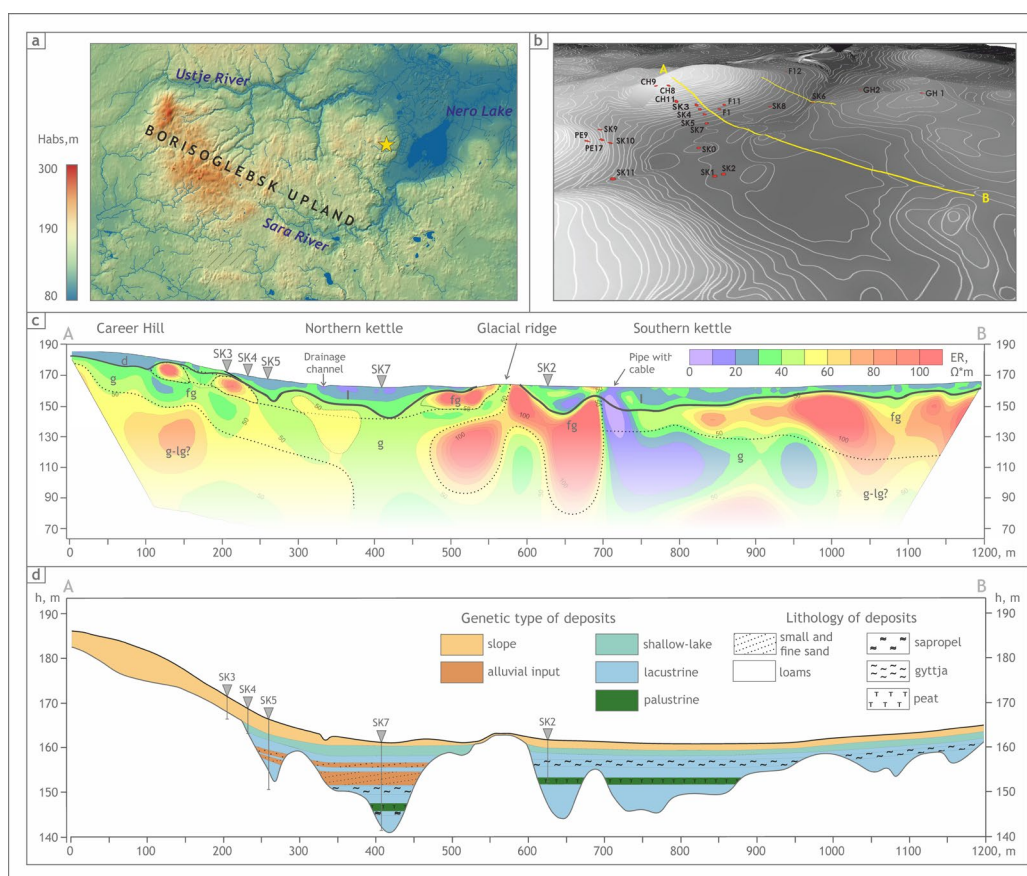


Fig. 1. (a) Location of the key site (yellow star) at the Borisoglebsk Upland. (b) Topography of the Solovey depression (DEM based on a digitized land-planning map of a 1:10000 scale) with positions of cores and pits. Yellow line A–B denotes the location of ERT profile. (c) ERT cross-section. Bold black line designates the floor of buried kettle holes separating the more resistive glacial base from the less resistive postglacial loamy infill. (d) Late Pleistocene geological and paleogeomorphological structure of the depression (above the glacial base) reconstructed from the ERT data coupled with the results of lithological correlation.

ridional profile 1.2 km long was accomplished reaching the maximal depth of sounding up to 70 m owing to the 5 m electrode spacing.

