

ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БАТАГАЙСКОЙ ТЕРМОДЕНУДАЦИОННОЙ КОТЛОВИНЫ

А.В. Лупачев^{1,*}, Я.В. Тихонравова², П.П. Данилов³, О.Г. Занина¹,
М.Ю. Чепрасов³, Г.П. Новгородов³

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142290, Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2/2, Россия

² Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия

³ Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера им. Д.Д. Саввинова, СВФУ им. М.К. Аммосова,
677007, Якутск, просп. Ленина, 43, Россия

*Автор для контакта; e-mail: a.lupachev@gmail.com

Изучено строение и свойства отложений крупнейшей регрессивной термоденудационной котловины Батагай. Стратиграфическая последовательность многолетнемерзлых отложений предположительно непрерывно накоплена за период среднего–позднего неоплейстоцена (~700–11 тыс. лет назад) и частично трансформирована в течение голоцена. На основе палеопочвенных, палеонтологических и геоэкологических данных получены новые представления об историческом развитии почвенно-растительного покрова и позднеледниковой фауны Янского плоскогорья. Подтверждены два благоприятных климатических периода формирования почвенно-растительного покрова: первый по различным методам датирования относится к эпохам МИС 15–17 (600–700 тыс. лет) либо к эпохе МИС 7e (230–250 тыс. лет); второй более уверенно датируется эпохой МИС 5e (110–130 тыс. лет).

Ключевые слова: криогенные экосистемы, мерзлотные почвы, Якутия, палеорекострукция, фитолиты.

Ссылка для цитирования: Лупачев А.В., Тихонравова Я.В., Данилов П.П., Занина О.Г., Чепрасов М.Ю., Новгородов Г.П. Палеоэкологические индикаторы условий формирования многолетнемерзлых отложений Батагайской термоденудационной котловины // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 1, с. 36–49. DOI: 10.15372/KZ20240104. EDN: PCIYMO.

PALEOECOLOGICAL INDICATORS OF THE THERMODENUDATION SLUMP BATAGAI PERMAFROST DEPOSITS' FORMATION

A.V. Lupachev^{1,*}, Ya.V. Tikhonravova², P.P. Danilov³, O.G. Zanina¹, M.Yu. Cheprasov³, G.P. Novgorodov³

¹ Institute of Physico-Chemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences,
Institutskaya St. 2/2, Puschino, Moscow region, 142290 Russia

² Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, 677010 Russia

³ Savinov Science Research Institute of Applied Ecology of the North, Ammosov North-East Federal University,
Lenin Ave. 43, Yakutsk, 677007 Russia

*Corresponding author; e-mail: a.lupachev@gmail.com

The structure and properties of sediments of the largest regressive thermodenudation slump Batagay' are considered, which reveals a presumably continuous stratigraphic sequence of permafrost deposits accumulated during the Middle-Late Pleistocene (~700–11 thousand years ago) and partially transformed during the Holocene. Based on paleopedological, paleontological and geocryological data, new suggestions have been made on the historical development of the soil-vegetation cover and fauna of the Yana Plateau region. Two extensive and relatively warm climatic periods of the formation of developed soil-vegetation cover have been determined: first one (depending on the dating method) belongs to MIS 15–17 (600–700 Kyr) or the MIS 7e (230–250 Kyr) and the second one is more certainly of MIS 5e age (110–130 Kyr).

Keywords: cryogenic ecosystems, permafrost-affected soils, Yakutia, paleoreconstruction, phytoliths.

ВВЕДЕНИЕ

Батагайский разрез многолетнемерзлых пород (ММП) на севере Якутии вскрыт в одной из крупнейших термоденудационных котловин в мире: размеры приблизительно 1 × 2 км, протяженность основной стенки обнажения более

1.6 км. Здесь представлена стратиграфическая последовательность мерзлых отложений мощностью более 80 м, охватывающая, по оценкам различных методов исследований, интервал от 250 до 600–700 тыс. лет [Murton *et al.*, 2022].

© А.В. Лупачев, Я.В. Тихонравова, П.П. Данилов, О.Г. Занина, М.Ю. Чепрасов, Г.П. Новгородов, 2024

Одними из первых фундаментальные исследования обнажения Батагай и в целом северной части Янского плоскогорья проводились сотрудниками Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН совместно с зарубежными коллегами [Куницкий и др., 2013]. Было сделано предположение, что по своему происхождению ММП здесь относятся к континентальным разновидностям перигляциального аллювия и фации экстранивитов, накопление которых происходило в суровой климатической и геокриологической обстановке внеледниковой области Восточной Сибири.

Комплексными исследованиями седиментологических и стратиграфических характеристик и датированием отложений [Murton et al., 2017] предварительно установлено, что верхние две трети разреза Батагай, относящиеся к периодам МИС 3 и МИС 2 (57–11 тыс. лет), сменяются в нижней трети небольшим по мощности прослоем отложений периода МИС 4 (71–57 тыс. лет), а подстилающая часть относится к периоду МИС 5 (130–71 тыс. лет). Однако уже тогда было сделано предположение, что эти толщи могут быть значительно древнее.

Позднее с применением четырех различных методов датирования отложений этой же группой авторов была получена новая сводная шкала для разреза Батагай [Murton et al., 2022], согласно которой отложения нижнего яруса, по методу оптически стимулированной люминесценции, были отнесены к интервалу МИС 7e (230–250 тыс. лет), а по соотношению изотопов хлора $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ и постинфракрасно-инфракрасной люминесценции – к интервалу МИС 15–17 или около 600–700 тыс. лет. В случае, если эти данные достоверны, исследуемый стратиграфический разрез может соперничать за первенство по возрасту с древнейшим ранее описанным обнажением ММП Доминион Крик в Канаде возрастом около 740 тыс. лет [Froese et al., 2008].

Параллельно изучались палеобиологические признаки, сохранившиеся в ММП [Ashastina et al., 2017, 2018]. Установлено, что район исследований был северным лесным рефугиумом на протяжении позднечетвертичного времени, а современные степи Янского нагорья представляют собой реликты некогда замкнутого в межгорных котловинах степного пояса.

Традиционно исследования подобных объектов сопровождаются значительным количеством палеонтологических находок [Лазарев и др., 2011; Ченрасов и др., 2021; Novgorodov et al., 2013; Librado et al., 2015; Palkopoulou et al., 2016; Lord et al., 2022]. Местонахождения в бассейне р. Яна отличаются более древним возрастом отложений и, соответственно, составом ископаемой фауны млекопитающих, обитавших в различные эпохи плейстоцена.

Данные о составе фаунистического комплекса способны значительно детализировать представления о природной обстановке исследуемых эпох, так как находки животных останков в ММП (особенно *in situ*) достаточно локализованы и характеризуют ландшафтную обстановку непосредственно в районе исследований. Ряд работ посвящен палеоэнтомофауне ММП Янского плоскогорья [Боевских, Саввинов, 2021].

Использованный в работе анализ микробиоморф (в том числе фитолитов) из плейстоценовых отложений как биоиндикаторов растительных сообществ давно и успешно применяется на территории распространения ММП и позволяет более полно охарактеризовать состав растительности и ландшафта и детализировать реконструкции природной среды, повысить достоверность их трактования [Лопатина, Занина, 2016; Занина, Лопатина, 2017, 2022; Занина и др., 2022].

Анализ современной литературы, посвященной разрезу Батагай, выявил практически полное отсутствие исследований, посвященных проблемам плейстоценового почвообразования на территории Янского плоскогорья. В отдельных материалах лишь эпизодически упоминаются “педогенные” признаки в составе и свойствах исследуемого материала, зачастую только на основании относительно более темной окраски некоторых субгоризонтальных слоев внутри отложений [Куницкий и др., 2013; Murton et al., 2017]. В некоторых работах рассматриваются строение и свойства современных почв исследуемого района [Васильчук и др., 2020].

В связи с этим основной задачей исследования стало обобщение палеопочвенных, палеонтологических и геокриологических данных об историческом развитии основных компонентов позднечетвертичной природной среды (почвенно-растительного покрова и фауны) в районе обнажения Батагай.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Термоденудационная котловина Батагай (67.58° с.ш., 134.77° в.д.), расположенная в 10 км к юго-востоку от пос. Батагай, Республика Саха (Якутия), начала формироваться из серии термоэрозионных оврагов в конце 60-х годов прошлого века [Куницкий и др., 2013] с постепенным увеличением темпов деградации, достижения ширины 840 м и общей площади более 70 га к 2015 г. [Günther et al., 2016; Murton et al., 2023]. Далее темпы отступления стенок обнажения несколько замедлились [Саввинов и др., 2018], и в настоящее время его максимальная ширина около 1 км [Kizyakov et al., 2023]. Котловина находится в Киргиллах-Хатынгнахской горной седловине, расположена в основном между изогипсами 260 и 330 м.

Климат района относится к резко континентальной области субарктического пояса [Гаврилов, 1989]. Среднегодовая температура воздуха -11.6°C , среднегодовое количество осадков -210 мм [<http://www.pogodaiklimat.ru>]. Регион входит в зону сплошного распространения ММП, мощность мерзлой толщи около 300 м , среднегодовая температура пород в верхней части ММП варьирует здесь от -5.5 до -7.0°C [Гаврилов, 1989]. Мощность слоя сезонного оттаивания составляет от $0.6-0.8$ до $1.4-1.6\text{ м}$ в зависимости от почвенно-растительного покрова [Shestakova et al., 2021]. ММП представлены пачками дисперсных пород, залегающих на метаморфизованных сланцеватых алевритах триасового возраста [Murton et al., 2022], выходящих на поверхность лишь в самых заглубленных частях разреза и в руслах ручьев внутри котловины.

