

ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 579.64

doi: 10.17223/19988591/72/1

Влияние микрорельефа на морфометрическую характеристику морфологических паттернов подзолов: результаты цифрового анализа изображений

**Дарья Михайловна Кузьмина¹, Сергей Васильевич Лойко²,
Алина Олеговна Курасова³, Александр Андреевич Дудко⁴,
Юлия Александровна Васильева⁵,
Александр Олегович Константинов⁶,
Сергей Павлинович Кулижский⁷**

^{1, 2, 3, 6, 7} *Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия*

⁴ *Научно-производственный центр «АРХЕО», Омск, Россия*

⁵ *Ямальская археологическая экспедиция, Салехард, Россия*

¹ <https://orcid.org/0000-0002-9121-5407>, kuzmina.d.m.95@gmail.com

² <https://orcid.org/0000-0003-2020-4716>, s.loyko@yandex.ru

³ <https://orcid.org/0000-0003-4479-3789>, kurasovalina@gmail.com

⁴ a-dudko9@mail.ru

⁵ jvsl@mail.ru

⁶ <https://orcid.org/0000-0002-6950-2207>, konstantinov.alexandr72@gmail.com

⁷ <https://orcid.org/0000-0001-5545-1296>, kulizhskiy@yandex.ru

Аннотация. Одной из ключевых задач современной морфологии почв является объективная количественная оценка неоднородности почв и дешифрирование почвенной памяти, закодированной в макроморфологических паттернах. Цифровые методы анализа изображений открывают новые возможности для её решения. В работе предложен подход цифрового морфометрического анализа зачисток подзолов (Glossic Stagnic/Folic Albic Podzols) среднетаежной подзоны Западной Сибири, сформированных на песчаных отложениях в двух формах микрорельефа – гриве и западине. Методология включала обработку фотографий горизонтальных и вертикальных зачисток, полученных при археологических раскопках, в программах Adobe Photoshop и ImageJ с выделением морфонов генетических горизонтов (O, E, Eh, BF1, BF2, BC, Vox, [AY]) и расчётом их площадных и геометрических параметров. Установлены статистически значимые различия в распределении морфонов между элементами рельефа: в западинах выявлены гидрогенно-ожелезнённые (Vox) и погребённые серогумусовые ([AY]) морфоны раннеголоценового возраста (7,8–8,5 тыс. кал. л.н.), а на гривах – псевдофибры. Показано, что формирование сложной морфонной организации является результатом сочетания процессов заполнения корневых ходов, ветровальных нарушений и последующей элювиально-иллювиальной дифференциации. Подход подтверждает перспективность цифровой морфометрии для количественной оценки внутрипрофильной неоднородности почв, реконструкции их генезиса и уточнения запасов почвенного органического углерода.

Ключевые слова: подзолы иллювиально-железистые, подзолы языковатые, ветровалы, геoarхеология, радиоуглеродный возраст, генезис почв, остаточно-гумусовые морфоны

Источник финансирования: исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2024-0006).

Для цитирования: Кузьмина Д.М., Лойко С.В., Курасова А.О., Дудко А.А., Васильева Ю.А., Константинов А.О., Кулижский С.П. Влияние микрорельефа на морфометрическую характеристику морфологических паттернов подзолов: результаты цифрового анализа изображений // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 72. С. 7–37. doi: 10.17223/19988591/72/1

SOIL SCIENCE

Original article

doi: 10.17223/19988591/72/1

Microtopography influences morphometric characteristics of morphological patterns of Podzols: results of digital image analysis

Daria M. Kuzmina¹, Sergey V. Loiko², Alina O. Kurasova³,
Alexander A. Dudko⁴, Yulia V. Vasileva⁵, Alexander O. Konstantinov⁶,
Sergey P. Kulizhskiy⁷

^{1, 2, 3, 6, 7} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

⁴ Research and Production Center “ARKHEO”, Omsk, Russian Federation

⁵ Yamal Archaeological Expedition, Salekhard, Russian Federation

¹ <https://orcid.org/0000-0002-9121-5407>, kuzmina.d.m.95@gmail.com

² <https://orcid.org/0000-0003-2020-4716>, s.loyko@yandex.ru

³ <https://orcid.org/0000-0003-4479-3789>, kurasovalina@gmail.com

⁴ a-dudko9@mail.ru

⁵ jvsl@mail.ru

⁶ <https://orcid.org/0000-0002-6950-2207>, konstantinov.alexandr72@gmail.com

⁷ <https://orcid.org/0000-0001-5545-1296>, kulizhskiy@yandex.ru

Summary. This study addresses the fundamental need for a quantitative assessment of soil profile heterogeneity and the interpretation of genetic information encoded in macromorphological patterns. Digital image analysis offers a powerful new methodology for this task, particularly for soils with complex internal organisation, such as Podzols. The presented research develops and tests a digital morphometric approach for analysing soil sections.

The work was conducted in the middle taiga of Western Siberia on the left-bank terrace of the Bolshoy Yugan River (60°24'29.4840" N, 73°56'56.6808" E). The study objects were Glossic Stagnic/Folic Albic Podzols (WRB) formed on light alluvial deposits within two conjugate microtopographic elements: a ridge and an inter-ridge depression. The methodology utilised high-quality photographic records from large-scale archaeological excavations. In total, 76 horizontal and vertical soil sections with a combined area of 1653 m² were analysed.

The core methodology comprised processing section photographs in Adobe Photoshop CC 2018 for the preliminary delineation of horizons and morphons, followed by quantitative analysis in ImageJ 1.45 software. For each identified morphon of the genetic horizons (O, E, Eh, BF1, BF2, BC, Box, [AY]), key morphometric parameters were calculated: Area (%), Perimeter (cm), Aspect Ratio (AR), Circularity, Solidity, and Roundness. Statistical processing was performed using MS Excel 2019 and STATISTICA 12.

The key results are as follows. Statistically significant differences in the composition and spatial distribution of morphons between the ridge and the depression were established. In the depression soils, hydromorphic iron-enriched (Box) morphons and relic buried humus ([AY]) morphons were identified, whereas lamellae (pseudofibers) were characteristic of the ridge soils (*See Figs. 2 and 3*). Radiocarbon dating of charcoal from the [AY] morphons yielded an Early Holocene age of 7801–8546 cal yr BP (*See Table 1*).

Quantitative analysis revealed that the maximum number of eluvial (E) horizon morphons in the ridge soils is twice as high as in the depression at a depth of 25 cm, while their size (perimeter) is larger in the depression (*See Fig. 7*). The maximum area of the illuvial (BF2) horizon in the depression is located 10 cm higher in the profile compared to the ridge. This shift is associated with the occurrence of Box morphons in the depression, which peak in area at 55–65 cm depth (*See Fig. 7*). A previously undescribed contact eluvial-illuvial-humus (Eh) morphon, consistently located between the E and BF1 horizons, was identified and characterised (*See Fig. 3a and Fig. 7e, f*). Principal component analysis of the morphometric data confirmed the paragenesis of most morphons; only the Box morphons formed a distinct cluster due to their different genesis (*See Fig. 11 in Supplement 2*).

In conclusion, the formation of the complex macromorphological pattern in the studied Podzols is conclusively shown to result from three main agents acting in concert: (1) the penetration and die-back of tree root systems, forming deep rounded tongues; (2) windthrow disturbances, creating large elongated or rounded structures; and (3) subsequent eluvial-illuvial differentiation of substances along these biogenic pathways. The developed digital morphometry approach proves highly promising for the objective quantification of intra-profile soil heterogeneity, the reconstruction of pedogenesis, and the refinement of soil organic carbon stock estimates.

The article contains 7 Figures, 2 Tables, 66 References, and 2 Supplements.

Keywords: Glossic Stagnic Folic Albic Podzol и Glossic Folic Albic Podzol (Lamellic), windfalls, geoarchaeology, radiocarbon age, soil genesis, residual humus morphones

Fundings: this work was supported by a state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant No. FSWM-2024-0006).

For citation: Kuzmina DM, Loiko SV, Kurasova AO, Dudko AA, Vasileva YuA, Konstantinov AO, Kulizhskiy SP. Microtopography influences morphometric characteristics of morphological patterns of Podzols: results of digital image analysis. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;72:7–37. doi: 10.17223/19988591/72/1

Введение

Методы генетического анализа морфологических характеристик почв зародились на ранних этапах развития почвоведения и стали самым простым и очевидным способом получения информации о почвенном теле, его истории и функционировании. Значительный прогресс в области микро-

скопии позволил создать эффективные методы диагностики процессов на субмикро- и микроуровнях организации почвенной массы [1, 2]. Однако на уровне мезо- и макроморфологии подходы к интерпретации почвенных рисунков (паттернов) на зачистках почвенных профилей и естественных поверхностях почвенных отдельностей развивались менее динамично. В результате микроморфологические методы стали более популярными и часто используемыми по сравнению с макроморфологическими.

Макроморфологические исследования, включающие анализ срезов почв метровой размерности, получили развитие в основном для целей выделения почвенных горизонтов [3, 4], классификации и диагностики почв. Развитие макроморфологии всегда было ограничено возможностями фототехники, субъективным фактором при описании и зарисовке почвенных профилей, а также небольшим размером стандартного почвенного среза, невозможностью доставить и хранить крупные почвенные монолиты в лабораториях и депозитариях. Для преодоления этих ограничений предлагалось проводить морфологический анализ почв с использованием балльной системы в поле, а для удобства было введено понятие морфона [5].