3. Results and discussion

The drilling depth closely corresponds to the postglacial sedimentary thickness decreasing from 20 m in the deepest basin's parts to the first meters on the periphery (Fig. 1d). ERT profile crossed the kettle from the top of a large hill at the north to the toeslope of a smaller knob at the south (Fig. 1b) presenting a rather contrasting picture (Fig. 1c). The major part of the cross-section demonstrates relatively increased electrical resistivity values ($\sim 40\text{--}60 \Omega\cdot\text{m}$) with even higher localized anomalies of up to $\sim 80\text{--}120 \Omega\cdot\text{m}$. The top of the profile (upper 3 to 25 m) reflects noticeably lower resistivity values ($\sim 10\text{--}40 \Omega\cdot\text{m}$) distributed much more homogeneously. The deepest parts of the low-resistive layer correspond well with the thickest lacustrine loamy strata reached by drilling while its reduced thickness closer to the depression's sides is in good agreement with the decreased depth of the low-resistive layer. However, the distribution of low resistivity anomaly in-between the cores differs significantly showing not one but, at least, two pronounced hollows, each with an amplitude bottom topography, divided by a large positive anomaly. That protrusion of highly resistive matter from below matches with the glacial reddish sandy loams coming to the surface of the kettle floor with pebbles and small boulders frequent in the plow horizon. In the modern landscape, a smooth low-rising spur spreads out into the central part of the kettle. A large and extremely low-resistive anomaly ($\leq 10 \Omega\cdot\text{m}$) in the central part of the transect appears to be caused by a buried electric cable.

In frames of the modern flat-bottomed Solovey depression, geological coring indicated a pronounced overdeepening of the glacial base. The northern slope of paleodepression reached up to $17\text{--}20^\circ$ while, at present, it appears as a gentle hill footslope. And the thickest exposed postglacial infill (20.55 m) is bound to the toeslope of the modern depression. Geophysical reconnaissance has confirmed an even greater thickness of the postglacial infill reaching 25 m, yet revealed a much more complicated buried topography (see Fig. 1c). At least, two waterbodies existed in the southern and northern kettles of the initial glacial landscape each with a rather differentiated bottom relief. They persisted as separate basins during the major part of the Late Pleistocene, which is sustained by findings of specific interglacial peats at significantly differing depths (~ 9 and 15.5 m, correspondingly) (Garankina et al., 2019; 2023). The upper parts of the infill also show some considerable differences, such as a remarkable sand input (> 4 m in total) detected only in the northern kettle. A sublatitudinal glacial ridge that divided the kettles is highlighted by the increased electrical resistivity values in the geophysical profile implying it was at least 25 m high and > 200 m in width. Yet in the modern topography, it is poorly visible as a very smooth spur less than a couple of meters high. Such associa-

tions of buried kettle holes and glacial highs jointed into larger flat-bottomed depressions of the modern landscape have been lately found in Poland (Woronko et al., 2018; Mirosław-Grabowska et al., 2021) and the Czech Republic (Hosek et al., 2019) suggesting they reflect a typical tendency of postglacial evolution of initial glacial terrains in marginal zones of both MIS6 and MIS2 glaciations. Thus, local sediment sinks such as kettle holes and dry valleys infilled throughout the postglacial stage can serve not only as records of paleo-environmental changes but also for assessing the scales of watershed denudation and landscape transformation since the last glacial cover degradation.

4. Conclusions

1. Modern smoothed flat-bottomed depressions in paleoglacial landscapes have a rather complex inner structure and may embody several overdeepened kettle holes with much steeper slopes that were completely infilled and merged into one during the postglacial evolution.
2. Postglacial loamy infill is well-defined in the ERT data by its low resistivity in contrast to the rather higher resistive and strongly differentiated deposits of the underlying glacial complex.
3. Application of electrical resistivity tomography in paleogeographic studies of the MIS6 glaciation marginal zone proved to be a useful tool for detecting the postglacial loamy infills of the initial lows of glacial topography. It can be further employed to better understand the actual scales of the postglacial redeposition and landscape modeling during the last 150-130 ka.

5. Acknowledgments

This research was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-77-10063. Paleogeomorphological interpretation was accomplished in frames of state assignment AAAA-A16-11632810089-5 of Geomorphology and Paleogeography Dept., Lomonosov MSU. We are grateful to A.Yu. Kachalov and N.E. Demidov for their drilling experience and V.R. Belyaev, V.Yu. Ukraintsev, A.O. Utkina, A.D. Lisova, N.V. Mokievskiy, I.M. Petrovnin and Yu.V. Shishkina for field assistance and cores' preparation.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A. et al. 2016. Glaciomorphological map of the Russian Federation. *Quaternary International* 420: 4-14. DOI: [10.1016/j.quaint.2015.09.024](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.024)
- Forysiak J., Majecka A., Marks L. et al. 2018. Eemian to Early Weichselian organic deposits in the watershed ket-

tle-hole basins in central Poland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 90: 199–208. DOI: [10.17741/bgsf/90.2.005](https://doi.org/10.17741/bgsf/90.2.005)