На территории Янского плоскогорья господствуют северогаежные лиственничные редколесья с участием березы повислой и реже осины [Саввинов и др., 2018; Isaev, Timofeyev, 2010]. Напочвенный покров в основном представлен лишайниками и мхами, распространены злаки [Ashastina et al., 2018]. С высотой лиственничники сменяются зарослями кедрового стланика или горными тундрами.

ПОЛЕВЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ

В период с 2011 г. проводились исследования строения и состава отложений, определения их физико-химических свойств, анализ содержащихся в них палеонтологических находок (в том числе микробиоморф). В 2020 г. пробурены опорные скважины, произведен полный отбор керна ММП и подземного льда (УРБ-2ДЗ, МИП “Арктик-

бур”). По образцам из основной скважины 1-20 (глубиной около 70 м) выполнен ряд аналитических работ. В 2023 г. проведены комплексные полевые исследования с морфологическим описанием керна и отбором образцов (рис. 1).

Погребенные почвы и почвоподобные тела изучались как в ходе полевых работ 2023 г. на отдельных доступных участках мерзлых стенок обнажения котловины Батагай, так и в наиболее соответствующих им по глубинам интервалах кернов скважины 1-20. Названия почв приведены в соответствии с [Полевым определителем почв, 2008].

Аналитические исследования проведены в ЦКП ИФХиБПП РАН. Определение гранулометрического состава выполняли седиментационным методом [Теория..., 2007]. Общую влажность отложений (W) определяли как отношение массы воды и льда в образце к сухой массе образца, выраженное в процентах [Лабораторные методы..., 1985]. Потерю при прокаливании (ППП) определяли по разности массы до и после прокаливания навески почвы в муфельной печи при $T = 900^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч [Теория..., 2006].

Изучение микростроения почв и микробиоморф проводилось с помощью оптического микроскопа Axioscope A1 с камерой AxioCam MR5 (Германия), микроморфологические описания выполнены по общепринятой методике [Гагарина, 2004]. Исследования на субмикроуровне выполнены с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega3 LSU (Чехия) с микроанализатором AztecEnergy EDS (Великобритания). Анализ микробиоморф и фитолитных спектров (ФС) проводился для материала, отобранного из текстурного и полигонально-жильного льда (ПЖЛ) керна скв. 1-20 по методике [Занина, Лопатина, 2017, 2022], оканчивая вакуумной фильтрацией.

Магнитная восприимчивость (МВ) определялась малогабаритным измерителем КТ-6 (Россия). Определение содержания общего углерода ($\text{C}_{\text{общ}}$) и общего азота ($\text{N}_{\text{общ}}$) выполнено на автоматическом элементарном CHNOS-анализаторе Elementar Vario El Cube (Германия). Актуальную кислотность ($\text{pH}_{\text{водн}}$) образцов измеряли потенциометрическим методом (рН-метр Sartorius Basic Meter PB-11, США).

Определение и снятие промеров палеонтологического материала проводилось общепринятыми методами [Новиков, 1956; von den Driesch, 1976; Maschenko, 2002]. Радиоуглеродный возраст образцов получен методом AMS-спектрометрии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Термоденудационная котловина Батагай состоит из шести основных криостратиграфических пачек (снизу вверх).

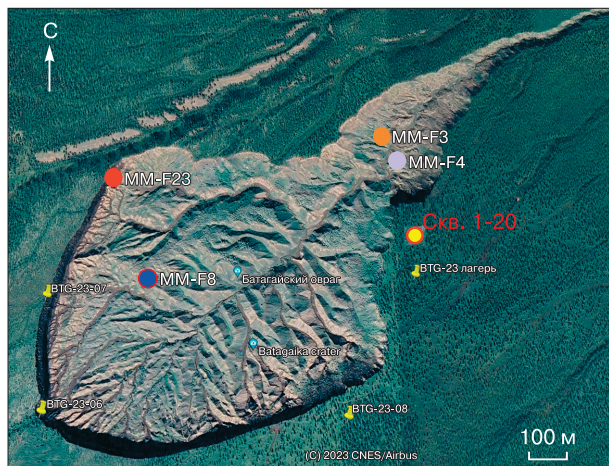


Рис. 1. Расположение скважины 1-20, точек морфологических описаний (ВТГ) и палеонтологических находок (ММП) в районе термоденудационной котловины Батагай.

Пачка 1 – нижний ледовый комплекс (ЛК). Сложен льдистыми ($W = 34\text{--}51\%$) оторфованными пылевыми супесями. В отложениях между ПЖЛ встречаются относительно мощные (до 30–50 см) почвоподобные субгоризонтальные торфяные включения слабой степени разложения, с крупными фрагментами растительных остатков. Нижележащая толща окрашена в холодные, серо-сизые глеевые тона (рис. 2). Криотекстура вмещающих пород ЛК – массивная с видимыми вкраплениями льда, около встречающихся веточек – корковая; на контакте с крупными торфяными включениями отложения сильнольдистые ($W = 48\text{--}71\%$) с атакситовой и ниже – линзовидной и сетчатой криотекстурами. Пачка полностью пронизана ПЖЛ как минимум двух генераций шириной около 2 и 1 м, уходящими ниже подошвы стенки. Жилы вертикально-полосчатые с большим количеством минеральных частиц в составе, имеют плечики. Мощность видимой части толщи около 5 м. Ранее проведенный микробиоморфный анализ материала этой пачки показал практически полное отсутствие качественно диагностируемых фитоцитов [Murton *et al.*, 2017].

Пачка 2 – нижняя песчаная толща, состоящая из слабольдистых ($W = 20.3\%$) серых песков с отдельными субгоризонтальными прослоями дресвы (0,5–1.0 см) и включениями веточек (диаметром до 0.5 см). Криотекстура отложений массивная. Пачка насквозь пронизана тонкими ледогрунтовыми жилами, хвосты внедряются в нижележащую пачку. Ледогрунтовые жилы в нижней части шириной 25 см, оконтурены дресвой, контакт с вмещающими отложениями – четкий, жилы имеют плечики. Мощность толщи около 20 м, меняется по простиранию в диапазоне 20–38 м [Murton *et al.*, 2017] или не более 20 м по

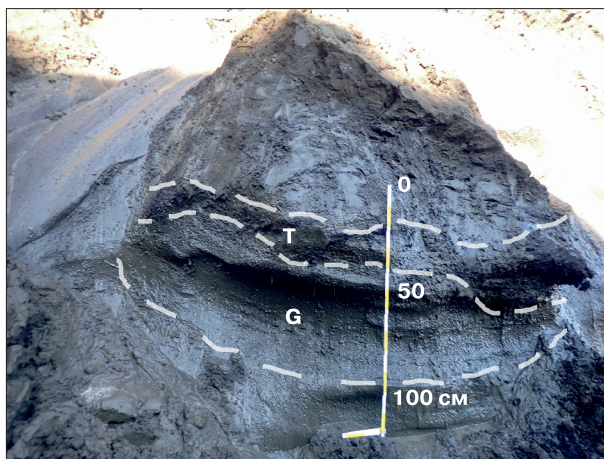


Рис. 2. Погребенная почва в материале минерального блока нижнего ледового комплекса.

Пачка 1. Точка морфологического описания BTG-23-06. Горизонты почвы: Т – погребенный торфянистый горизонт; G – погребенный глеевый горизонт.

более поздним данным [Murton *et al.*, 2022]. Микробиоморфы не выявлены.

Пачка 3 – субгоризонтальные льдонасыщенные отложения, состоящие из органогенного материала, обогащенного корнями и веточками растений (20–30 см), подстилаемого маломощным и прерывистым, относительно осветленным минеральным горизонтом (около 20 см), под которым залегает горизонт охристо-серого цвета (50–70 см), прослеживаемый на всем протяжении обнажения (рис. 3). Общая мощность толщи 1.0–1.5 м. В небольших врезках, предположительно термоэрозийных ложбинах стока, наблюдаются беспорядочные скопления крупных растительных остатков в слое мощностью до 3 м.

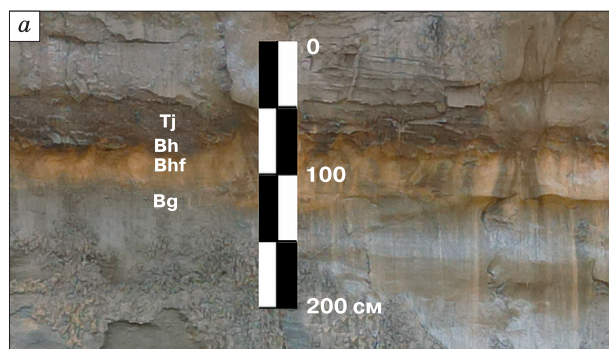
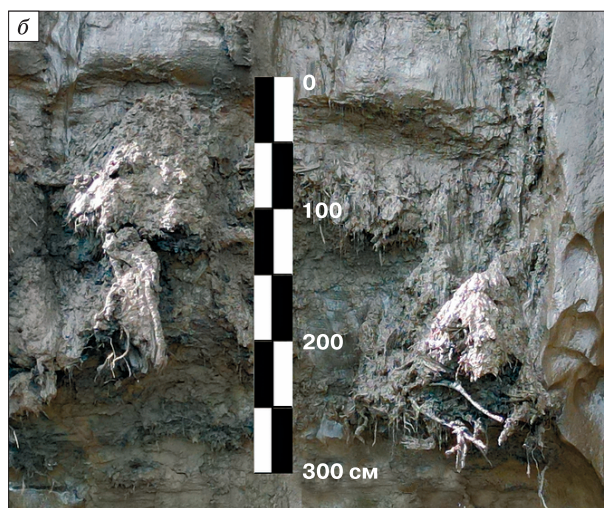


Рис. 3. Погребенная почва МИС 5е (а) и ассоциированные с ней скопления крупных растительных остатков (б).