Появление и совершенствование цифровой фототехники в последние два десятилетия явилось тем самым драйвером для развития мезо- и макроморфологии почв, как в свое время микроскопия и технологии изготовления шлифов для микроморфологии. Качественные матрицы высокой светочувствительности, автоматические алгоритмы выбора баланса белого, возможности фотовспышек позволяют в достаточной мере правдиво передавать окраску почвы в условиях естественного освещения, что позволяет уйти от субъективизма текстовых описаний, существовавшего в доцифровую эпоху. Современная техника позволила задействовать в исследованиях информацию, что несут в себе морфологические рисунки, вскрываемые на зачистках почв и трудно поддающиеся описаниям. Достаточно уже одного взгляда, чтобы уловить основной мотив строения почвы и, следовательно, главный почвообразовательный процесс. Благодаря современным матрицам фотоаппаратов можно в пределах одного фотоснимка «путешествовать» по нескольким иерархическим уровням сразу – от первых миллиметров (уровень микроагрегатов и элементарных почвенных частиц) до метра и более (уровень педона и полипедона), что было невозможно ещё 20 лет назад. Это, а также программное обеспечение для обработки цифровых изображений вылилось в последние годы в развитие методов цифровой морфометрии почв [6–11].

Дополнительным драйвером прогресса морфологии почв стала концепция памяти почв, объединившая в себе подходы к расшифровке носителей почвенной памяти всех иерархических уровней структурной организации почв [12–15]. Большинство работ по интерпретации морфологического облика почв сосредотачиваются на отдельных факторах, главенствующих в формировании морфологических паттернов. Выполнены исследования, посвященные оценке роли почвенной фауны [16–18], корневых систем деревьев [19], ветровального морфогенеза [20–25], криогенеза [26–36], в том числе и в палеопочвах [37–39]. Реже, в силу большей сложности, про-

водится комплексный морфогенетический анализ почвенного профиля [40–42].

Для цифрового макроморфологического анализа необходимы качественные зачистки стенок почвенных выработок в разных проекциях. На практике получить фотографические материалы такого качества довольно трудозатратно, поэтому полезна кооперация с археологами, проводящими разведочные или спасательные работы на фоновых территориях или за пределами памятников при установлении их границ. Археологические материалы удобны для анализа почвенных морфологических паттернов, так как исследования памятников выполняются с помощью крупных раскопок, выполняемых путём прохождения послойных горизонтальных зачисток, сопровождаемых детальным фотографированием горизонтальных срезов, стратиграфий и детальной съемкой микрорельефа местности. Работа с материалами археологов в почвоведении не нова [43, 44], однако цифровые подходы к извлечению морфогенетической информации ещё малоразработаны. Единично встречаются работы, в которых почвенную информацию получают с помощью цифровой обработки фотографий почв на археологических раскопках, например [45].

В работе предложен подход к цифровому анализу изображений почвенных срезов и интерпретации полученной информации. Для этого выбраны подзолы, так как они обладают достаточно простым строением почвенного профиля, контрастными по цвету горизонтами и морфонами, границы между которыми легко определить. Исходные фотоматериалы были получены во время археологических исследований в средней тайге Западной Сибири.

Цель работы заключалась в применении методов цифрового анализа для выявления различий в генезисе подзолов двух форм микрорельефа в пределах одной катены. Проведение подобного исследования также ставило задачу расширить существующие весьма неполные представления о морфонно-горизонтной организации почв на легких отложениях западносибирской части бореального пояса.

Материалы и методики исследования

Исследования проведены в средней тайге Западной Сибири на левобережной террасе р. Большой Юган (левый приток р. Оби). Терраса сложена легкими аллювиальными слоистыми отложениями, перевесанными с поверхности. На них сформированы подзолы иллювиально-железистые, часто глееватые по WRB [46] Glossic Stagnic Folic Albic Podzol и Glossic Folic Albic Podzol (Lamellic). Для изучения влияния микрорельефа на морфологические свойства почвы использованы фотографии последовательных горизонтальных срезов подзолов. Фотографии были получены при проведении спасательных археологических раскопок на двух объектах – «селище Кулунигый 5» (60°24'29,4840" N, 73°56'56,6808" E) и «могильник Кулунигый 73» (60°24'28,8252" N, 73°56'49,8552" E). Кроме селища и могильника на краю и в глубине террасы имеются другие памятники, датирующиеся

в широком временном диапазоне от эпохи неолита до позднего Средневековья [47].

В рамках спасательных археологических работ на памятниках селище Кулунигый 5 и могильник Кулунигый 73 были заложены масштабные раскопы. В нашем исследовании использованы раскопы, не имеющие признаков антропогенного почвообразования, что позволяет использовать их как примеры типичных фоновых подзолов (рис. 1 в Приложении 2). Раскопы №№ 1–10 расположены в краевой части могильника Кулунигый 73, который находится на гриве (рис. 1В). Раскоп № 4 был заложен на периферии селища Кулунигый 5, в межгрядном понижении (западине). Этот раскоп был разделён на 19 секторов. Перепад высот между формами микрорельефа составляет 2,5–3 метра.

Все раскопы пройдены горизонтальными зачистками, а поуровневые планы фиксировались через каждые 5–10 см, вплоть до глубины в 75 см. Каждый уровень был сфотографирован общим планом с помощью квадрокоптера, а иногда дополнительно – фотоаппаратом по фрагментам с последующим сшиванием в Agisoft PhotoScan 1.4.3. Также фотографировались стратиграфические срезы стенок раскопов.

Для проведения морфометрического анализа были использованы четыре сектора селища Кулунигый 5 и четыре траншеи могильника Кулунигый 73. Общая площадь раскопок составила 158 м². Было проанализировано 76 горизонтальных срезов, общая площадь которых достигла 1653 м². Объём выработки составил 126 м³, что эквивалентно 196 почвенным разрезам глубиной и шириной по 80 см. Площадь вертикальных срезов составила 119 м², что сопоставимо с площадью 186 рабочих стенок почвенных разрезов.

Первый этап работы заключался в обработке фотографий путём выделения контуров следующих горизонтов и морфонов: (1) О – органогенных, (2) Е – подзолистых, (3) Еh – контактно-иллювиально-гумусовых, (4) BF1 и (5) BF2 – иллювиально-железистых, (6) ВС – переходных к почвообразующей породе, (7) Вох – гидрогенно-ожелезненных, (8) [AY] – погребенных серогумусовых. Отметим, что на горизонтальных срезах горизонты обычно выглядят как крупные морфоны.

Предварительно для отработки методики в программе ImageJ были опробованы 4 метода выделения границ перечисленных горизонтов: (1) ручное выделение морфонов инструментом «свободное выделение»; (2) автоматическое выделение функцией Threshold; (3) предварительная подготовка изображения в программе Adobe Photoshop с последующим использованием функции Threshold; (4) выделение функцией Color Threshold.

Выявлено, что площадь ВС горизонта можно вычислить только косвенно по разнице общей и суммарной площади BF и Е, что обусловлено сложностью определения границ между Е и ВС горизонтами. Обработка изображений перечисленными методами позволила получить следующие площади горизонтов в % для методов 1, 2, 3, 4 соответственно: BF – 19/15/32/43, ВС – 52/65/45/37, Е – 27/20/23/20.

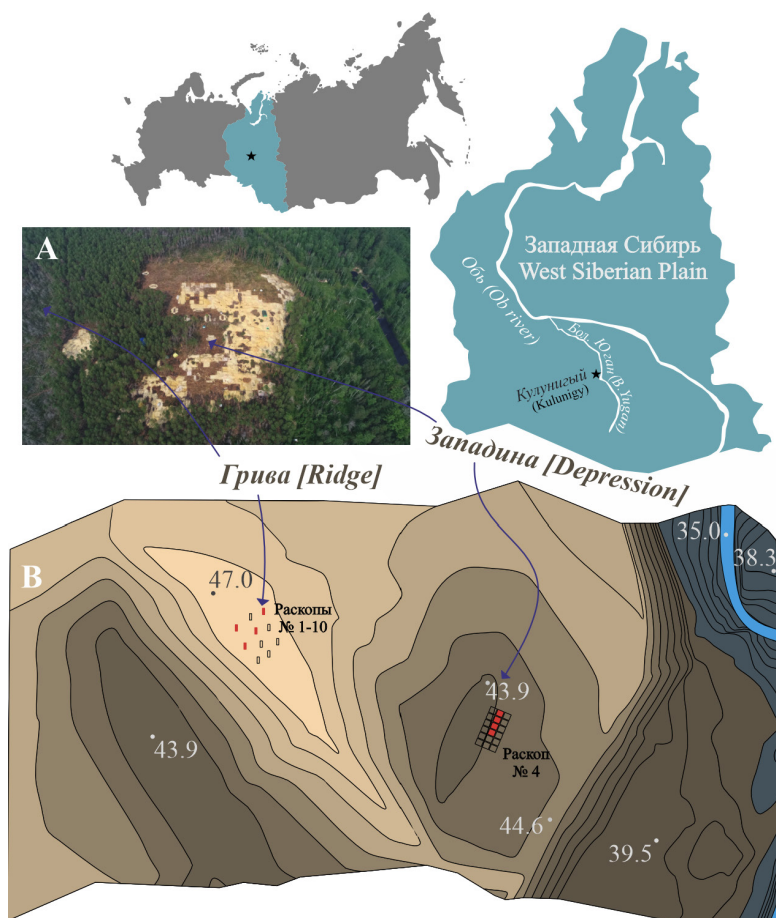


Рис. 1. Расположение объектов исследования: *A* – вид на место проведения археологических раскопок с дрона; *B* – расположение изученных археологических раскопов (красным) в микрорельефе с указанием абсолютных высотных отметок [Fig. 1. Location of the study objects: *A* - view of the archaeological excavation site from a drone; *B* - microtopographic location of the studied soil sections (red) indicating the altitude above sea level]

В методах 1 и 2 площадь неучтенных участков фотографии среза оказалась наибольшей, в связи с этим и завышенные результаты площади ВС горизонта. При использовании методов 3 и 4 классификации поддается большая часть изображения среза.