Garankina E., Posazhennikova V., Lobkov V. et al. 2023. 2b. Postglacial lacustrine sedimentation. In: *Valdai Periglacial Field Symposium Guidebook*, 27–30 August 2023. Moscow, pp. 47–63. DOI: [10.15356/periglacial978-5-89658-071-3](https://doi.org/10.15356/periglacial978-5-89658-071-3)

Garankina E.V., Belyaev V.R., Shorkunov I.G. et al. 2019. Lake sedimentation as an agent of postglacial transformation of interfluves and fluvial landscapes of the Borisoglebsk Upland, Central European Russia. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 381: 13–20. DOI: [10.5194/piahs-381-13-2019](https://doi.org/10.5194/piahs-381-13-2019)

Karasiewicz M.T., Hulisz P., Noryoekiewicz A.M. et al. 2017. The impact of postglacial palaeoenvironmental changes on the properties of sediments in the kettle hole at the site of Jurki (NE Poland). *Geological Quarterly* 61(2): 305–319. DOI: [10.7306/gq.1346](https://doi.org/10.7306/gq.1346)

Loke M.H. 2001. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Hein M., Urban B., Tanner D.C. et al. 2021. Eemian landscape response to climatic shifts and evidence for northerly Neanderthal occupation at a palaeolake margin in northern Germany. *Earth Surface Processes and Landforms* 46(14): 2884–2901. DOI: [10.1002/esp.5219](https://doi.org/10.1002/esp.5219)

Hosek J., Prach J., Krizek M. et al. 2019. Weichselian thermokarst landscape discovered in the Czech Republic, central Europe. *Boreas* 48: 988–1005. DOI: [10.1111/bor.12404](https://doi.org/10.1111/bor.12404)

Mirośław-Grabowska J., Borówka R.K., Radzikowska M. et al. 2021. Environmental changes recorded in the sequence of lake-peat bogs in the Eemian Interglacial and Vistulian on the basis of multi-proxy data. *Quaternary International* 632: 51–64. DOI: [10.1016/j.quaint.2021.11.023](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.11.023)

Woronko B., Rychel J., Karasiewicz T.M. et al. 2018. Post-Saalian transformation of dry valleys in eastern Europe: an example from NE Poland. *Quaternary International* 467: 161–177. DOI: [10.1016/j.quaint.2016.09.054](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.09.054)

Трансформация локальных ледниковых депрессий по геологическим и геофизическим данным, Борисоглебская возвышенность, центр Европейской части России

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYГаранкина Е.В.^{1,2*}, Шоркунов И.Г.¹, Юрченко А.П.¹,
Посаженикова В.С.^{1,2}, Лобков В.А.¹¹ Институт географии Российской академии наук, Старомонетный пер., 29, Москва, 119017, Россия² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия

АННОТАЦИЯ. Позднеплейстоценовую эволюцию центральноевропейских ледниковых ландшафтов часто сводят к воздействию послеледниковой линейной эрозии. Однако обширные между-речья в краевой зоне МИС6 оледенения подвергались также длительному послеледниковому выравниванию в перигляциальных и межледниковых условиях. Локальные седиментационные ловушки, такие как моренные западины, котловины и ложбины, выполнявшиеся отложениями на протяжении всего послеледникового этапа, могут служить не только летописями палеоландшафтных и палеоклиматических изменений, но и для оценки масштабов денудации междуречий и трансформации рельефа со времени деградации последнего ледникового покрова. Нами предпринята попытка использовать электротомографический метод как инструмент палеогеоморфологического исследования локальной плоскодонной котловины, строение которой ранее было изучено традиционным литолого-стратиграфическим методом. Полученный геофизический профиль показал довольно контрастную картину, где на дифференцированном относительно высокоомном ледниковом цоколе лежат более однородные низкоомные линзы мощностью 3-25 м. Последние были сопоставлены послеледниковым склоновым и озерным суглинкам, выполняющим понижения исходного ледникового рельефа. Установлено, что депрессия имеет существенно более сложное внутреннее строение, включая как минимум две погребенные котловины, разделенные моренным валом, ныне практически погребенным под послеледниковой толщей. Большую часть позднего плейстоцена озера в котловинах функционировали отдельно и, вероятно, объединились в один бассейн лишь на его заключительных стадиях. Геофизический разрез также показал весьма изменчивый рельеф дна каждой котловины со значительно более крутыми склонами, чем современные борта депрессии. Таким образом, электротомографические исследования показали себя эффективными для выявления послеледниковых суглинистых выполнений первичных понижений ледникового рельефа и могут быть в дальнейшем использованы для лучшего понимания реальных масштабов послеледникового перераспределения вещества и моделировки рельефа в течение последних 150–130 тыс. лет.