Пачка 3. Точка морфологического описания BTG-23-07. Горизонты почвы: Tj – погребенный сухоторфяный; Bh – погребенный иллювиально-гумусовый; Bhf – погребенный иллювиально-гумусово-железистый; Bg – погребенный оглеенный.



В материале пачки 3 выявлен наиболее богатый и насыщенный спектр микробиоморфов (около 170 шт.), с низким процентным содержанием корродированных форм фитоцитов. В спектре диагностированы седловидные и веерообразные формы, характерные для влаголюбивой растительности. В этом интервале также обнаружены разнообразные удлиненные формы фитоцитов, выявлены трапециевидные формы, симметричные и несимметричные лопастные формы с разным количеством лопастей и килевидные формы. В спектре не выявлены фитоциты хвойных, но отмечено присутствие их проводящих тканей с окаймленными порами. Определены обломки раковин диатомовых водорослей.

Пачка 4 – верхний ЛК, сложен песком и супесью; с восточной стороны обнажения отложения имеют менее сортированный и мелкодисперсный состав. В слое присутствуют мелкие органические остатки в виде корневого детрита и охристые пятна. Криотекстуры сменяют друг друга на протяжении всего интервала: массивная, микролинзовидная, линзовидная, шлиры субгори-

зонтальные, наклонные и вертикальные. Толща содержит крупные ПЖЛ (шириной до 6 м по данным [Ashastina et al., 2017]) и тонкие ледогрунтовые жилы. В приконтактной зоне содержание текстурного льда во вмещающих отложениях увеличивается. Граница ПЖЛ и вмещающих отложений четкая, ровная, встречаются апофизы. Мощность толщи около 25 м.

Насыщенность ФС значительно ниже, чем в материале пачки 3, содержание микробиоморфов колеблется в пределах 20–80 шт., много корродированных, доминируют среднеразмерные (30–50 мкм) формы. Преобладают удлиненные фитоциты, с участием килевидных и трапециевидных форм. Редки округлые и усеченно-конические, а также фитоциты хвойных. В образцах выявлено большое количество детрита семейства однодольных с выраженной клеточной структурой проводящих тканей и остатков мхов. К этой пачке, вероятнее всего, приурочено обнаружение в байдерах мумии копытного лемминга *Dicrostonyx torquatus* (ММ-F8, см. рис. 1), возраст которой составил более 50 тыс. лет (>50 299, ОхА-29747) [Palkopoulou et al., 2016].

Пачка 5 – верхняя песчаная толща, сильноолигистая ($W = 57\text{--}69\%$) с прослоями супеси и многочисленными включениями органических остатков *in situ* – нитевидными корешками. Слой наиболее ярко выражен в боковых частях обнажения и содержит узкие ледогрунтовые жилы. В центральной части обнажения слой отсутствует. Криотекстура массивная, местами тонкошлировая. Мощность толщи около 20 м.

Пачка 6 – покровный слой, состоящий из песка в центральной части стенки обнажения и супеси с восточной стороны. Толща содержит мало-мощные (шириной не более 1 м) ПЖЛ белого цвета с ростками и крупными шлирами льда (~20 см). Хвосты жил пронизывают нижележащую пачку. Мощность покровного слоя 1–3 м.

Современные почвы лесных водоразделов и пологих склонов преимущественно представлены мерзлотными подбуррами и торфяно-подбуррами под редколесьями из лиственницы (рис. 4). Эти почвы имеют хорошо развитый торфянистый верхний горизонт мощностью около 10 см, под которым находится минеральный горизонт с ооидной (“икряной”) посткриогенной структурой почвы. Срединные минеральные горизонты почв имеют слабовыраженные признаки оглеения и ожелезнения, а также миграции органического вещества. Надмерзлотные горизонты переувлажнены и бесструктурны. Слой сезонного оттаивания варьирует в пределах 60–80 см. Подстилающий, переходный слой ММП [Шур, 1988; Shur et al., 2005] мощностью около 15–20 см, льдистый, имеет шлировую (реже сетчатую и атакситовую) криогенную текстуру.

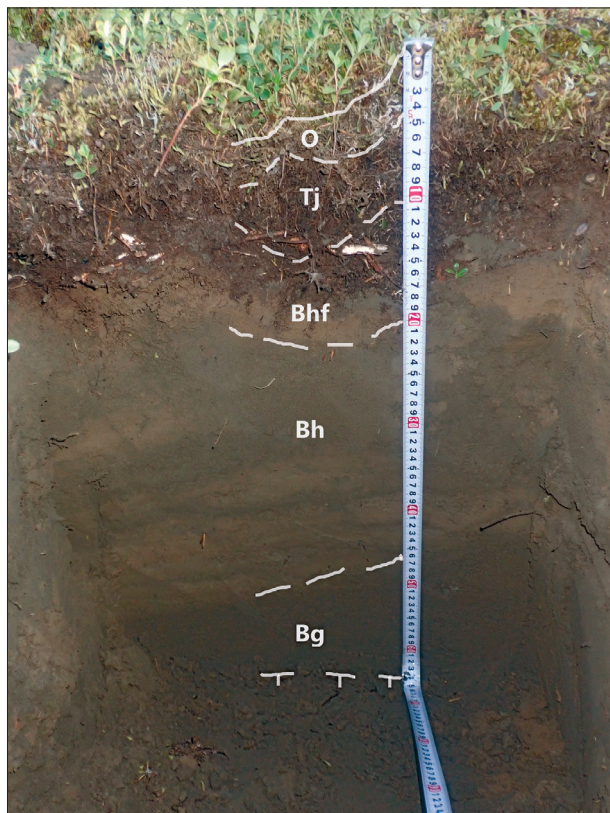


Рис. 4. Разрез современной почвы (мерзлотный подбур) на пологом склоне.

Точка морфологического описания ВТГ-23-08. Горизонты почвы: О – очёс; Тj – сухоторфяный; Bhf – иллювиально-гумусово-железистый; Bh – иллювиально-гумусовый; Bg – надмерзлотный оглеенный.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обобщение полученных данных о строении и физико-химических свойствах ММП разреза Батагай позволило сделать некоторые предположения о характере природной обстановки в наиболее благоприятные для развития почвенно-растительного покрова эпохи.

На сводной шкале, составленной по результатам проведенных аналитических исследований, достаточно уверенно выделяются интервалы относительно повышенных значений таких важных в отношении педогенеза и органоминерального взаимодействия показателей, как общий углерод, общий азот, ППП и магнитная восприимчивость (МВ) (рис. 5). Синхронно повышается доля физической глины (частицы <0.01 мм) в гранулометрическом составе (рис. 6). Здесь же фиксируется закономерное снижение показателя pH, что чаще всего указывает на относительно высокое содержание органических остатков, обуславливающих подкисление среды.

Первый интервал приурочен к нижней части разреза (глубина 66–70 м), к отложениям нижнего ЛК (пачка 1) и маркирован в стенке палеопочвой,

по строению наиболее близкой к современным торфяно-глееземам.

Обилие грубых растительных остатков (рис. 7, з), их слоистое залегание, четкий контакт между органогенными прослоями и подстилающими минеральными отложениями, а также интенсивное оглеение минеральной части палеопочв и высокая льдистость (атакситовая, линзовидная и сетчатая криотекстуры) позволяют предположить, что в период формирования этой части толщи поверхность здесь была сильно заболочена, между систем ПЖЛ формировались обводненные внутриполигональные ванны с мощным (в отдельных случаях, вероятно, субаквальным) торфяным покровом. Наблюдается некоторое увеличение доли физической глины в гранулометрическом составе и одно из максимальных значений содержания ила, что свидетельствует о глубокой проработке минерального материала процессами почвообразования *in situ*.

Внутри пачки 2 (нижний песок), в интервале глубин 50–60 м, следует отметить некоторые маломощные прослои, где наблюдаются аномальные повышения значений МВ, не сопровождающиеся