В случае использования в ImageJ функции автоматического выделения по цветовому диапазону (метод 4) возникает проблема невозможности применения одинаковых настроек ко всем фотографиям, так как условия освещения в момент фотографирования всегда разные. Также остаётся проблемой разделение Е и ВС горизонтов в связи со слабой контрастностью. Метод 3 по сравнению с предыдущим более трудоемкий, так как заключается в подготовке 5–6 вариантов одной фотографии с выделенными на них горизонтами в Adobe Photoshop для дальнейшего подсчета в ImageJ.

Длительность обработки компенсируется качеством, появляется возможность точнее обработать участки с тенью или бликами, непосредственно оценить площадь каждого горизонта, не прибегая к вычислению по разнице. В связи с этим был выбран метод 3, включавший предварительную подготовку фотографий в программе Adobe Photoshop CC 2018.

Второй этап работы включал анализ полученных изображений. Для каждого морфона создавался отдельный файл, в котором искомый морфон окрашивался в белый, а фон – в черный цвет. Далее это бинаризованное изображение открывалось в программе ImageJ 1.45 и с помощью функции Threshold производилось выделение морфонов и их дальнейший анализ. Морфоны размером менее 4 см² игнорировали. Для каждого среза рассчитывали следующие показатели. (1) Количество всех морфонов в шт./м² по глубинам срезов. (2) Количество морфонов каждого типа по глубинам срезов. (3) Area, площадь в % от анализируемого среза. (4) Perimetr, периметр морфона в см. (5) AR, отношение большей оси к меньшей. (6) Circularity (Circ), изометричность формы (значение 1,0 говорит о том, что выделенная область является кругом; чем ближе значение к 0, тем более плоскую форму имеет контур). Этот параметр чувствителен к пустотам в морфоне и неровностям границы. Параметр рассчитан по формуле

$$\text{Circ} = \frac{4\pi \cdot \text{area}}{\sqrt{\text{perimetr}}}.$$

(7) Solidity, схож с Circ ($R^2=0,84$), но в отличие от него он игнорирует форму и волнистость границы, реагирует на наличие лопастей и пустот в морфоне. Параметр рассчитан по формуле

$$\text{Solidity} = \frac{\sqrt{\text{area}/\pi}}{\text{perimetr}/(2\pi)}.$$

(8) Roundness (Round), показатель округлости внешнего контура, игнорирует пустоты в морфоне и форму границы контура. Параметр рассчитан по формуле

$$\text{Round} = \frac{4 \cdot \text{area}}{\pi \sqrt{\text{major} \cdot \text{axis}}}.$$

Статистическая и графическая обработка проведена в программах MS Excel 2019, STATISTICA 12, Grapher 15. Три образца углей были датированы в Познанской радиоуглеродной лаборатории (Poz) Университета имени Адама Мицкевича (Познань, Польша). Калибровка радиоуглеродного возраста проводилась с помощью онлайн-версии OxCal 4.4 на основе калибровочной кривой IntCal20 для Северного полушария [48].

Результаты исследования

Морфоаналитическая характеристика почв гряды и западины. Морфологический анализ горизонтальных и вертикальных срезов почв позволил выявить следующие почвенные морфологические элементы (горизонты) (рис. 2, 3):

О – органогенные морфоны, смесь белесо-серого песка, углей и детрита разной степени разложения. На горизонтальных срезах имеют вид небольших пятен.

Е – подзолистый горизонт, белесый песок в верхней части профиля на вертикальном сечении имеет сплошное простираие, относительно ровную верхнюю границу, за исключением случаев с механическим нарушением строения профиля. Нижняя граница горизонта волнистая, часто формирует разнообразные карманистые и языковатые структуры.

Eh – контактный подзоло-иллювиально-гумусовый морфон. На вертикальном срезе выглядит как серая или темно-серая полоска шириной 2–6 см на контакте горизонтов Е–BF1 или Е–BF2. На горизонтальном срезе выглядит как кайма вокруг Е морфонов.

BF1 (иллювиально-железистый горизонт) – 5–6 см полоса, ниже Eh, Е и реже О горизонтов. Имеет интенсивную темно-охристую окраску, часто по нижней границы встречаются железисто-марганцевые микроконкреции.

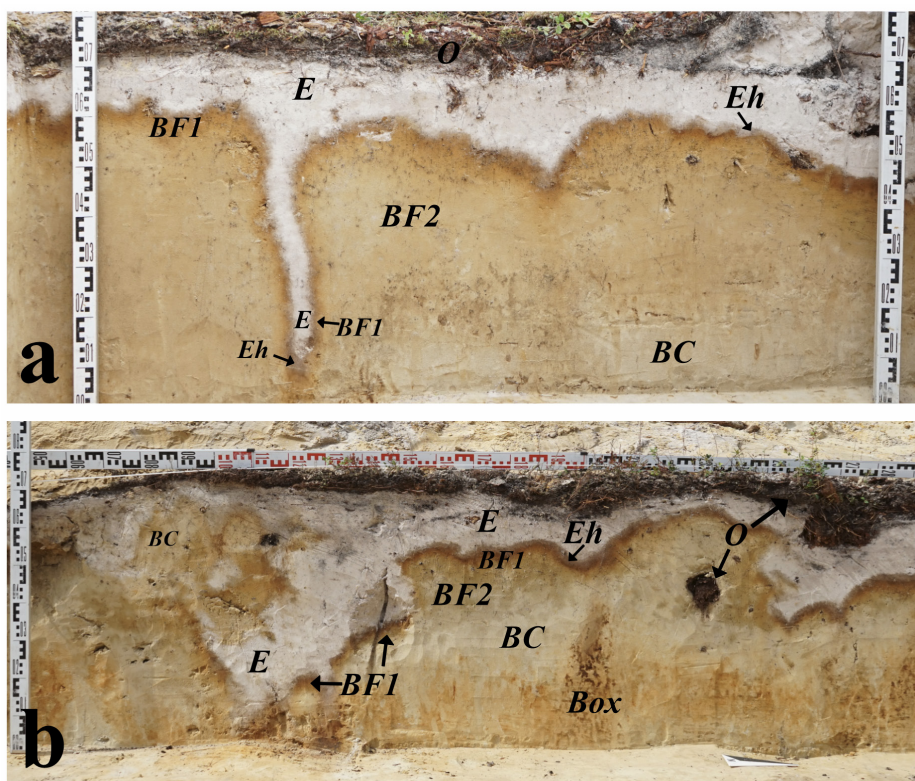


Рис. 2. Горизонты и морфоны профилей изученных почв:

a – подзол иллювиально-железистый языковатый на гряде;

b – подзол иллювиально-железистый языковатый глееватый в западине

[Fig. 2. Horizons and morphons of the studied soil profiles: *a* - Glossic Albic Podzol (Lamellic) on the ridge; *b* - Glossic Stagnic Albic Podzol in the depression]

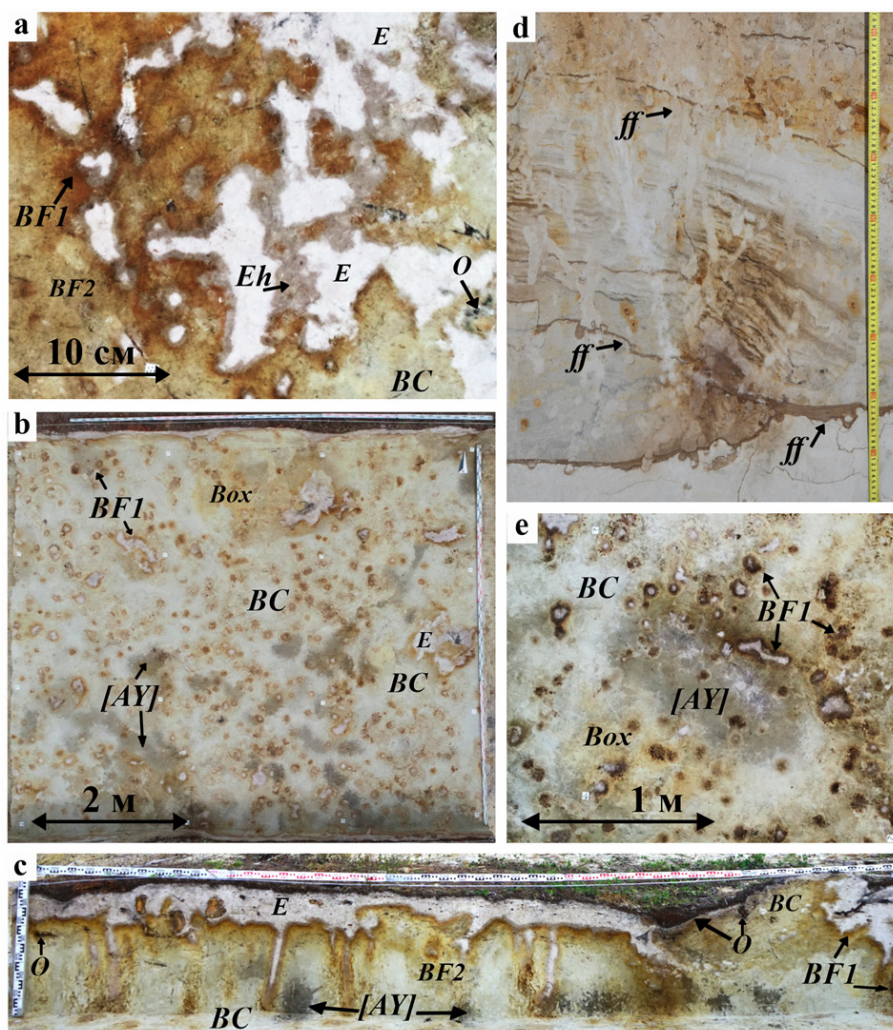


Рис. 3. Горизонты и морфоны профилей изученных почв: *a* – горизонтальный срез с морфонами O, E, Eh, BF1, BF2, BC; *b* – горизонтальный срез с морфонами E, [AY], BF1, Box, BC; *c* – профиль траншеи с морфонами O, E, BF1, BF2, [AY], BC; *d* – профиль с псевдофибрами; *e* – горизонтальный срез с морфонами [AY], BF1, Box, BC

[Fig. 3. Horizons and morphons of the studied soil profiles: *a* - horizontal section of morphons O, E, Eh, BF1, BF2, BC; *b* - horizontal section of morphons E, [AY], BF1, Box, BC; *c* - trench profile demonstrating the configuration of morphons O, E, BF1, BF2, [AY], BC; *d* - profile showing the distribution of lamellae; *e* - horizontal section of morphons [AY], BF1, Box, BC]

BF2 – морфоны светло-охристой окраски имеют крупные размеры. На стратиграфическом срезе всегда находится под BF1 горизонтом. Данный тип морфонов обладает слабоконтрастными границами по отношению к BF1 и BC морфонам.