Ключевые слова: ледниковый рельеф, древние озера, электротомография, фациальный анализ, озерные отложения, поздний плейстоцен

Для цитирования: Гаранкина Е.В., Шоркунов И.Г., Юрченко А.П., Посаженикова В.С., Лобков В.А. Трансформация локальных ледниковых депрессий по геологическим и геофизическим данным, Борисоглебская возвышенность, центр Европейской части России // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 310-317. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-310

1. Введение

Позднеплейстоценовую эволюцию центральноевропейских ледниковых ландшафтов часто сво-

дят к послеледниковому эрозионному врезанию. Однако обширные междуречья, широко распространенные в краевой зоне МИС6 оледенения, подвергались также длительному послеледниковому

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: evgarankina@gmail.com (Е.В. Гаранкина)

Поступила: 06 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.



выравниванию, обусловленному переотложением ледникового материала склоновыми, эоловыми и другими перигляциальными процессами в локальных седиментационных ловушках, в т.ч. в озерных условиях, и их дополнительным выполнением за счет биогенного осадконакопления торфов, гиттий или сапропелей в более теплые климатические фазы. Однако эти факторы, хоть зачастую и упоминаются как характерные для перигляциальных обстановок, обычно недооцениваются как реальные агенты трансформации ландшафта (Garankina et al., 2019). Корректная оценка их вклада возможна путем изучения литологического строения и объема этих выполнений в локальных ловушках наносов. Фациальные и стратиграфические исследования послеледниковых выполнений моренных западин, замкнутых и полузамкнутых ложбин и более крупных озерных котловин достаточно распространены, однако геоморфологическое строение самих погребенных отрицательных форм исследуется крайне редко (например, Karasiewicz et al., 2017; Forysiak et al., 2018; Woronko et al., 2018; Hosek et al., 2019; Hein et al., 2021; Mirosław-Grabowska et al., 2021), что существенно ограничивает возможности оценки объемов послеледникового сноса и аккумуляции в регионе.

Геофизическая разведка является одним из удобных способов изучения погребенного рельефа.

Поскольку на территории ледниковые пески, суглинки и диамиктон перекрыты суглинистым покровом, электротомография (Woronko et al., 2018; Hosek et al., 2019 и др.), по-видимому, более эффективна, чем георадиолокационное профилирование, но при том и гораздо более доступна, чем сейсморазведка (Hein et al., 2021). Таким образом, электротомография (ЭТ) была выбрана в качестве инструмента для палеогеоморфологического исследования локальной плоскодонной котловины, строение которой ранее было изучено традиционным литолого-стратиграфическим методом (Garankina et al., 2023).

2. Методы и материалы

Соловьевская котловина – небольшая депрессия на северо-востоке Борисоглебской возвышенности примерно в 190 км к северо-востоку от Москвы и в 10 км к запад-юго-западу от Ростова (Ярославская обл.) (Рис. 1а). С деградации последнего МИС6 ледникового покрова (Astakhov et al., 2016) регион испытывал чередование межледниковых (МИС5е, МИС1) и перигляциальных (МИС5d–МИС2) обстановок. В ледниковом рельефе территории преобладают малоамплитудные волнистые равнины, перемежающиеся с крупными холмами и неглубокими депрессиями. Эти котловины в основном сформировались при вытаивании блоков мертвого льда и