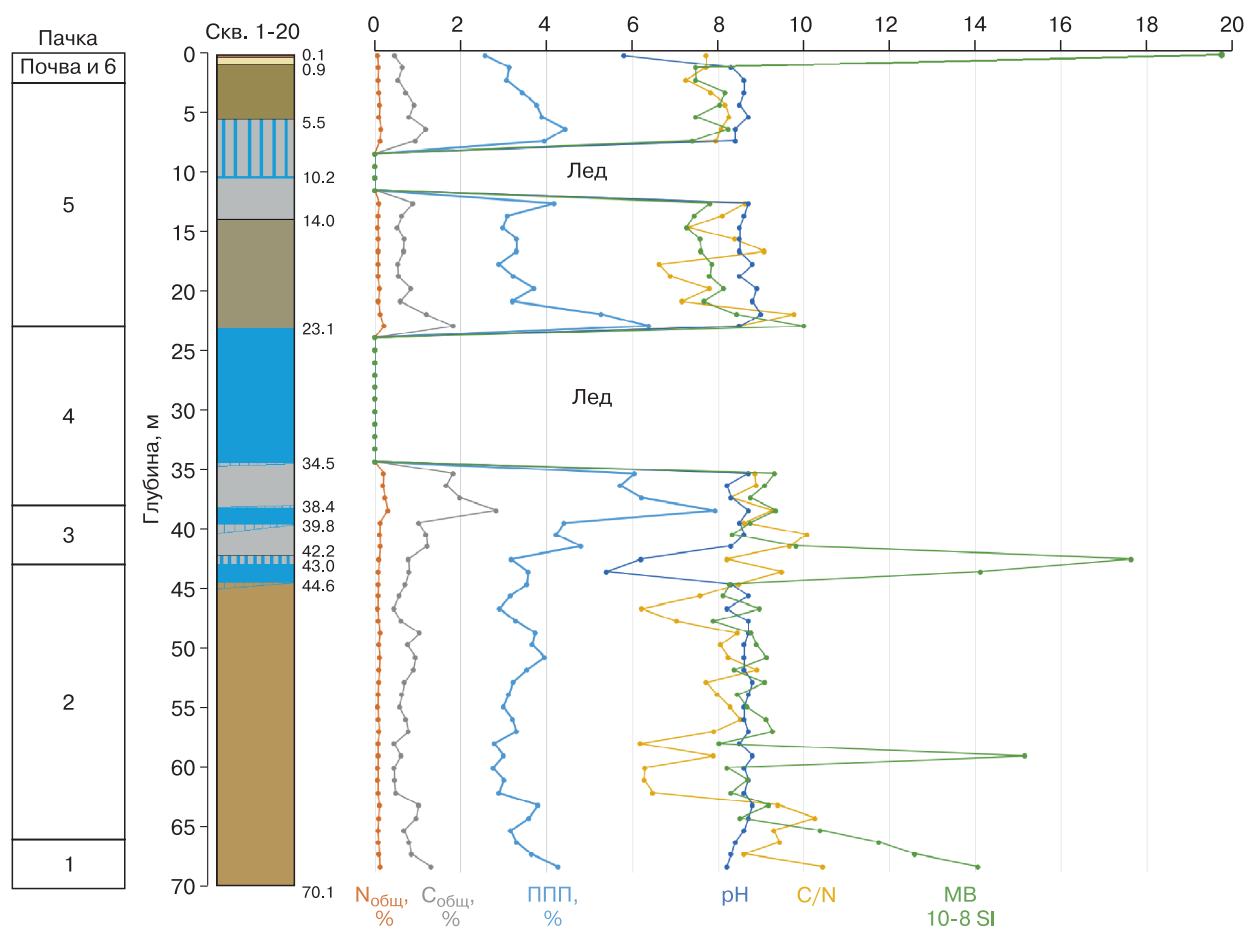


Рис. 5. Физико-химические свойства основных пачек разреза Батагай (скв. 1-20).

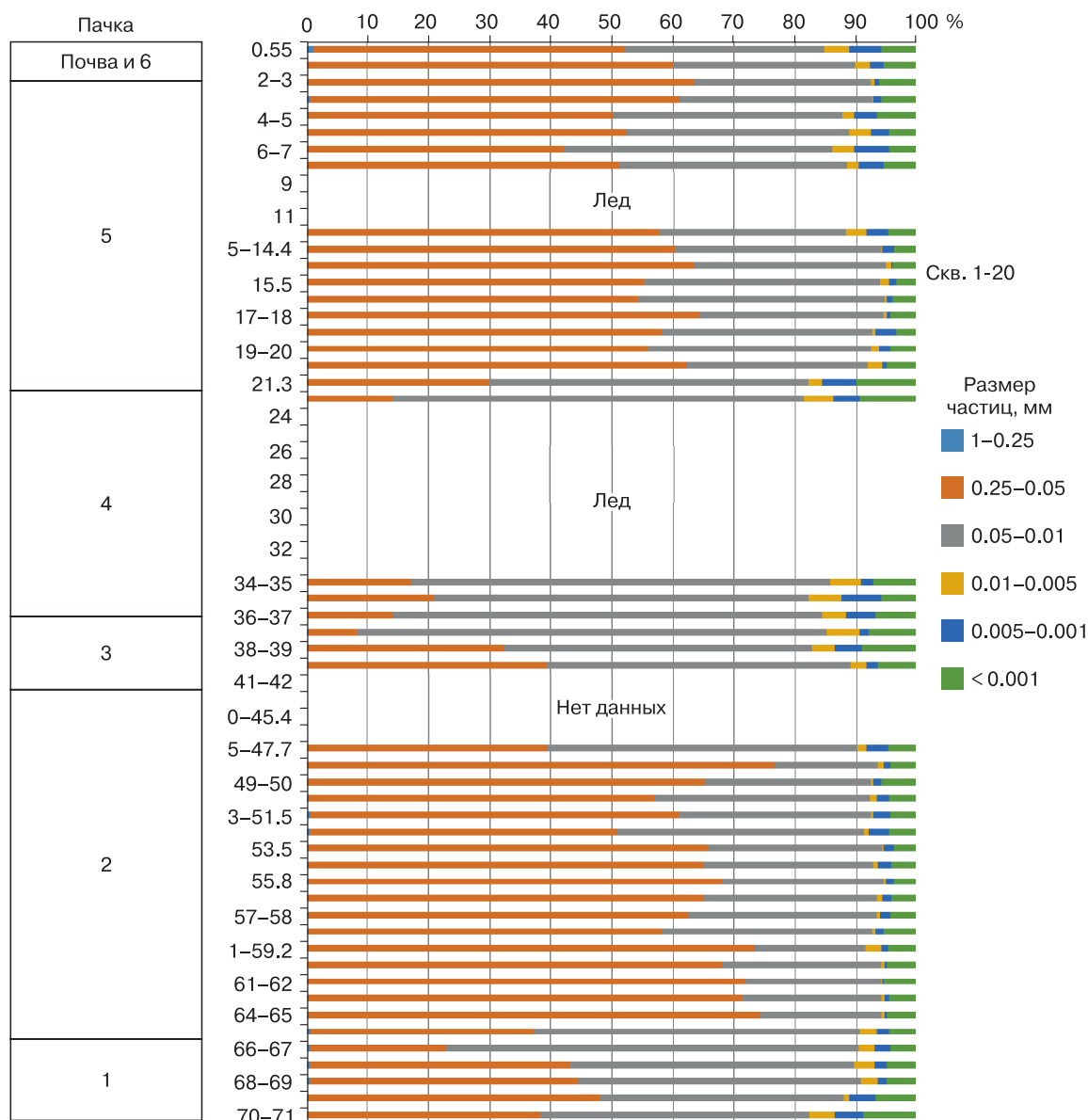


Рис. 6. Гранулометрический состав отложений разреза Батагай (скв. 1-20).

синхронными значительными повышениями содержания общего углерода и азота, а также снижением рН. Выявлено наличие зон аккумуляции мелкодисперсного травянистого детрита, высокой степени минерализации (см. рис. 7, ж). Морфологически диагностируемые микробиоморфы практически отсутствуют, что может говорить о суровости условий, не способствующих их сохранению (в частности, значительные амплитуды перепада температур и частота циклов промерзания–оттаивания). Вероятнее всего, в период формирования этих отложений (МИС 6 [Murton et al., 2022]) здесь господствовала тундрово-степная растительная ассоциация, что подтверждается и данны-

ми других исследований в регионе [Ashastina et al., 2017, 2018] и в соседствующих областях [Губин, 2002].

Второй, наиболее ярко морфологически и физико-химически выраженный интервал глубин относится к субгоризонтальному прослою эпигенной (сформированной при отсутствии или относительно слабой выраженности синлитогенного поступления осадочного материала) погребенной почвы, залегающему в центральной части толщи разреза (38–43 м, пачка 3). Здесь вновь наблюдается заметное возрастание доли физической глины, ярко выражено повышение значений МВ, содержания общего углерода и ППП, резкое сниже-

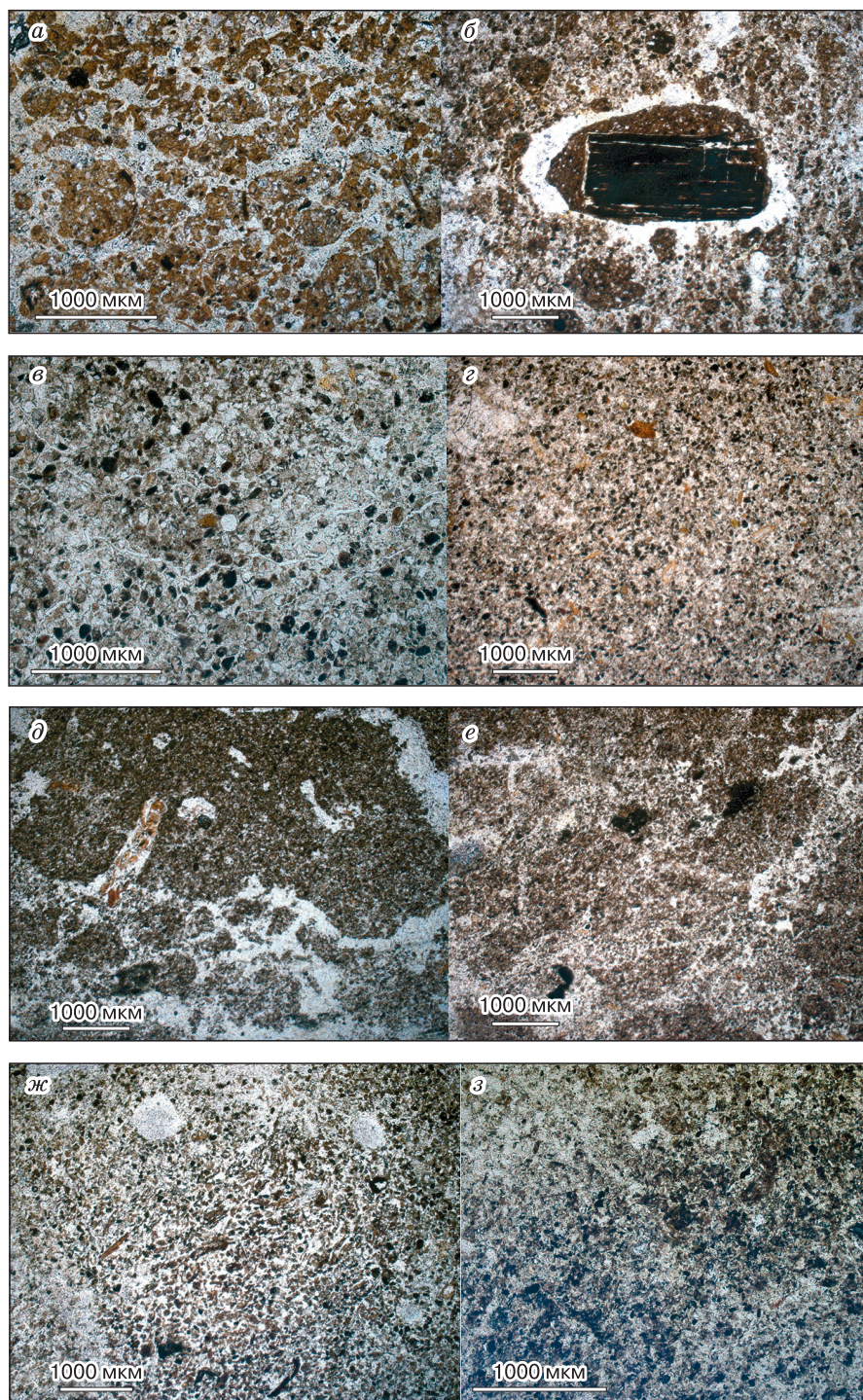


Рис. 7. Микростроение современной почвы (а, б) и ММП в пачках 5 (в, з), 4 (д, е), 3 (ж) и 2 (з). Скважина 1-20.