Вох – гидрогенно-ожелезненные ржаво-охристые морфоны описаны в почвах западин (см. рис. 2b, 3b, 3e) в почвенном профиле имеют вид крупных пятен яркого-ржавого охристого цвета. Обычно они приурочены к ВС горизонту реже к BF1 и BF2, в этом случае имеют плохо различимые границы.

ВС – светло-палевый песок, в некоторых случаях он может иметь слоистую структуру, слабый охристый оттенок, псевдофибры.

[AY] – погребенные серогумусовые морфоны сохранившиеся от серогумусовой стадии почвообразования. В горизонтальном и вертикальном сечении представляют собой крупные песчаные морфоны серого цвета, если они находятся в ВС горизонте. Часто на данный тип может накладываться более позднее гидрогенное или иллювиальное ожелезнение, что приводит к усилению интенсивности окраски обоих типов морфонов. Из этих морфонов были отобраны образцы древесного угля для радиоуглеродного анализа. Полученные результаты показали раннеголоценовый возраст: 7801 ± 60 , 8346 ± 59 , 8546 ± 64 кал. л. н. (табл. 1). Значит, эти морфоны унаследованы от почв первой половины голоцена.

Псевдофибры – полосы, к которым в большинстве случаев приурочена смена гранулометрического состава. Имеют светло- и темно-охристую окраску и толщину, варьирующуюся в пределах 0,5–3 см. Ламели приурочены к ВС горизонту.

Е, BF1, BF2 и ВС горизонты присутствуют в почвах двух изученных форм рельефа, но имеют разную глубину нижней границы (табл. 1 в Приложении 1; рис. 4). Глубина нижней границы этих горизонтов статистически не различается.

В каждой форме рельефа имеются топоприуроченные типы морфонов. Псевдофибры характерны только для почв гривы, в основном они присутствуют в ВС горизонте, имеют различную интенсивность окрашивания и толщину. Иногда они могут находиться и в BF2 горизонте, однако в этом случае они или проявляются очень слабо, или сильно нарушены ветровалами и корнями (см. рис. 3d).

Таблица 1 [Table 1]

Результаты радиоуглеродного датирования углей из горизонтов [AY]
[Results of radiocarbon dating of coals from horizon [AY]]

Лаб. шифр [Lab code]	Разрез [Soil profile]	Глубина, см [Depth, cm]	Радиоуглеродный возраст, л. н. [Radiocarbon age, BP]	Калиброванный радиоуглеродный возраст, кал. лет назад [Calibrated radiocarbon age, cal. yr. BP]			
				Среднее [Average]	От [From]	До [To]	%
Poz-145308	Ky20-2	57	7780 ± 50	8546 ± 64	8645	8420	95,4
Poz-145310	Ky20-2	65	7550 ± 50	8346 ± 59	8424	8200	95,4
Poz-145311	Ky20-3	75	6970 ± 40	7801 ± 60	7926	7692	95,4

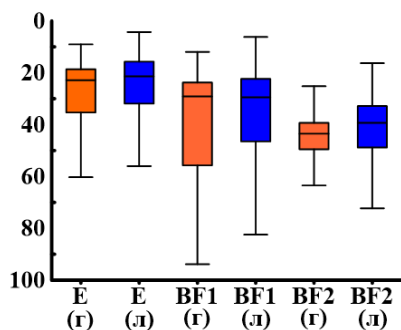


Рис. 4. Глубины нижних границ горизонтов. По оси x – глубины, по оси y – горизонты (медиана, нижние верхние квартили, минимум, максимум)

[Fig. 4. Depths of lower boundaries of horizons. On the x-axis depths are shown, and on the y-axis horizons are shown (median, lower and upper quartiles, minimum, maximum)]

В почвах западины встречаются Вох и [AY]. Первые встречаются в почвенных профилях в виде пятен в диапазоне глубин 20–70 см, максимальное их количество приурочено к 50 см. Вторые, погребенные серогумусовые, встречаются в диапазоне глубин 20–75 см и глубже (рис. 5).

Почвы западин характеризуются повышенными концентрациями углерода, железа и алюминия, демонстрируя элювиально-иллювиальный характер распределения (табл. 2). В горизонтах E и Eh содержание $C_{орг}$ варьируется от 0,12% до 0,43% в почвах западин, тогда как в почвах грив этот показатель не превышает 0,28% в горизонте Eh. Горизонты BF1 (0,50–0,57%) и BF2 (0,11–0,16%) имеют близкие значения. Наиболее низкие показатели характерны для горизонтов E, [AY], BC, не превышающие 0,12%. Содержание аморфного железа достигает максимума в горизонте BF1, причем в почвах грив концентрация этого элемента в 1,5 раза превышает значения, характерные для почв западин. Распределение алюминия имеет обратную тенденцию: наибольшие концентрации наблюдаются в почвах западин, где его содержание достигает 0,83%.

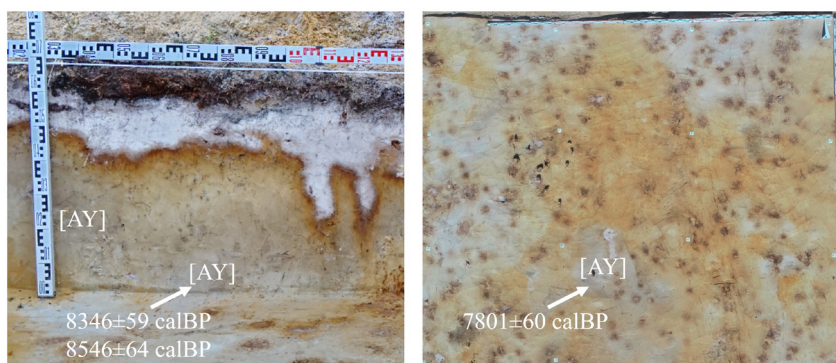


Рис. 5. Морфоны [AY] в изученных почвах западин на вертикальном и горизонтальном срезах

[Fig. 5. Morphons [AY] in the studied soils of depressions on vertical and horizontal sections]

Таблица 2 [Table 2]

Химические и хроматические свойства почв
[Chemical and chromatic properties of soils]

Горизонт/ Морфон [Horizon/ Morphon]	Глубина, см [Depth, cm]	Цвет по CIE L*a*b* [Color according to CIE]				Цвет по системе Манселла [Color according to the Munsell system]				C _{орг} [C _{org}]	Fe ₂ O ₃ (Тамм) [Fe ₂ O ₃ (Тамм)]	Al ₂ O ₃ (Тамм) [Al ₂ O ₃ (Тамм)]
		L*	a*	b*	Тон [Tone]	Светлота [Lightness]	Хрома [Chroma]					
Грива [Ridge]												
Opir	0–3(6)	22,8	1,9	3,5	9,2YR	2,2	0,7	н. о. [n. d.]	н. о. [n. d.]	н. о. [n. d.]	<0,01	<0,01
E	3(6)–28	72,3	3,3	9,8	10,0YR	7,1	1,6	<0,10	<0,10	<0,01	0,04	0,05
Eh	30–32	62,5	5,3	15,0	9,2YR	6,1	2,5	0,28	0,28	0,04	0,77	0,61
BF1	28–30	56,6	9,0	26,0	9,6YR	5,6	4,3	0,57	0,57	0,06	0,07	0,10
BF2	40–43	57,9	8,4	25,5	10,0YR	5,7	4,2	0,11	0,11	0,02	0,17	0,19
[AY-BF]	38–42	52,4	8,8	23,0	9,3YR	5,2	3,9	<0,10	<0,10	0,09	0,12	0,14
BC	77–90	69,3	2,3	16,3	2,3Y	6,8	2,4	<0,10	<0,10	0,07	0,02	0,05
Box	59–63	35,8	12,2	21,1	7,7YR	3,6	4,0	0,37	0,37	0,17	0,09	0,14
Псевдо-фибры [Lamellae]	125–130	53,0	7,6	20,7	9,6YR	5,2	3,5	0,12	0,12	0,09	0,09	0,14
Западина [Depression]												
Epir	14–17	48,6	2,8	6,7	9,1YR	4,7	1,4	0,46	0,46	<0,01	<0,01	0,02
E	10–14	69,1	3,9	11,2	9,0YR	6,8	1,9	0,12	0,12	<0,01	<0,01	<0,01
Eh	21–24	56,5	5,3	14,3	9,2YR	5,5	2,4	0,43	0,43	0,07	0,07	0,18

Горизонт/ Морфон [Horizon/ Morphon]	Глубина, см [Depth, cm]	Цвет по CIE L*a*b* [Color according to CIE]				Цвет по системе Манселла [Color according to the Munsell system]				C _{opr} [C _{org}]	Fe ₂ O ₃ (Тамм) [Fe ₂ O ₃ (Тамм)]	Al ₂ O ₃ (Тамм) [Al ₂ O ₃ (Тамм)]
		L *	a *	b *	Тон [Tone]	Светлота [Lightness]	Хрома [Chroma]					
BF1	16–19	56,2	8,8	27,7	0,1Y	5,5	4,5	0,50	0,49	0,83		
BF2	24–27	62,8	3,8	18,6	1,5Y	6,2	2,8	0,16	0,09	0,59		
[AY]	62–67	61,3	2,2	11,8	1,5Y	6,0	1,7	0,11	0,02	0,13		
BC	74–77	70,4	1,5	13,7	2,3Y	6,9	1,9	<0,10	<0,01	0,11		
E/Box	61–63	47,9	6,3	14,5	8,6YR	4,7	2,5	0,15	<0,01	0,04		
Box	74–76	42,9	9,5	22,1	8,6YR	4,2	3,7	0,27	0,08	0,33		

Характеристика морфонов на горизонтальных срезах. В почвах обеих форм рельефа наибольшее количество морфонов приурочено к средней части профиля, рис. 6а. Крупные и редкие морфоны расположены на верхних срезах до глубины 20 см, рис. 6б. Суммарная площадь морфонов с наименьшей педогенной переработкой материала (BC, BF₂, Vox) постепенно увеличивается к нижней части профиля, рис. 6с (табл. 2 в Приложении 1).