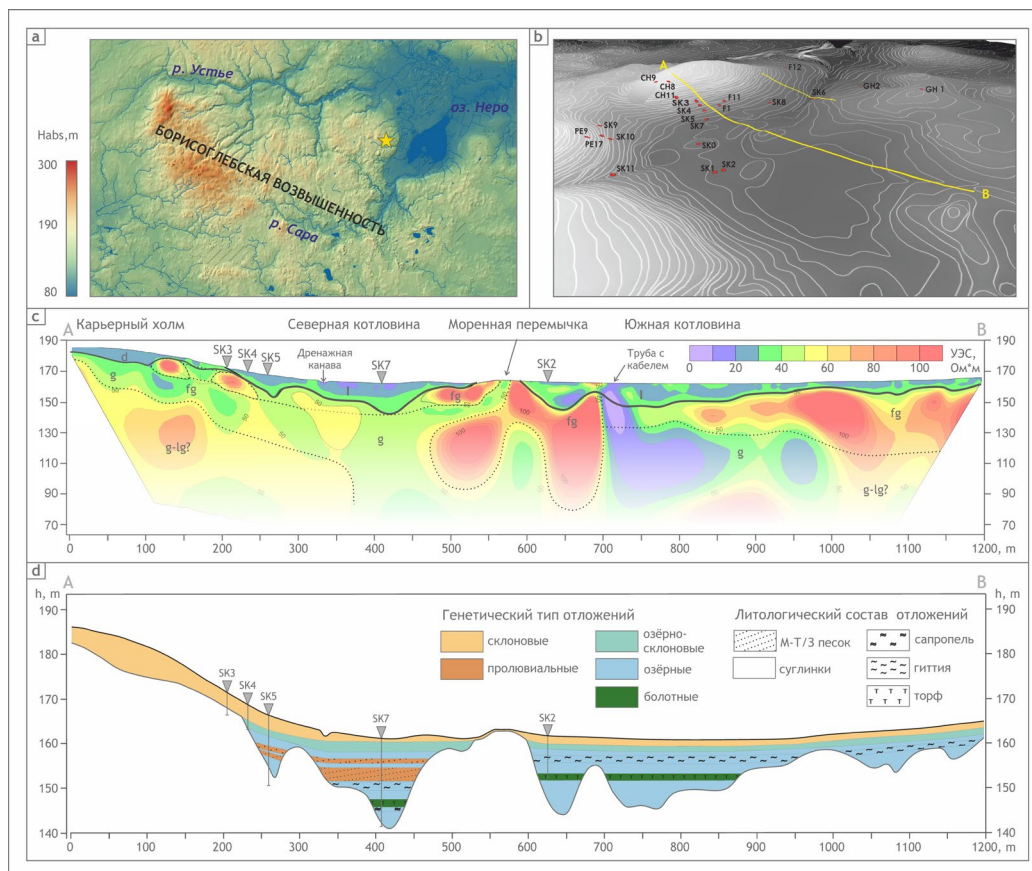


Рис.1. (а) Положение ключевого участка (желтая звездочка) на Борисоглебской возвышенности. (б) Рельеф Соловьевской котловины (ЦМР по данным оцифрованной землеустроительной карты масштаба 1:10000) с положением буровых скважин и шурфов. Желтой линией А–В отмечен ЭТ профиль. (с) Электротомографический разрез. Жирная черная линия отделяет низкоомное суглинистое выполнение древних понижений от более высокоомного ледникового цоколя, отражая сложный погребенный ледниковый рельеф. (d) Позднеплейстоценовое геологическое и палеогеоморфологическое строение депрессии (выше ледникового цоколя), реконструированное по данным ЭТ в сочетании с результатами литологической корреляции.

позднее были заполнены осадками, сейчас представляя собой очень пологие понижения диаметром от 0.5 до 4 км. Соловьевская котловина относится к водосбору оврага Пужбол, находясь за пределами верховьев его правого притока (Рис. 1b). С севера и запада полузамкнутое понижение окаймляют два крупных холма высотой 25–50 м, а с юга и востока – небольшие холмы высотой всего 5–7 м. На юге и северо-востоке слабоогнутого выположенного днища (1.0 км x 0.7 км) котловины прослеживаются два небольших понижения. Южная впадина лишь слегка заболочена, хотя мелководный водоем сохранялся вплоть до мелиорации с помощью искусственной дренажной системы в 1984 г.

В днище и на бортах Соловьевской котловины в ходе ударного ручного, колонкового и шнеково-свайного бурения было исследовано 15 кернов мощностью от 4 до 21.5 м, а строение окружающих междуречий дополнительно изучено в карьерных выработках, а также шурфах на склонах и подножиях холмов. Все керны и обнажения были сфотографированы и снабжены детальными полевыми макроморфологическими и литологическими описаниями, а затем – фациальной и стратиграфической интерпретацией (Garankina et al., 2019; 2023). Геофизическая разведка была применена для детализации строения бортов и днища бассейна. ЭТ профилирование выполнено с помощью 48-канальной электроразведочной аппаратуры «СКАЛА 48К12» (ООО «КБ Электротриетрии», г. Новосибирск). Трехэлектродная установка была выбрана для достижения максимальной глубины зондирования, тогда как с помощью дипольно-осевой установки удалось повысить разрешение зондирования в верхней части разреза (Loke, 2001). Получен субмеридиональный профиль длиной 1.2 км с максимальной глубиной зондирования до 70 м за счет пятиметровой расстановки электродов.