ние значений pH (см. рис. 5). Морфологическое строение профиля обнаруживает высокое сходство со строением современных торфяно-подбуров, развитых в районе исследований, а процессы миграции альфегумусовых соединений здесь вы-

ражены ярче, в виде охристой прокраски минеральных горизонтов, подстилающих органоминеральные (см. рис. 3). В микроморфологическом строении материала диагностируются четко оформленные комковато-плитчатые и ооидные

агрегаты, хорошо сохранившиеся углистые частицы и корневые ходы, поровое пространство имеет ясные границы (см. рис. 7, *д, е*). Минеральные частицы имеют тонкие светло-коричневые пленки оксидов железа, некоторые слабоокатанные зерна минералов содержат сгустки темноокрашенной органики на поверхности. Присутствует оптически неориентированная глина, участвующая в образовании сложных микроагрегатов. Преобладание слабоокатанного материала указывает на близость источника его формирования и поступления. Микростроение погребенных почв возраста МИС 5 описано в [Sheinkman *et al.*, 2021]. Однако наши результаты показывают, что почвообразование здесь также шло под разреженной таежной растительностью, при достаточно высокой теплообеспеченности, периодической смене режимов увлажнения–иссушения и циклов сезонного промерзания–оттаивания. Об этом свидетельствует криогенное оструктурирование, рубификация (ожелезнение), а также слабые признаки перемещения

продуктов гумификации и глинистого материала из микрозон их формирования.

Изученный ФС материала ПЖЛ пачки 3 (рис. 8, *А*) позволил реконструировать довольно разнообразные травянистые ассоциации с доминированием злаков. Присутствие проводящих тканей хвойных с окаймленными порами позволяет предположить их произрастание поблизости. Выявлены формы, специфичные для влаголюбивой растительности семейств Poaceae и Cyperaceae, в том числе для тростника (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), космополита, многолетнего влаголюбивого злака, произрастающего сейчас в Якутии.

Обнаружение в материале слоя обломков раковин диатомовых водорослей подтверждает эпизодическое переувлажнение почвенного материала, вероятно, в ложбинах над ПЖЛ. Высокое насыщение фитолитами происходило, в том числе, за счет дополнительного увлажнения и сноса материала в условиях западного рельефа. Такие

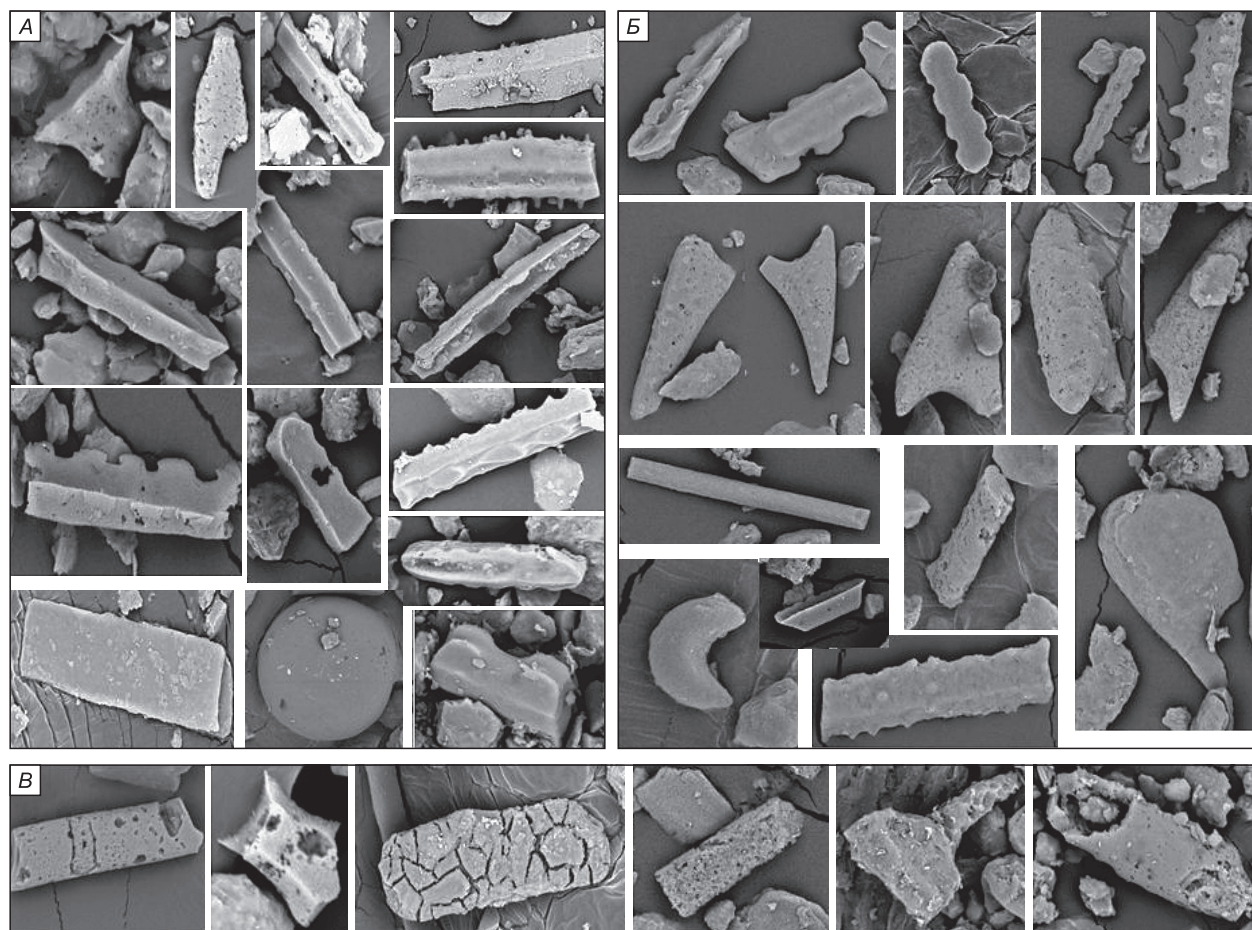


Рис. 8. Фитолитные спектры эпигенной погребенной почвы МИС 5е (А) и верхнего ЛК МИС 4–2 (Б) и примеры криогенного разрушения фитолитов (В).

А – пачка 4; Б – пачка 5. Масштаб 20 мкм.

условия могли возникать при протаивании верхней части ММП и формировании озерно-аллювиальных ландшафтов в интерстадиалы или межледниковья.

В материале ассоциированных с палеопочвой палеотермоэрозионных врезов обнаружены крупные остатки кустарниковой и древесной растительности, а также фрагменты бересты, что указывает на существование здесь в МИС 5е экологических условий, близких к современным. Предыдущими исследованиями [Ashastina et al., 2018] подтверждается формирование здесь открытых лиственных лесов с участием березы повислой (*Betula pendula*), ольхи (*Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa*), шиповника (*Rosa acicularis*), багульника (*Ledum palustre*) и других видов, характерных для относительно более теплых условий.

Материал верхней части разреза (пачки 4 и 5, глубина от 2–3 до 35 м), по данным аналитических и микроморфологических исследований скв. 1–20, является относительно монотонным и практически не имеет признаков активного педогенеза. Лишь отдельные образцы, преимущественно на контакте с ПЖЛ, обнаруживают незначительное повышение значений общего углерода и ППП. Общая масса минерального материала характерно обогащена мелкодисперсным травянистым детритом и часто бесструктурна (см. рис. 7, з) или имеет тонкоплитчатую структуру (см. рис. 7, в). Подобное микростроение и физико-химические свойства характерны для материала криопедолитов, ранее описанных в большинстве обнажений ММП возраста МИС 4–2 [Томирдиаро, 1980; Губин, 1996; Губин, Веремеева, 2010; Губин, Лупачев, 2012; Murton et al., 2015]. Лишь в северной части стенки обнажения, в зоне контакта пачек 4 и 5, морфологически выражены темноокрашенные прослои, обогащенные торфянистым материалом (вероятно, палеопочвы МИС 3; что требует дополнительного изучения). К этой зоне относится и инситное (захороненное на месте обитания без переотложения) нахождение первой в истории полной туши жеребенка (*Equus* sp.) исключительной сохранности, без каких-либо видимых внешних повреждений ММ-F23 (рис. 9) [Чепрасов и др., 2021].