Грива и западина не имеют достоверных различий между средними размерами всех морфонов и площадями морфонов с наименьшей педогенной переработкой материала, однако достоверно различаются по количеству морфонов (табл. 3 в Приложении 1).

Крупные и многочисленные морфоны органогенного горизонта сосредоточены в верхней части профиля (рис. 7а, 7б), проникая вплоть до глубин 50 см. Морфоны О между почвами гривы и западины по площади и количеству не различаются (табл. 7 в Приложении 1). Е горизонт (рис. 7с, 7д) в верхней части профиля имеет крупные единичные морфоны. С глубиной количество Е морфонов увеличивается (максимум на 25 см), а площадь уменьшается. По площади Е морфонов грива и западина не различаются, за исключением глубины 15 см ($p=0,03$, $U=0,0$). По количеству морфонов грива и западина разделились, однако при сравнении по глубинам различия только на 35 см ($p=0,06$, $U=1$). Е_h морфоны (рис. 7е, 7ф) на гриве не отличаются от западины ни по площади, ни по количеству морфонов.

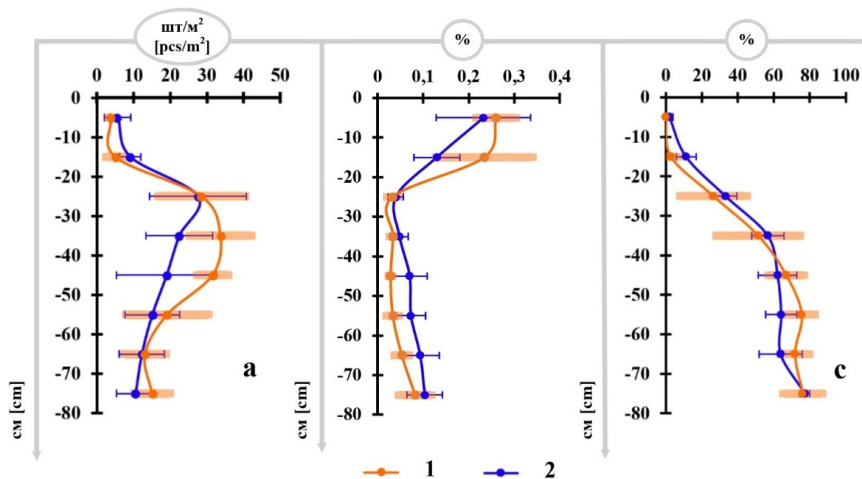


Рис. 6. Изменение по глубине в подзолах гривы (1) и западины (2): а – среднего количества морфонов всех типов на м² среза (штук/м²); б – средней площади единичного морфона от площади среза в % на основе усреднения морфонов всех типов; с – сумма площадей (в % от площади изученного среза) наименее переработанных почвообразованием горизонтов BC, BF₂ на гриве и BC, BF₂, Vox в западине [Fig. 6. Variation with depth in Podzols ridge (1) and depression (2): a - average number of all morphons per m² of section (pieces/m²); b - average area of a single morphon from the section area in % based on averaging of morphons of all types; c - sum of areas (in % of the area of the studied section) of the least transformed by soil processes horizons BC, BF₂ on the ridge and in BC, BF₂, Box in the depression]

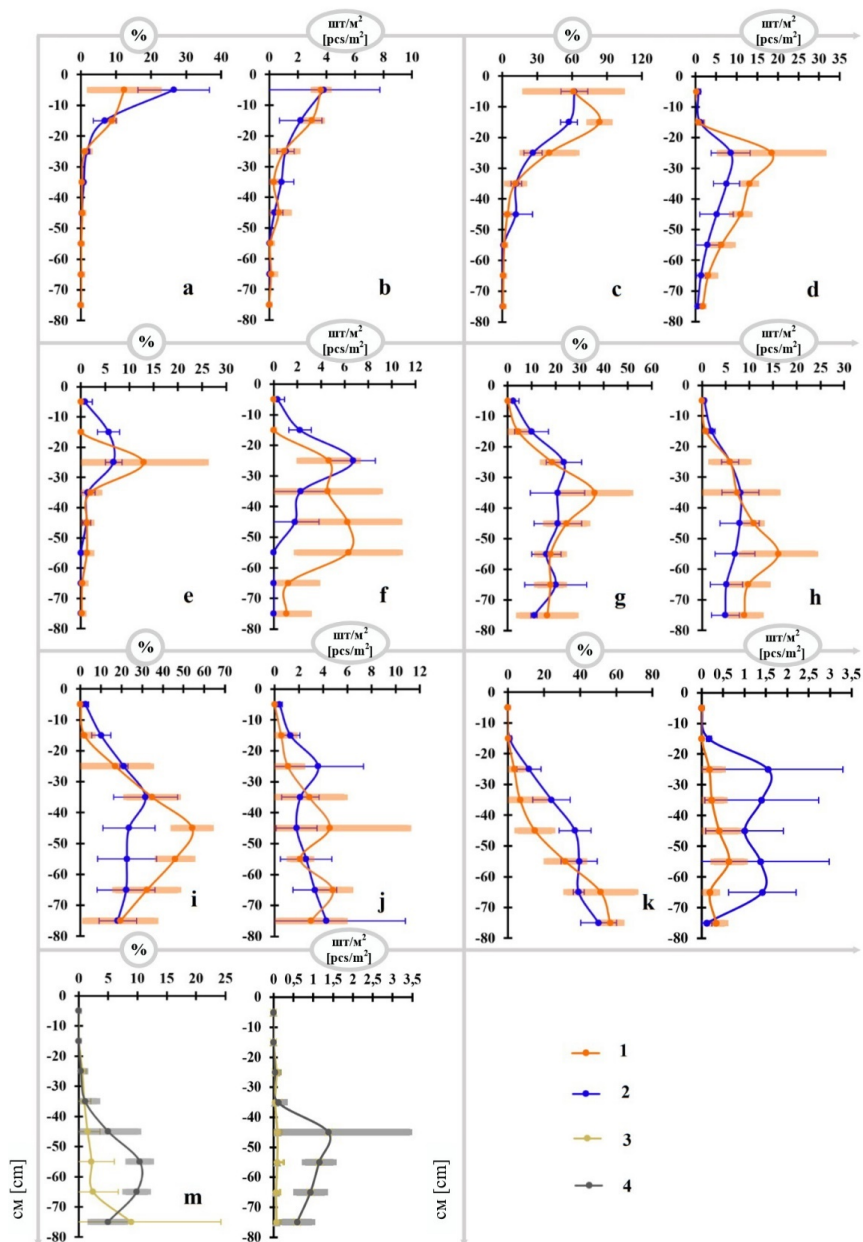


Рис. 7. Распределение по глубинам средних площадей горизонтов (%) и среднего количества морфонов (шт./м²) горизонтов О (а, б), Е (с, d), Еh (е, f), BF1 (g, h), BF2 (i, j), BC (k, l) на гряде (1) и в западине (2). Распределение по глубина средних площадей (m) и среднего количества морфонов на м² (n) Box (3) и [AY] (4) в западине

[Fig. 7. Distribution by depth of average areas (in %) and average number of morphons (pieces/m²) of horizons О (a, b), Е (c, d), Еh (e, f), BF1 (g, h), BF2 (i, j), BC (k, l) on the ridge (1) and in the depression (2). Distribution by depth of average areas (m) and average number of morphons per m² (n) for Box (3) and [AY] (4) in the depression]

Наибольшую площадь E_h занимает на 25 см (табл. 4 в Приложении 1), максимальное количество этих морфонов в западине приурочено к 25 см, а на гриве – к 45–55 см (табл. 5 в Приложении 1). По средней площади и количеству BF1 морфонов (см. рис. 7g, 7h) между гривой и западиной нет различий. По BF2 морфонам (см. рис. 7i, 7j) почвы гривы и западины не различаются, а площадь максимальна на 35 и 45 см соответственно (табл. 4 в Приложении 1). Сравнение по глубинам BC морфонов выявило разницу средней площади морфона на глубине 45 и 55 см ($p=0,03$, $U=0$ и $p=0,06$, $U=1$). В отличие от почв гривы в западине BC морфоны начинают появляться уже в верхней части профиля (см. рис. 7k, 7l).