3. Результаты и обсуждение

Глубина бурения близко соответствует мощности послеледниковых отложений, которая изменяется от более 20 м в наиболее глубоких частях бассейна до первых метров на периферии (Рис. 1d). ЭТ профиль пересекает котловину от вершины крупного холма на севере до подножия небольшого холма на юге (Рис. 1b), продемонстрировав довольно контрастную картину (Рис. 1c). Большой части разреза соответствуют относительно повышенные значения удельного сопротивления (~40–60 Ом*м) с локальными аномалиями до ~80–120 Ом*м. Верхняя же часть профиля (от 3 до 25 м) отражает заметно меньшие значения удельного сопротивления (~10–40 Ом*м) и их более однородное распределение. Наибольшая мощность низкоомного слоя согласуется с максимальными вскрытыми глубинами залегания подошвы озерных суглинков, тогда как их уменьшение ближе к бортам котловины соответствует пониженной мощности низкоомного слоя. Однако распределение низкоомных аномалий между скважинами существенно слож-

нее, демонстрируя не одну, а, как минимум, две выраженные впадины. Каждая из них имеет амплитудные перепады подошвы, тогда как друг от друга их отделяет крупная положительная аномалия. Этому выступу высокоомного вещества к поверхности соответствуют выходы красноватых ледниковых супесей, вскрывающихся непосредственно в днище депрессии, часто с щебнистыми и мелковалунными включениями в пахотном горизонте. В современном рельефе это повышенный участок днища котловины, простирающийся в виде плавного невысокого отрога от восточного холма. Крупная очень хорошо проводящая аномалия (< 10 Ом*м) в середине профиля, судя по всему, вызвана заглубленным электрическим кабелем.

В пределах плоскодонной Соловьевской котловины геологическое бурение выявило значительное переуглубление кровли ледникового цоколя. Северный склон палеодепрессии достигал 17–20°, тогда как сейчас ему соответствует пологое подножие склона, а самое мощное послеледниковое выполнение (20.55 м), вскрытое бурением, приурочено к притыловой части котловины. Геофизическая разведка подтвердила даже большую мощность послеледникового заполнения (до 25 м), но выявила и гораздо более сложный погребенный рельеф (см. Рис. 1c). По крайней мере два отдельных водоема существовало в южной и северной впадинах исходного ледникового рельефа, каждая из которых характеризовалась весьма дифференцированным донным рельефом. В разобранном виде бассейны сохранялись на протяжении большей части позднего плейстоцена, о чем свидетельствуют находки специфических межледниковых торфов на существенно разнящихся глубинах (~8.5 и 15.5 м, соответственно) (Garankina et al., 2019; 2023). В верхних частях их выполнений также вскрыты существенные различия как, например, значительный привнос песка (общей мощностью > 4 м), обнаруженный лишь в кернах северной котловины. Субширотный моренный вал, разделявший впадины, выделяется по повышенным значениям удельного электрического сопротивления в геофизическом профиле, что позволяет предположить, что он достигал в высоту 25 м, а в ширину > 200 м. Однако в современной топографии он слабо читается как очень сглаженный отрог восточного холма высотой менее пары метров. Подобные ассоциации погребенных котловин вытаявания мертвого льда и ледниковых повышений, объединенных в современные более крупные плоскодонные депрессии, были недавно обнаружены также в Польше (Woronko et al., 2018; Mirosław-Grabowska et al., 2021) и Чехии (Hosek et al., 2019), что позволяет предположить, что они отражают типичную тенденцию постледниковой эволюции исходных ледниковых ландшафтов в краевых зонах оледенений как времени МИС6, так и МИС2. Таким образом, локальные седиментационные ловушки (моренные западины, котловины и ложбины стока), заполнявшиеся отложениями на протяжении всего послеледникового этапа, могут служить не только свидетельствами палеоэколо-

гических изменений, но и для оценки масштабов денудации на водосборах и трансформации между-речных ландшафтов со времени последней деградации ледниковых покровов.