Материал покровного слоя (пачка 6) генетически связан с подстилающими отложениями, обладает схожими физико-химическими свойствами, но в определенной мере более преобразован педогенными процессами. Его криолитологическое строение отличается от монотонных массивно-мерзлых отложений песчаной пачки 5 наличием отдельных прослоев мощностью 10–20 см, с более высокой льдистостью за счет шлировой криотекстуры. В материале керн скв. 1–20, на глубинах 120–135, 170 и 210 см, обнаружены горизонты, окрашенные в относительно более темные



Рис. 9. Полная туша ископаемого жеребенка *Equus* sp. (ММ-F23; 39 850 ± 280 лет назад (Carbon Analysis Lab, Южная Корея)).

и холодные тона и содержащие множественные темноокрашенные мелкие (2–3 мм) концентрические пятна сульфидов, предположительно пирита, и указывающие на анаэробные условия. Подобные горизонты ранее диагностировали внутри и на подошве покровного слоя ММП в обнажениях на Колымской низменности [Lupachev, Gubin, 2023]. Вероятно и в данном случае, эти небольшие по мощности горизонты могут выступать маркерами мощности деятельного слоя в различные периоды голоцена.

Предположительно, к материалу покровного слоя ММП относятся палеонтологические находки останков лошади ММ-F3 и мумии теленка бизона ММ-F4 (рис. 10). Они были обнаружены неинситно, но их локализация позволяла предположить относительную молодость вмещавших их отложений (МИС 2–1).

Возраст находки ММ-F3 был отнесен к среднему голоцену (4400 ± 35 лет назад; GrA-48709 [Лазарев и др., 2011]). В 2010 г. в нижнем течении р. Яна была обнаружена фрагментированная туша лошади практически того же возраста 4630 ± 35 лет (GrA-540209) [Boeskorov et al., 2013]. Это подтверждает, что эти древние копытные не вымерли в конце плейстоцена, а сохранились в послеледниковое время. Полученные радиоуглеродные даты по костным остаткам этого вида свидетельствуют о том, что древние лошади существовали и в позднем голоцене, как минимум до 2200 лет назад, на о. Большой Ляховский [Boeskorov, 2019] и полностью вымерли, не оставив потомков среди ныне живущих лошадей [Librado et al., 2015]. Недалеко от нахождения лошади ММ-F3 была обнаружена мумия теленка бизона ММ-F4 (8215 ± 45 лет; GrA-50838). В 2011 г. в низовьях р. Яна был обнаружен еще один раннеголоценовый бизон (9310 ± 45 лет; GrA-53290) [Boeskorov et al., 2016], что стало дополнительным свидетельством распространения бизонов на севере

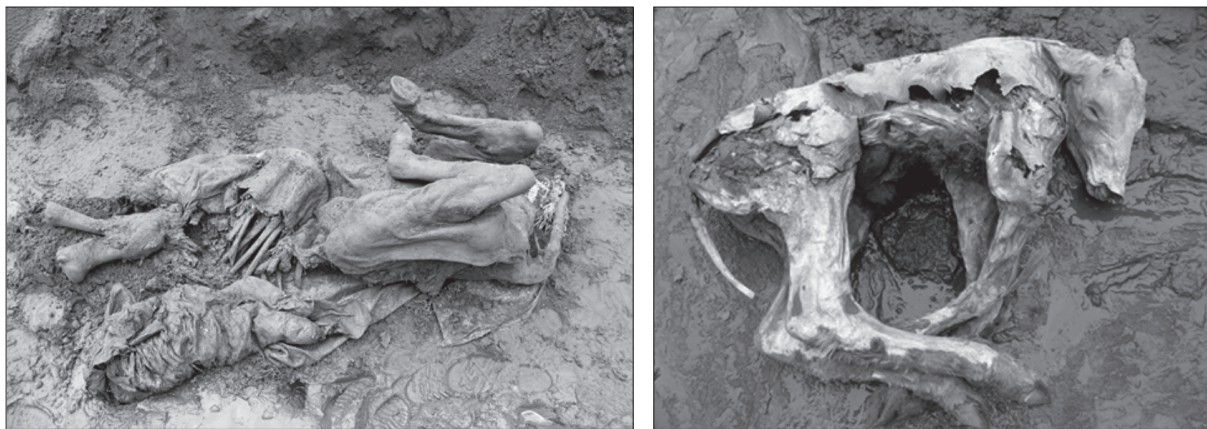


Рис. 10. Мумифицированные остатки лошади *Equus lenensis* (ММ-F3, слева) и полная туша тельца бизона (*Bison priscus*) (ММ-F4, справа).

ро-востоке Сибири до начала голоцена. Таким образом, радиоуглеродный возраст ископаемых лошадей и бизонов в районе Батагайского разреза и прилегающих территорий подтверждает предположение о том, что северо-восток Якутии был рефугиумом для некоторых млекопитающих мамонтовой фауны вплоть до МИС 1.

Полученные нами данные хорошо согласуются с ранее опубликованными работами, посвященными педогенным свойствам и палеоэкологическим индикаторам синлитогенных толщ ММП, в том числе отложений, слагающих Батагайский разрез: морфологическое строение погребенных почв, а также наличие травянистого и мохового детрита во вмещающем материале криопедолитов [Губин, 2002], остатков листовых древесных пород, а также раковин диатомовых водорослей [Ashastina et al., 2017], содержание органического углерода в отложениях ММП, варьирующее в пределах 1–3 % [Mishra et al., 2021; Jongejans et al., 2022]. Это позволяет приблизиться к комплексному пониманию истории развития природной среды на территории Янского плоскогорья в плейстоцене–голоцене.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные палеоэкологические данные позволили подтвердить два относительно теплых и продолжительных климатических периода формирования развитого почвенно-растительного покрова, зафиксированных в строении отложений разреза Батагай. Первый этап соответствует формированию отложений нижнего ЛК (МИС 15–17; 600–700 тыс. лет либо МИС 7e; 230–250 тыс. лет) и маркирован палеопочвой, по строению наиболее близкой к современным торфяно-глееземам. Ко второму этапу приурочен обширный субгоризонтальный прослой эпигенной, сформированной при отсутствии или слабой выраженности процес-

сов осадконакопления, погребенной почвы (близкий аналог современного торфяно-подбуря), залегающий в центральной части толщи разреза (МИС 5e; 110–130 тыс. лет).

Ряд ведущих педогенных свойств и признаков погребенных почв (морфологическое строение, содержание физической глины, общее содержание и соотношение углерода и азота, потери при прокаливании, pH, магнитная восприимчивость), рассмотренных в работе, указывают на их близость к современным почвам региона.

Изучение фитолистных спектров в подземных льдах проведено впервые, недостаток сведений об аккумуляции микрофоссилий в ПЖЛ осложняет решение палеоэкологических задач в криолитозоне. Невозможность соотнесения отдельного материала образца, отобранного в ПЖЛ, с поверхностью и со временем его образования показали необходимость трактовать полученные результаты не в динамике по глубине керна, а как совокупные характеристики отдельной пачки. Тем не менее количественный и качественный состав ФС позволил охарактеризовать благоприятные биоклиматические условия межледниковья МИС 5e и использовать эти данные для диагностики палеопочвенных горизонтов.

Находки ископаемых останков представителей мамонтовой фауны в районе Батагайского разреза и прилегающих территорий характеризуют этапы чередования тундростепной и северо-таежной растительности в ходе накопления отложений ММП и подтверждают предположение о том, что северо-восток Якутии был рефугиумом для некоторых млекопитающих мамонтовой фауны вплоть до поздних этапов МИС 1.

Благодарности. Авторы благодарят Э.В. Стручкова за всестороннюю помощь при проведении экспедиционных исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ грант (№ 23-27-00242, <https://rscf.ru/project/23-27-00242>).