Окисленно-глеевые морфоны редкие, появляются только в нижней части профиля (см. рис. 7m, 7n и табл. 6 в Приложении 1). Погребенные серогумусовые морфоны [AY] (см. рис. 7m, 7n) залегают глубже 40 см, достигая максимальной площади на срезе 55 см, а максимального количества на 45 см (табл. 6 в Приложении 1).

Морфометрическая характеристика отдельных типов морфонов. Морфометрические показатели органогенного горизонта гривы и западины (рис. 3в в Приложении 2) статистических различий не имеют (табл. 8 в Приложении 1). Solidity (рис. 3d в Приложении 2) имеет схожее распределение по профилю. Морфоны на гриве имеют более округлую форму (рис. 3а в Приложении 2). Эллипсоидность или вытянутость морфонов варьируется в широких пределах (рис. 3b в Приложении 2). Периметр морфонов (рис. 3е в Приложении 2) уменьшается к нижней части профиля.

Геометрия E морфонов (рис. 4 в Приложении 2) между гривой и западиной не различается (табл. 8 в Приложении 1). AR (рис. 4b в Приложении 2), Roundness (рис. 4c в Приложении 2) незначительно меняются по профилю. На гриве встречаются достаточно вытянутые морфоны на глубине 65 см (рис. 4b в Приложении 2). Контур элювиальных морфонов на гриве более волнистый (рис. 4а в Приложении 2). Периметр морфонов уменьшается с глубиной (рис. 4е в Приложении 2).

Морфоны BF1 имеют овальную форму (рис. 5b, 5c в Приложении 2), по профилю AR (рис. 5b в Приложении 2) и Roundness (рис. 5c в Приложении 2) распределены равномерно. В западине морфоны более округлые, чем на гриве (табл. 8 в Приложении 1, рис. 5а в Приложении 2). Высокие значения Solidity указывают на отсутствие «дыр» в морфонах обеих форм рельефа (рис. 5d в Приложении 2). Периметр (рис. 5е в Приложении 2) отличается сильной вариативностью.

BF2 горизонт обладает таким же распределением и значением морфометрических показателей, как и BF1 за исключением нескольких отличий (табл. 8 в Приложении 1, рис. 6 в Приложении 2). Circularity (рис. 6а в Приложении 2) в западине больше, чем на гриве на всех глубинах. На срезах 45 см в почвах гривы морфоны более вытянутые (рис. 6b в Приложении 2). Периметр BF2 (рис. 6е в Приложении 2) меняется на гриве в более широком диапазоне. В основном представляет собой изометричные формы, которые не имеют большого количества лопастей и пустот (рис. 6d в Приложении 2).

ВС морфоны между почвами гривы и западины отличаются по двум параметрам *Circularity* и *Solidity* (табл. 8 в Приложении 1). Форма морфонов в западине по сравнению с гривой ближе к кругу (рис. 7а в Приложении 2) по всему профилю, за исключением 35 см, там кривые пересекаются. В почвах гривы и западины ВС представлен сложными морфонами изометричной формы (рис. 7с в Приложении 2), которые имеют плавные границы (рис. 7д в Приложении 2) и небольшое количество полостей (рис. 7с, 7б в Приложении 2).

Морфометрические показатели *Eh* горизонта (табл. 8 в Приложении 1, рис. 8 в Приложении 2) достоверно различаются только по *Roundness* (рис. 8с в Приложении 2). Округлость внешнего контура морфонов на гриве выше, чем в западине. Низкие значения *Circularity* (рис. 8а в Приложении 2) и *Solidity* (рис. 8д в Приложении 2) обусловлены наличием крупных полостей. На гриве округлость постепенно снижается к нижней части профиля, в то время как в западине этот показатель дифференциации не имеет. Вытянутость морфонов меняется незначительно (рис. 8б в Приложении 2). Периметр морфонов к нижней части профиля уменьшается, максимальные значения на гриве и в западине приходятся на разные глубины (рис. 8е в Приложении 2).

В средней части профиля *Вох* морфоны более округлые (рис. 9а в Приложении 2). *Вох* морфоны имеют плавные очертания (рис. 9д в Приложении 2), изометричную вытянутую форму (рис. 9б, 9с в Приложении 2). *[AY]* морфоны имеют вытянутую (рис. 9а в Приложении 2) овальную форму (рис. 9б в Приложении 2) с плавными ровными границами (рис. 9д в Приложении 2), не имеют пустот (рис. 9с в Приложении 2).

В табл. 9–15 (Приложение 2) для всех горизонтов приведены морфометрические параметры изученных морфонов по двум формам рельефа.

Анализ морфометрических данных методом главных компонент был проведён для двух выборок. Первая выборка представляла собой морфометрические параметры и глубины залегания для 23 137 морфонов гривы и западины (рис. 10а, 10с в Приложении 2). Её анализ позволил выделить три кластера: параметры (*Rnd*, *Sld*, *Cr*), положительно скоррелированные с первым и вторым фактором; положительно – с первым и отрицательно со вторым фактором (*Ar*, *ArT*, *P*); отрицательно – с двумя факторами (*D*, *AR*). Видно, что большая часть морфонов в почвах гривы и западины в этих факторах распределена одинаково (рис. 10а в Приложении 2). Выделяется небольшая группа морфонов западины, отличающаяся размерами и сложностью формы. Наиболее круглые морфоны залегают глубже по почвенному профилю и имеют небольшой размер. Крупные морфоны имеют более вытянутую форму. Вторая выборка состояла из средних значений морфонов для каждого среза всех индивидуальных секторов и траншей раскопов. Кластеризация параметров оказалась менее выраженной (рис. 10б, 10д в Приложении 2).

Далее проанализировали распределение отдельных горизонтов в пространстве двух выявленных факторов. При рассмотрении индивидуальных морфонов видно их схожее распределение, копирующее групповой общий

паттерн. Выбиваются только морфоны Вох горизонта (рис. 11 в Приложении 2). Однако различия в распределении морфонов в пространстве факторов, полученном по выборке средних значений параметров на единичный, выражены сильнее (рис. 12 в Приложении 2). Особенно это заметно у Е и ВС, формирующих очень крупные контуры сложной формы.

Обсуждение результатов

Выполненная работа продолжает серию морфоаналитических исследований песчаного почвообразования в континентальных условиях Западной Сибири [49–53]. Данное исследование сосредоточено на макроморфологическом уровне изучения результатов педогенеза в условиях хорошо фильтрующих древнеэоловых песчаных отложений под бореальной растительностью в пределах речных среднетаёжных террас, имеющих довольно сложную климатическую историю почвообразования [54], осложненную антропогенными воздействиями древних обществ [47, 55], что нашло отражение в пирогенных архивах района исследования [51]. Как отмечал В.Д. Тонконогов [56], при сильном колебании свойств почв на небольшом пространстве, как это наблюдается для подзолов, характер пространственных закономерностей изменения свойств почв и причин, их обуславливающих, может быть установлен достаточно достоверно только количественными методами исследования.

Микротопография является важным фактором, контролирующим формирование катен на песчаных почвообразующих породах. В таких катенах в условиях гумидного климата при движении от верхних частей склонов к их подножьям происходит уменьшение мощности подзолистого горизонта и увеличение мощности иллювиального, одновременно с ростом содержания в нём органического вещества. Такие закономерности расположения подзолистых катен характерны для разных континентов и климатических условий [57, 58]. Главную роль в формировании подобных катенарных сочетаний отводят латеральной подзолизации [59], в ходе которой вдоль склона мигрируют алюмо-железо-органические коллоиды.

Рассмотренное сопряжение подзолов по микрорельефу развивается на перепаде высот 3,1 м в условиях коротких склонов от гривы к центру западины. Это небольшой перепад, поэтому латеральная подзолизация проявилась в изученном сопряжении не столь ярко, как это описывается в литературе для длинных склонов. В почве гривы площадь морфонов Е горизонта была больше до глубины 35 см, ниже площадь этих морфонов больше уже в западине до глубины 55 см, после чего они сравниваются (см. рис. 7; табл. 4 в Приложении 1). Такое изменение можно объяснить большим проникновением по языкам водных растворов в условиях западины. Хотя в приповерхностной части условия складываются для оподзоливания лучше на гриве, как это и бывает наиболее часто [29, 50, 57–59]. Если рассматривать глубину нижней границы горизонтов Е и ВF1 как показатель степени оподзоливания, то заметна лишь тенденция к более близкому расположению этих границ к поверхности почвы (см. рис. 4).

Неожиданным результатом оказалось глубокое проникновение морфонов О горизонта, который является поверхностным. Он фиксировался вплоть до глубины в 65 см, хотя его площадь и упала ниже 1% с глубины 35 см. Такое расположение этого горизонта связано с корневыми ходами и западинами ветровалов, в которые погружены эти морфоны.

Самые яркие и характерные морфоны, осложняющие горизонтное строение подзолов средней тайги Западной Сибири – языки и карманы [30]. В средней тайге языки в основном биогенного и фильтрационного элювиально-иллювиального происхождения [51], севернее широко распространены языки криогенного происхождения [60]. Полученные данные в полной мере отражают эту особенность строения. Так, если в среднем глубина нижней границы горизонта Е укладывается в 20–25 см (см. рис. 4, 7с), после чего площадь Е морфонов резко уменьшается. То количество этих морфонов, наоборот, возрастает, имея максимум на глубине 25 см. На гриве их количество на этой глубине больше в 2 раза, чем в западине. Ниже происходит плавное падение их числа. На глубине 75 см в почвах гривы встречаемость языков составляет в среднем $1,7 \pm 0,2$ шт./м², а в западине $0,5 \pm 0,8$ шт./м². При этом размер, если его оценивать по периметру, больше у языков западины, что также подтверждает большее количество мигрирующих вод по этим преимущественным путям миграции влаги.