4. Заключение

1. Современные выложенные плоскодонные депрессии в областях древнего оледенения имеют довольно сложное строение и могут представлять собой несколько слившихся переуглублённых котловин с гораздо более крутыми склонами, практически полностью заполненных в ходе послеледниковой эволюции.
2. Послеледниковое суглинистое выполнение хорошо дешифрируется в данных электротомографической съемки по низкому сопротивлению в отличие от относительно высокоомных и сильнее дифференцированных отложений подстилающего ледникового комплекса.
3. Применение электротомографии при палеогеографических исследованиях краевой зоны МИС6 оледенения оказалось полезным инструментом для выявления мощностей послеледниковых суглинистых выполнений первичных понижений ледникового рельефа. В дальнейшем его можно использовать для лучшего понимания реальных масштабов послеледникового переотложения и моделирования рельефа в течение последних 150–130 тыс. лет.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 23–77–10063. Палеогеоморфологическая интерпретация проведена в рамках ГЗ АААА-А16-11632810089-5 кафедры геоморфологии и палеогеографии МГУ. Мы благодарны А.Ю. Качалову и Н.Е. Демидову за их непревзойденный буровой опыт и В.Р. Беляев, В.Ю. Украинцев, А.О. Уткину, А.Д. Лисову, Н.В. Мокиевского, И.М. Петровнина и Ю.В. Шишкину за оказанную помощь как в поле, так и на этапе обработки буровых кернов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A. et al. 2016. Glaciomorphological map of the Russian Federation. *Quaternary International* 420: 4–14. DOI: [10.1016/j.quaint.2015.09.024](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.024)
- Forysiak J., Majecka A., Marks L. et al. 2018. Eemian to Early Weichselian organic deposits in the watershed kettle-hole basins in central Poland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 90: 199–208. DOI: [10.17741/bgsgf/90.2.005](https://doi.org/10.17741/bgsgf/90.2.005)
- Garankina E., Posazhennikova V., Lobkov V. et al. 2023. 2b. Postglacial lacustrine sedimentation. In: *Valdai Periglacial Field Symposium Guidebook*, 27–30 August 2023. Moscow, pp. 47–63. DOI: [10.15356/periglacial978-5-89658-071-3](https://doi.org/10.15356/periglacial978-5-89658-071-3)
- Garankina E.V., Belyaev V.R., Shorkunov I.G. et al. 2019. Lake sedimentation as an agent of postglacial transformation of interfluvial and fluvial landscapes of the Borisoglebsk Upland, Central European Russia. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 381: 13–20. DOI: [10.5194/piahs-381-13-2019](https://doi.org/10.5194/piahs-381-13-2019)
- Karasiewicz M.T., Hulisz P., Noryoekiewicz A.M. et al. 2017. The impact of postglacial palaeoenvironmental changes on the properties of sediments in the kettle hole at the site of Jurki (NE Poland). *Geological Quarterly* 61(2): 305–319. DOI: [10.7306/gq.1346](https://doi.org/10.7306/gq.1346)
- Loke M.H. 2001. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
- Hein M., Urban B., Tanner D.C. et al. 2021. Eemian landscape response to climatic shifts and evidence for northerly Neanderthal occupation at a palaeolake margin in northern Germany. *Earth Surface Processes and Landforms* 46(14): 2884–2901. DOI: [10.1002/esp.5219](https://doi.org/10.1002/esp.5219)
- Hosek J., Prach J., Krizek M. et al. 2019. Weichselian thermokarst landscape discovered in the Czech Republic, central Europe. *Boreas* 48: 988–1005. DOI: [10.1111/bor.12404](https://doi.org/10.1111/bor.12404)
- Mirosław-Grabowska J., Borówka R.K., Radzikowska M. et al. 2021. Environmental changes recorded in the sequence of lake-peat bogs in the Eemian Interglacial and Vistulian on the basis of multi-proxy data. *Quaternary International* 632: 51–64. DOI: [10.1016/j.quaint.2021.11.023](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.11.023)
- Woronko B., Rychel J., Karasiewicz T.M. et al. 2018. Post-Saalian transformation of dry valleys in eastern Europe: an example from NE Poland. *Quaternary International* 467: 161–177. DOI: [10.1016/j.quaint.2016.09.054](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.09.054)