Литература

- Боескоров Г.Г.** Существование индикаторных видов мамонтовой фауны в голоцене Якутии // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. (Якутск, 10–12 апр. 2019 г.). Якутск, Изд. дом СВФУ, 2019, с. 15–19.
- Боескоров В.С., Саввинов Г.Н.** Палеоэнтомофауна мерзлотных почв Янского плоскогорья // Тезисы докл. VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв: “Почвы – стратегический ресурс России” (Сыктывкар, 22 апр. 2021 г.). Москва; Сыктывкар, Ин-т биологии Коми науч. центра УрО РАН, 2021, ч. 3, с. 765–766.
- Васильчук Ю.К., Васильчук Д.Ю., Гинзбург А.П.** Криогенные почвы в районе Батагайского мегаоврага, север Якутии // Арктика и Антарктика, 2020, № 3, с. 52–98.
- Гагарина Э.И.** Микроморфологический метод исследования почв. СПб., Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004, 155 с.
- Гаврилов А.В.** Яно-Оймяконский регион // Геоэкология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М., Недра, 1989, с. 200–212.
- Губин С.В.** Позднеплейстоценовое почвообразование на территории Северо-Восточной Евразии // Докл. АН СССР, 1996, т. 351, № 4, с. 544–547.
- Губин С.В.** Педогенез – составная часть механизма формирования отложений позднеплейстоценового ледового комплекса // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 3, с. 82–91.
- Губин С.В., Веремеева А.А.** Почвообразующие породы Северо-Востока России, обогащенные органическим веществом // Почвоведение, 2010, № 11, с. 1334–1342.
- Губин С.В., Лупачев А.В.** Подходы к выделению и изучению погребенных почв в мерзлых толщах отложений ледового комплекса // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 2, с. 79–84.
- Занина О.Г.** Почвообразование и природные условия каргинского времени на Колымской низменности: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Москва, 2006, 18 с.
- Занина О.Г., Лопатина Д.А.** Возможности реконструкции состава растительных ассоциаций низовьев реки Колымы с помощью сопряженного (палинологического, фитолитного и карпологического) анализа // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 13–23.
- Занина О.Г., Лопатина Д.А.** Биоиндикаторы условий формирования верхнеплейстоценовых каргинских и сарганских отложений Колымской низменности и особенности их тафономии при многократном воздействии криогенных факторов // Стратиграфия. Геол. корреляция, 2022, т. 30, № 5, с. 111–128.
- Куницкий В.В., Сыромятников И.И., Ширрмейстер Л. и др.** Лыстые породы и термоденудация в районе поселка Батагай (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь) // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 1, с. 56–68.
- Лабораторные** методы исследования мерзлых пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 350 с.
- Лазарев П.А., Григорьев С.Е., Плотников В.В., Саввинов Г.Н.** Находки уникальных останков туш лошади и бизона в Верхоянском районе Якутии // Пробл. регион. экологии, 2011, № 4, с. 13–18.
- Лопатина Д.А., Занина О.Г.** Субрецентные спорово-пыльцевые спектры низовьев р. Колымы и их значение для реконструкции четвертичной палеогеографии региона // Стратиграфия, геол. корреляция, 2016, т. 24, № 2, с. 103–112.
- Новиков Г.А.** Хищные млекопитающие фауны СССР (Определители по фауне СССР, издаваемые Зоол. ин-том АН СССР, вып. 62). М.; Л., Изд-во АН СССР, 1956, 295 с.
- Полевой** определитель почв. М., Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008, 182 с.
- Саввинов Г.Н., Данилов П.П., Петров А.А. и др.** Экологические проблемы Верхоянского района // Вестн. СВФУ. Сер. Науки о Земле, 2018, вып. 68, № 6, с. 18–33.
- Теории и методы физики почв** / Под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. М., Гриф и К, 2007, 616 с.
- Теория и практика химического анализа почв** / Под ред. Л.А. Воробьевой. М., ГЕОС, 2006, 400 с.
- Томирдиаро С.В.** Лессово-ледовая формация Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене. М., Наука, 1980, 183 с.
- Чепрасов М.Ю., Григорьев С.Е., Новгородов Г.П. и др.** Предварительные исследования жеребенка древней лошади // Четвертичная палеонтология и палеоэкология Якутии: Материалы Междунар. науч. семинара, посвящ. 85-летию со дня рождения П.А. Лазарева (1936–2011). Якутск, Изд. дом СВФУ, 2021, с. 55–58.
- Шур Ю.Л.** Верхний горизонт толщ мерзлых пород и термокарст. Новосибирск, Наука, 1988, 212 с.
- Ashastina K., Schirrmeister L., Fuchs M., Kienast F.** Palaeoclimate characteristics in interior Siberia of MIS 6–2: first insights from the Batagay permafrost mega-thaw slump in the Yana Highlands // Clim. Past, 2017, vol. 13, iss. 7, p. 795–818.
- Ashastina K., Kuzmina S., Rudaya N. et al.** Woodlands and steppes: Pleistocene vegetation in Yakutia's most continental part recorded in the Batagay permafrost sequence // Quat. Sci. Rev., 2018, vol. 196, p. 38–61.
- Boeskorov G.G., Protopopov A.V., Mashchenko E.N. et al.** New findings of unique preserved fossil mammals in the permafrost of Yakutia // Dokl. Biol. Sci., 2013, vol. 452, p. 291–295.
- Boeskorov G.G., Potapova O.R., Protopopov A.V. et al.** The Yukagir Bison: analysis of a complete frozen mummy of the bison, *Bison priscus* from the early Holocene of Northern Eurasia // Quat. Int., 2016, vol. 406, p. 94–110.
- Froese D.G., Westgate J.A., Reyes A.V. et al.** Ancient permafrost and a future, warmer Arctic // Science, 2008, vol. 321, No. 5896, p. 1648.
- Günther F., Grosse G., Jones B.M. et al.** Unprecedented permafrost thaw dynamics on a decadal time scale: Batagay mega thaw slump development, Yana Uplands, Yakutia, Russia / AGU Fall Meeting. San Francisco, 2016.
- Isaev A.P., Timofeyev P.A.** General characteristics of Boreal forests / E.I. Troeva, A.P. Isaev, M.M. Cherosov, N.S. Karpov (eds.). The Far North: Plant Biodiversity and Ecology of Yakutia. Dordrecht, Springer, 2010, p. 164–168.
- Jongejans L.L., Mangelsdorf K., Karger C. et al.** Molecular biomarkers in Batagay megaslump permafrost deposits reveal clear differences in organic matter preservation between glacial and interglacial periods // The Cryosphere, 2022, vol. 16, No. 9, p. 3601–3617.
- Kizyakov A.I., Wetterich S., Günther F. et al.** Landforms and degradation pattern of the Batagay thaw slump, Northeastern Siberia // Geomorphology, 2023, vol. 420, p. 108501.
- Librado P., Sarkissian C.D., Ermini L. et al.** Tracking the origins of Yakutian horses and the genetic basis for their fast

adaptation to subarctic environments // *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2015, vol. 112, No. 50, p. E6889–E6897.

Lord E., Marangoni A., Baca M. et al. Population dynamics and demographic history of Eurasian collared lemmings // *BMC Ecol. and Evolut.*, 2022, vol. 22, No. 1, p. 126.

Lupachev A.V., Gubin S.V. Soil-cryogenic complex: the evidence of Late Pleistocene–Holocene coevolution of permafrost and cryogenic soils // *Permafr. Periglac. Process.*, 2023, vol. 34, No. 3, p. 317–330.

Maschenko E.N. Individual development, biology and evolution of the woolly mammoth *Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799) // *Cranium*, 2002, vol. 19, No. 1, p. 120.

Mishra U., Hugelius G., Shelef E. et al. Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks // *Sci. Advanc.*, 2021, vol. 7, No. 9, eaz5236.

Murton J., Goslar T., Edwards M.E. et al. Palaeoenvironmental Interpretation of Yedoma Silt (Ice Complex) Deposition as Cold-Climate Loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia // *Permafr. Periglac. Process.*, 2015, vol. 26, No. 3, p. 208–288.

Murton J., Edwards M., Lozhkin A. et al. Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana Uplands, northeast Siberia // *Quat. Res.*, 2017, vol. 87, No. 2, p. 314–330.

Murton J., Opel T., Toms P. et al. A multimethod dating study of ancient permafrost, Batagay megaslump, East Siberia // *Quat. Res.*, 2022, vol. 105, p. 1–22.

Murton J., Opel T., Wetterich S. et al. Batagay megaslump: A review of the permafrost deposits, Quaternary environmental history, and recent development // *Permafr. Periglac. Process.*, 2023, vol. 34, p. 399–416.

Novgorodov G.P., Grigorev S.E., Cheprasov M.Y. Prospective location of the mammoth fauna in the Yana river basin // *Int. J. Appl. Fundament. Res.*, 2013, No. 8, p. 255–259.

Palkopoulou E., Baca M., Abramson N.I. et al. Synchronous genetic turnovers across Western Eurasia in Late Pleistocene collared lemmings // *Glob. Change Biol.*, 2016, vol. 22, No. 5, p. 1710–1721.

Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh L.S. et al. A multiproxy record of sedimentation, pedogenesis, and environmental history in the north of West Siberia during the Late Pleistocene based on the Belaya Gora section // *Quat. Res.*, 2021, vol. 99, p. 204–222.

Shestakova A.A., Fedorov A.N., Torgovkin Y.I. et al. Mapping the main characteristics of permafrost on the basis of a permafrost-landscape map of Yakutia using GIS // *Land*, 2021, vol. 10, No. 5, p. 462.

Shur Y., Hinkel K.M., Nelson F.E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science // *Permafr. Periglac. Process.*, 2005, vol. 16, p. 5–17.

von den Driesch A. A guide to the measurement of animal bones from archaeological sites / Peabody Museum of Archaeological and Ethnology Harvard University. Cambridge, 1976, 137 p.

URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/24263.htm> (дата обращения: 28.09.2023).

References

Boeskorov G.G. The existence of indicator species of mammoth fauna in the Holocene of Yakutia. In: *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Materials of the IX All-Russian Scientific and Practical Conf. (Yakutsk, 10–12 April 2019)*. Yakutsk, Izd. Dom SVFU, 2019, p. 15–19 (in Russian).
Boeskorov V.S., Savvinov G.N. Paleoentomofauna of permafrost soils of the Yansk Plateau. In: *Abstracts of the VIII Congress of*

the V.V. Dokuchaev's Society of Soil Scientists and the School of Young Scientists on Soil Morphology and Classification: "Soils – a strategic resource of Russia" (Syktyvkar, April 22, 2021). Moscow; Syktyvkar, Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch RAS, 2021, vol. 3, p. 765–766 (in Russian).

Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk D.Yu., Ginzburg A.P. Cryogenic soils in the area of Batagai crater in Northern Yakutia. *Arctika i Antarktika [Arctic and Antarctic]*, 2020, No. 3, p. 52–98 (in Russian).

Gagarina E.I. Mikromorfologicheskii metod i issledovaniya pochv [Micromorphological method of soil investigation]. S.-Petersburg, Izd-vo St. Petersburg Univ., 2004, 156 p. (in Russian).

Gavrilov A.V. Yano-Oymyakonskiy region. In: *Geocryology of USSR, Eastern Siberia and Far East*. Moscow, Nedra, 1989, p. 200–212 (in Russian).

Gubin S.V. Late Pleistocene soil formation in northeastern Eurasia. *Doklady Akademii nauk*, 1996, vol. 351, No. 4, p. 544–547 (in Russian).

Gubin S.V. Pedogenesis is a part of the mechanism of formation of deposits in Late Pleistocene ice complex. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2002, vol. VI, No. 3, p. 82–91 (in Russian).