Впервые для подзолов описан контактный подзоло-иллювиально-гумусовый Еh морфон, залегающий всегда между горизонтами Е и BF1 (см. рис. 3а и рис. 7е, 7f). Толщина его на вертикальном срезе превышает 2 см только лишь в языках, где он достигает мощности нескольких см. При анализе литературы не удалось найти описание данного морфона. Его аналитические свойства показывают накопление в нём в основном углерода органических соединений, в отличие от горизонта BF1, где резко увеличено содержание оксалатно-растворимого железа, в сравнении с Е горизонтом. Отмечено, что этот морфон отсутствует в местах недавних ветровальных нарушений. Возможно, его формирование связано с адсорбцией органических коллоидов на контакте с BF1 горизонтом [61], песчаные зерна которого покрыты железистыми пленками.

В поведении иллювиально-железистых горизонтов прослеживают общие черты для обеих форм рельефа. На гриве заметно большее количество BF1 морфонов (см. рис. 7g, 7h), как и Е морфонов, связанных с языками. Их максимум в почвах гривы смещен вглубь относительно максимума в западине. Число языков в почвах гривы больше, а размер их меньше. Число BF2 морфонов в почвах гривы и западины схоже, а вот размер уже больше в почвах гривы. Максимум площади BF2 горизонта в западине расположен на 10 см выше, чем в почве гривы. Это связано с появлением морфонов Вох в почве западины, с максимумом площади в диапазоне глубин 55–65 см.

Кроме Вох, вторым топоприуроченным морфоном является погруженный серогумусовый [AY] материал реликтового горизонта первой половины голоцена, о чём свидетельствует возраст древесных углей, извлеченных из этих морфонов (см. табл. 1). И хотя в средней тайге Западной Сибири

гумусовые голоценовые реликты только начали изучаться [62], учитывая общий контекст распространения вторых гумусовых горизонтов на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири [63], предсказуемым является и их встречаемость в среднетаёжных почвах, что демонстрируют полученные данные. Площадь реликтов [AY] достигает $10,4 \pm 1,9\%$ на горизонтальном срезе на глубине 55 см (см. рис. 7*м*). Полученные результаты свидетельствуют, что дальнейшие поиски гумусовых реликтов целесообразнее всего проводить в микропонижениях, где они лучше сохраняются, будучи защищенными капиллярной каймой.

Полученные геометрические параметры почвенных морфонов свидетельствуют об их парагенезисе, что наглядно показал метод главных компонент (рис. 11 в Приложении 2). Лишь в западине выделена группа морфонов, отличающаяся размерами и сложностью формы. Это морфоны Вох горизонта, имеющего иной генезис. Остальные морфоны имеют не только близкие геометрические параметры, но и размеры, совпадающие с размером корневых систем деревьев.

В формировании морфологических паттернов в подзолах иных регионов мира основное участие принимают процессы, связанные с жизнью корневых систем деревьев, их отмиранием и движением воды по сформированным преимущественным путям миграции влаги [19, 64, 65]. Ранее для ключевого участка мы описали основные фитогенные морфологические структуры подзолов [51], а для более северных районов показали глубокие ветровальные нарушения почв сосной обыкновенной [66].

Проведенная работа подтвердила, что в распределении морфонов по профилю, изменении их формы с глубиной принимают участие три основных агента, связанных с биомеханикой и параллельной гидролого-биогеохимической дифференциацией.

Первый – это проникновение корневых систем вглубь. Благодаря этому формируются многочисленные глубокие языки округлой формы в горизонтальном сечении. Второй – ветровальные нарушения почв, приводящие к формированию крупных вытянутых или округлых, эллипсовидных структур. Эти два агента отвечают и за проникновение морфонов О горизонта вплоть до глубин 60 см. Морфоны горизонта ВС благодаря ветровалам встречаются уже на глубине 15 см. Можно предположить большую активность ветровального морфогенеза в западинах, так как площадь ВС морфонов выше в верхней части почв западин в сравнении с аналогичными глубинами почв на гриве. Все геометрические параметры показали заметную изометричность, округлость описанных морфонов. Третий – это элювиально-иллювиальная дифференциация по корневым ходам и ветровальным почвенным комплексам. Благодаря этим процессам происходят расширение исходных нарушений, а также их углубление, в том числе и ниже 50 см горизонтов E, BF1 и BF2.

Проведенный морфоаналитический анализ подзолов демонстрирует перспективность данного подхода для оценки внутрипочвенной неоднородности, в том числе и связанной с содержанием углерода. Выполненная работа расширяет представление о генезисе западносибирских среднетаёжных

подзолов. Дополнительно данный подход можно применять и для более точных референсных расчётов запасов почвенного органического углерода и сопряженных с ним химических элементов. Предложенный подход мог бы быть применен и в иных природных зонах. Однако в представленной методологии работа является весьма трудоемкой, и на современном технологическом этапе её вполне можно автоматизировать благодаря алгоритмам искусственного интеллекта.

Заключение

На основе материалов археологических раскопов разработан и успешно апробирован метод цифрового макроморфометрического анализа почвенных срезов с использованием программ Adobe Photoshop и ImageJ. Получены количественные данные о распределении и геометрических параметрах (площадь, периметр, форма) морфонов генетических горизонтов (O, E, Eh, BF, BC, B_{ox}, [AY]) в подзолах западносибирской средней тайги. Установлены статистически значимые различия в составе и строении почв двух сопряженных форм микрорельефа (грива, западина). В почвах западин диагностированы гидрогенно-ожелезнённые (B_{ox}) и реликтовые погребённые серогумусовые ([AY]) морфоны раннеголоценового возраста, а на гривах – псевдофибры. Показано, что формирование сложной морфонной организации подзолов является результатом совместного воздействия трёх основных агентов: проникновения корневых систем деревьев, ветровальных нарушений почвы и последующей элювиально-иллювиальной дифференциации вещества по созданным биогенным проводящим путям. Подтверждена перспективность цифрового морфометрического подхода для объективной количественной оценки пространственной неоднородности почвенного профиля, что открывает новые возможности для реконструкции генезиса почв и уточнения запасов почвенного органического углерода.

Приложения 1, 2 доступны по ссылке <https://doi.org/10.17223/19988591/72/1>

Список источников

1. Герасимова М.И., Губин С.В., Шоба С.А. Микроморфология почв природных зон СССР. Пушкино : ОНТИ ПНЦ РАН, 1992. 214 с.
2. Stoops G., Sedov S., Shoba S. Regoliths and soils on volcanic ash // Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths / ed. by G. Stoops, V. Marcelino, F. Mees. 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, 2018. PP. 721–751. doi: 10.1016/B978-0-444-63522-8.00025-5
3. Bockheim J.G. Diversity of diagnostic horizons in soils of the contiguous USA: A case study // Catena. 2018. Vol. 168. PP. 5–13. doi: 10.1016/j.catena.2017.10.016
4. Hartemink A.E., Zhang Y., Bockheim J.G., Curi N., Silva S.H.G., Grauer-Gray J., Lowe D.J., Krasilnikov P. Soil horizon variation: A review // Advances in Agronomy / ed. by D.L. Sparks. USA : Elsevier, 2020. Vol. 160, № 1. PP. 125–185. doi: 10.1016/bs.agron.2019.10.003
5. Корнблум Э.А., Михайлов И.С., Ногина Н.А., Таргульян В.О. Базовые шкалы свойств морфологических элементов почв. М. : Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1982. 57 с.

6. Martínez F.S.J., Muñoz-Ortega F.J., Caniego Monreal F.J., Kravchenko A.N., Wang W. Soil aggregate geometry: Measurements and morphology // *Geoderma*. 2015. Vol. 237–238. PP. 36–48. doi: 10.1016/j.geoderma.2014.08.003
7. Hartemink A.E., Minasny B. Towards digital soil morphometrics // *Geoderma*. 2014. Vol. 230–231, № 2. PP. 305–317. doi: 10.1016/j.geoderma.2014.03.008
8. Bryk M. Macrostructure of diagnostic B horizons relative to underlying BC and C horizons in Podzols, Luvisol, Cambisol, and Arenosol evaluated by image analysis // *Geoderma*. 2016. Vol. 263. PP. 86–103. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.09.014
9. Grauer-Gray J., Hartemink A.E. Raster sampling of soil profiles // *Geoderma*. 2018. Vol. 318. PP. 99–108. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.12.029
10. Zhang Y., Hartemink A.E. A method for automated soil horizon delineation using digital images // *Geoderma*. 2019. Vol. 343. PP. 97–115. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.02.002
11. Плотникова О.О., Романис Т.В., Куст П.Г. Сравнение методов цифрового анализа изображений для морфометрической характеристики почвенных агрегатов в шлифах // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2020. № 104. С. 199–222. doi: 10.19047/0136-1694-2020-104-199-222
12. Козловский Ф.И., Горячкин С.В. Почва как зеркало ландшафта и концепция информационной структуры почвенного покрова // *Почвоведение*. 1996. № 3. С. 288–297.
13. Таргульян В.О., Горячкин С.В. Память почв: почва как память биосферно геосферно-антропогенных взаимодействий. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. 692 с.
14. Лойко С.В., Герасько Л.И., Кулижский С.П. Группировка носителей почвенной памяти (на примере северной части ареала черневых систем) // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2011. № 3. С. 38–49.
15. Таргульян В.О., Бронникова М.А. Память почв: теоретические основы концепции, современное состояние и перспективы развития // *Почвоведение*. 2019. № 3. С. 259–275. doi: 10.1134/S0032180X19030110
16. Abe S.S., Yamamoto S., Wakatsuki T. Soil-particle selection by the mound-building termite *Macrotermes bellicosus* on a sandy loam soil catena in a Nigerian tropical savanna // *Journal of Tropical Ecology*. 2009. Vol. 25, № 4. PP. 449–452. doi: 10.1017/S02664674090006142
17. Pietsch D. Krotovinas—soil archives of steppe landscape history // *Catena*. 2013. Vol. 104. PP. 257–264. doi: 10.1016/j.catena.2012.12.003
18. Ponomarenko D., Ponomarenko E. Describing krotovinas: A contribution to methodology and interpretation // *Quaternary international*. 2019. Vol. 502. PP. 238–245. doi: 10.1016/j.quaint.2018.05.037
19. Pawlik, Ł., Šamonil P. Biomechanical and biochemical effects recorded in the tree root zone – soil memory, historical contingency and soil evolution under trees // *Plant and Soil*. 2018. Vol. 426. PP. 109–134. doi: 10.1007/s11104-018-3622-9
20. Карпачевский Л.О., Дмитриев Е.А., Скворцова Е.А., Басевич В.Ф. Роль вывалов в формировании структуры почвенного покрова // *Структура почвенного покрова и использование почвенных ресурсов*. М. : Наука, 1978. С. 37–42.
21. Shaetzl J.S., Johnson D.L., Burns S.F., Small T.W. Tree uprooting: Review of terminology, process, and environmental implications // *Canadian Journal of Forest Research*. 1989. Vol. 19, № 1. PP. 1–11. doi: 10.1139/x89-00
22. Васенев И.И., Таргульян В.О. Ветровал и таежное почвообразование: Режимы, процессы, морфогенез почвенных сукцессий. М. : Наука, 1995. 247 с.
23. Бобровский М.В. Лесные почвы европейской России. Биотические и антропогенные факторы формирования / под ред. А.С. Комарова. М. : Товарищество научных изданий КМК, 2010. 392 с.
24. Bobrovsky M.V., Loyko S.V. Patterns of pedoturbation by tree uprooting in forest soils // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2016. Vol. 1 (1). PP. 1–21. doi: 10.21685/2500-0578-2016-1-3