Gubin S.V., Veremeeva A.A. Parent materials enriched in organic matter in the Northeast of Russia. *Eur. Soil Sci.*, 2010, vol. 43, No. 11, p. 1238–1243.

Gubin S.V., Lupachev A.V. Approaches to determination and investigation of soils buried in ice complex deposits. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2012, vol. 2, p. 79–84 (in Russian).

Zanina O.G. Soil genesis and environmental conditions during the Karginsky time in the Kolyma Lowland. *Cand. (Geogr.) Dissertation*. Moscow, 2006, 18 p.

Zanina O.G., Lopatina D.A. The possibilities of reconstructing the composition of vegetation communities on the basis of conjugated palynological, phytolith and carpological analyses for lower course area of the Kolyma River. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, No. 3, p. 12–22.

Zanina O.G., Lopatina D.A. Bioindicators of the Upper Neopleistocene Karginsky and Sartansky Deposits of the Kolyma Lowland and features of their taphonomy under multiple exposure to cryogenic factors. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2022, vol. 30, No. 5, p. 442–456.

Kunitsky V.V., Syromyatnikov I.I., Schirrmeister L. et al. Ice-rich permafrost and thermal denudation in the Batagay area (Yana Upland, East Siberia). *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2013, vol. XVII, No. 1, p. 56–68 (in Russian).

Laboratornye metody issledovaniya merzlykh porod [Laboratory methods for permafrost study]. E.D. Ershov (ed.). Moscow, Izd-vo MGU, 1985, 350 p. (in Russian).

Lazarev P.A., Grigoriev S.E., Plotnikov V.V., Savinov G.N. Finds of unique remains of horse and bison carcasses in the Verkhoyansky district of Yakutia. *Problemy regional'noy ekologii [Problems of regional ecology]*, 2011, No. 4, p. 13–18 (in Russian).

Lopatina D.A., Zanina O.G. Subrecent spore-pollen spectra from the Lower Kolyma River basin and their importance for the reconstruction of the Quaternary paleogeography of the region. *Stratigr. Geol. Correlation*, 2016, vol. 24, No. 2, p. 203–211.

Novikov G.A. Predatory mammals of the fauna of the USSR (Determinants of the fauna of the USSR, published by Zool. In-volume of the USSR Academy of Sciences, iss. 62). Moscow; Leningrad, Izd-vo AN SSSR, 1956, 295 p. (in Russian).

Polevoi opredelitel' pochv [Field determinant of Russian soils]. Moscow, Dokuchaev Soil Institute, 2008, 182 p. (in Russian).

- Savvinov G.N., Danilov P.P., Petrov A.A. et al. Environmental Problems of the Verkhoyansky Region. *Vestnik SVFU [Vestnik of North-Eastern Federal University]*, 2018, No. 6, p. 18–33 (in Russian).
- Teorii i metody fiziki pochv [Theory and Methods of Soil Physics]. E.V. Shein, L.O. Karpachevskii (eds.). Moscow, Izd. Grif i K, 2007, 616 p. (in Russian).
- Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv [Theory and practice of chemical analysis of soils]. L.A. Vorobyova (ed.). Moscow, GEOS, 2006, 400 p. (in Russian).
- Tomirdiario S.V. Lessovo-ledovaya formatsiya Vostochnoi Sibiri v pozdnem pleistotsene i golotsene [Loess-ice formation in East Siberia during the Late Pleistocene and Holocene]. Moscow, Nauka, 1980, 432 p. (in Russian).
- Cheprasov M.Yu., Grigoriev S.E., Novgorodov G.P. et al. Preliminary studies of the foal of an ancient horse. In: *Quaternary paleontology and paleoecology of Yakutia: Materials of the Int. sci. seminar dedicated to the 85th anniversary of the birth of P.A. Lazarev (1936–2011)*. Yakutsk, Izd. Dom SVFU, 2021, p. 55–58 (in Russian).
- Shur Y. Verkhniy gorizont tolshch merzlykh porod i termokarsy [The upper horizon of permafrost and thermokarst]. Novosibirsk, Nauka, 1988, 210 p. (in Russian).
- Ashastina K., Schirrmeister L., Fuchs M., Kienast F. Palaeoclimate characteristics in interior Siberia of MIS 6–2: first insights from the Batagay permafrost mega-thaw slump in the Yana Highlands. *Clim. Past*, 2017, vol. 13, iss. 7, p. 795–818.
- Ashastina K., Kuzmina S., Rudaya N. et al. Woodlands and steppes: Pleistocene vegetation in Yakutia's most continental part recorded in the Batagay permafrost sequence. *Quat. Sci. Rev.*, 2018, vol. 196, p. 38–61.
- Boeskorov G.G., Protopopov A.V., Mashchenko E.N. et al. New findings of unique preserved fossil mammals in the permafrost of Yakutia. *Dokl. Biol. Sci.*, 2013, vol. 452, p. 291–295.
- Boeskorov G.G., Potapova O.R., Protopopov A.V. et al. The Yukagir Bison: analysis of a complete frozen mummy of the bison, *Bison priscus* from the early Holocene of Northern Eurasia. *Quat. Int.*, 2016, vol. 406, p. 94–110.
- Froese D.G., Westgate J.A., Reyes A.V. et al. Ancient permafrost and a future, warmer Arctic. *Science*, 2008, vol. 321, No. 5896, p. 1648.
- Günther F., Grosse G., Jones B.M. et al. Unprecedented permafrost thaw dynamics on a decadal time scale: Batagay mega thaw slump development, Yana Uplands, Yakutia, Russia. In: *AGU Fall Meeting, San Francisco*, 2016.
- Isaev A.P., Timofeyev P.A. General characteristics of Boreal forests. In: E.I. Troeva, A.P. Isaev, M.M. Cherosov, N.S. Karpov (eds.). *The Far North: Plant Biodiversity and Ecology of Yakutia*. Dordrecht, Springer, 2010, p. 164–168.
- Jongejans L.L., Mangelsdorf K., Karger C. et al. Molecular biomarkers in Batagay megaslump permafrost deposits reveal clear differences in organic matter preservation between glacial and interglacial periods. *The Cryosphere*, 2022, vol. 16, No. 9, p. 3601–3617.
- Kizyakov A.I., Wetterich S., Günther F. et al. Landforms and degradation pattern of the Batagay thaw slump, Northeastern Siberia. *Geomorphology*, 2023, vol. 420, p. 108501.
- Librado P., Sarkissian C.D., Ermini L. et al. Tracking the origins of Yakutian horses and the genetic basis for their fast adaptation to subarctic environments. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2015, vol. 112, No. 50, p. E6889–E6897.
- Lord E., Marangoni A., Baca M. et al. Population dynamics and demographic history of Eurasian collared lemmings. *BMC Ecol. and Evolut.*, 2022, vol. 22, No. 1, p. 126.
- Lupachev A.V., Gubin S.V. Soil-cryogenic complex: the evidence of Late Pleistocene-Holocene coevolution of permafrost and cryogenic soils. *Permafr. Periglac. Process.*, 2023, vol. 34, No. 3, p. 317–330.
- Maschenko E.N. Individual development, biology and evolution of the woolly mammoth *Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799). *Cranium*, 2002, vol. 19, No. 1, p. 120.
- Mishra U., Hugelius G., Shelef E. et al. Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks. *Sci. Advanc.*, 2021, vol. 7, No. 9, eaaz5236.
- Murton J., Goslar T., Edwards M.E. et al. Palaeoenvironmental Interpretation of Yedoma Silt (Ice Complex) Deposition as Cold-Climate Loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia. *Permafr. Periglac. Process.*, 2015, vol. 26, No. 3, p. 208–288.
- Murton J., Edwards M., Lozhkin A. et al. Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana Uplands, northeast Siberia. *Quat. Res.*, 2017, vol. 87, No. 2, p. 314–330.
- Murton J., Opel T., Toms P. et al. A multimethod dating study of ancient permafrost, Batagay megaslump, East Siberia. *Quat. Res.*, 2022, vol. 105, p. 1–22.
- Murton J., Opel T., Wetterich S. et al. Batagay megaslump: A review of the permafrost deposits, Quaternary environmental history, and recent development. *Permafr. Periglac. Process.*, 2023, vol. 34, p. 399–416.
- Novgorodov G.P., Grigorev S.E., Cheprasov M.Y. Prospective location of the mammoth fauna in the Yana river basin. *Int. J. Appl. Fundam. Res.*, 2013, No. 8, p. 255–259.
- Palkopoulou E., Baca M., Abramson N.I. et al. Synchronous genetic turnovers across Western Eurasia in Late Pleistocene collared lemmings. *Glob. Change Biol.*, 2016, vol. 22, No. 5, p. 1710–1721.
- Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh L.S. et al. A multiproxy record of sedimentation, pedogenesis, and environmental history in the north of West Siberia during the late Pleistocene based on the Belaya Gora section. *Quat. Res.*, 2021, vol. 99, p. 204–222.
- Shestakova A.A., Fedorov A.N., Torgovkin Y.I. et al. Mapping the main characteristics of permafrost on the basis of a permafrost-landscape map of Yakutia using GIS. *Land*, 2021, vol. 10, No. 5, p. 462.
- Shur Y., Hinkel K.M., Nelson F.E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science. *Permafr. Periglac. Process.*, 2005, vol. 16, p. 5–17.
- von den Driesch A. A guide to the measurement of animal bones from archaeological sites / Peabody Museum of Archaeological and Ethnology Harvard University. Cambridge, 1976, 137 p.
- URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/24263.htm> (last visited: 28.09.2023).

Поступила в редакцию 25 октября 2023 г.,
после доработки – 11 декабря 2023 г.,
принята к публикации 25 декабря 2023 г.