25. Brantley S.L., Eissenstat D.M., Marshall J.A., Godsey S.E., Balogh-Brunstad Z., Karwan D.L., Papuga S.A., Roering J., Dawson T.E., Evaristo J., Chadwick O., McDonnell J.J., Weathers K.C. Reviews and syntheses: On the roles trees play in building and plumbing the critical zone // *Biogeosciences*. 2017. Vol. 14, № 22. PP. 5115–5142. doi: 10.5194/bg-14-5115-2017
26. Васильевская В.Д., Иванов В.В. Почвы севера Западной Сибири. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1986. 225 с.
27. Bockheim J.G., Tarnocai C. Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soils // *Geoderma*. 1998. Vol. 81, № 3–4. PP. 281–293. doi: 10.1016/S0016-7061(97)00115-8
28. Ping C.L., Bockheim J.G., Kimble J.M., Michaelson G.J., Walker D.A. Characteristics of cryogenic soils along a latitudinal transect in Arctic Alaska // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1998. Vol. 103 (D22). PP. 28917–28928. doi: 10.1029/98JD02024
29. Горячкин С.В. Почвенный покров севера (структура, генезис, экология, эволюция). М. : ГЕОС, 2010. 414 с.
30. Гаврилова И.П., Долгова Л.С. Песчаные почвы среднетаежной подзоны Западной Сибири // *Природные условия Западной Сибири*. М. : Изд-во Моск. ун-та. 1972. № 2. С. 34–50.
31. Матышак Г.В., Богатырев Л.Г., Гончарова О.Ю., Бобрик А.А. Особенности развития почв гидроморфных экосистем северной тайги Западной Сибири в условиях криогенеза // *Почвоведение*. 2017. № 10. С. 1155–1164. doi: 10.7868/S0032180X17100069
32. Murton J.B., Worsley P., Gozdzik J. Sand veins and wedges in cold aeolian environments // *Quaternary Science Reviews*. 2000. Vol. 19, № 9. PP. 899–922. doi: 10.1016/S0277-3791(99)00045-1
33. Смоленцев Б.А. Структура почвенного покрова сибирских увалов (северотаежная подзона Западной Сибири). Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2002. 117 с.
34. Morse P.D., Burn C.R. Field observations of syngenetic ice wedge polygons, outer Mackenzie Delta, western Arctic coast, Canada // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2013. Vol. 118, № 3. PP. 1320–1332. doi: 10.1002/jgrf.20086
35. Rémillard A.M., Hétu B., Bernatchez P., Buylaert J-P., Murray A.S., St-Onge G., Geach M. Chronology and palaeoenvironmental implications of the ice-wedge pseudomorphs and composite-wedge casts on the Magdalen Islands (eastern Canada) // *Boreas*. 2015. Vol. 44, № 4. PP. 658–675. doi: 10.1111/bor.12125
36. Wolfe S.A., Morse P.D., Neudorf C.M., Kokelj S.V., Lian O.B., O'Neill H.B. Contemporary sand wedge development in seasonally frozen ground and paleoenvironmental implications // *Geomorphology*. 2018. Vol. 308. PP. 215–229. doi: 10.1016/j.geomorph.2018.02.015
37. Макеев А.О. Поверхностные палеопочвы лёссовых водоразделов Русской равнины. М. : Молнет, 2012. 300 с.
38. Bertran P., Andrieux E., Antoine P., Sylvie C., Deschodt L., Gardere P., Marion H., Legentil C., Arnaud L., Liard M., Mercier N., Moine O., Sitzia L., Van Vliet-Lanoë B. Distribution and chronology of Pleistocene permafrost features in France: Database and first results // *Boreas*. 2014. Vol. 43, № 3. PP. 699–711. doi: 10.1111/bor.12025
39. Овчинников А.Ю., Алифанов В.М., Худяков О.И. Влияние палеокриогенеза на формирование серых лесных почв Центральной России // *Почвоведение*. 2020. № 10. С. 1170–1181. doi: 10.31857/S0032180X20100147
40. Makeev A., Lebedeva M., Kaganova A., Rusakov A., Kust P., Romanis T., Yanina T., Kurbanov R. Pedosedimentary environments in the Caspian Lowland during MIS5 (Srednaya Akhtuba reference section, Russia) // *Quaternary International*. 2021. Vol. 590. PP. 164–180. doi: 10.1016/j.quaint.2021.03.015
41. Kust P., Makeev A., Lessovaia S., Milanovsky E., Rusakov A., Abrosimov K., Belyaev V., Ryazantsev P. Polygenetic features in Retisols, formed in Moscow (Late Saalian)

- glacial till // *Catena*. 2022. Vol. 214, № 106245. PP. 1–21. doi: 10.1016/j.catena.2022.106245
42. Garankina E.V., Lobkov V.A., Shorkunov I.G., Belyaev V.R. Identifying relict periglacial features in watershed landscape and deposits of Borisoglebsk Upland, Central European Russia // *Journal of the Geological Society*. 2022. Vol. 179, № 5. doi: 10.1144/jgs2021-135
 43. Воробьева Г.А. Почва как летопись природных событий Прибайкалья: проблемы эволюции и классификации почв. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2010. 205 с.
 44. Долгих А.В., Александровский А.Л. Почвы и культурный слой Великого Новгорода // *Почвоведение*. 2010. № 4. С. 515–526. doi: 10.1134/S1064229310050017
 45. Wang Q., Hartemink A.E., Jiang Z., Jin N., Sun Z. Digital soil morphometrics of crotonas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China // *Geoderma*. 2017. Vol. 301. PP. 11–18. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.04.010
 46. IUSS Working Group WRB. World Reference Base of Soil Resources 2014, update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome : FAO, 2015. 192 p.
 47. Дудко А.А., Васильева Ю.А., Бычков Д.А. Результаты полевых археологических работ Юганского отряда в Сургутском районе Ханты-Мансийского автономного округа-Югры в 2018 году // *Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий*. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2018. Т. 24. С. 470–473.
 48. Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP) // *Radiocarbon*. 2020. Vol. 62, № 4. PP. 725–757. doi: 10.1017/RDC.2020.41
 49. Konstantinov A., Loiko S., Kurasova A., Konstantinova E., Novoselov A., Istigechev G., Kulizhskiy S. First findings of buried late-glacial paleosols within the dune fields of the Tomsk Priobye region (SE Western Siberia, Russia) // *Geosciences*. 2019. Vol. 9, № 2. 82. doi: 10.3390/geosciences9020082
 50. Kurasova A.O., Konstantinov A.O., Kulizhskiy S.P., Konstantinova E.Yu., Khoroshavin V.Yu., Loyko S.V. Patterns of soil cover organization within the northern part of the Kondinskaya lowland (Western Siberia) // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2020. № 49. С. 6–24. doi: 10.17223/19988591/49/1
 51. Лойко С.В., Кузьмина Д.М., Дудко А.А., Константинов А.О., Васильева Ю.А., Курасова А.О., Лим А.Г., Кулижский С.П. Древесные угли в подзолах средней тайги Западной Сибири как индикатор истории геосистем // *Почвоведение*. 2022. № 2. С. 176–192. doi: 10.31857/S0032180X22020083
 52. Loiko S.V., Klimova N.V., Kritkov I.V., Kuzmina D.M., Kulizhsky S.P. Soils and vegetation of the riverside floodplain in the hydrological continuum of the southern tundra within the Pur–Taz interfluvium (Western Siberia) // *Acta Biologica Sibirica*. 2023. Vol. 9. PP. 293–315. doi: 10.5281/zenodo.7879848
 53. Loiko S.V., Krickov I.V., Shefer N.V., Nedyak I., Manasypov R.M., Kulizhskiy S.P. Soils and vegetation of the permafrost floodplain of the small river Tenyakha (Meso-yakha basin, Western Siberia) // *Acta Biologica Sibirica*. 2024. Vol. 10. PP. 1779–1803. doi: 10.5281/zenodo.14542969
 54. Pupyshcheva M.A., Blyakharchuk T.A. The impact of wildfires on the dynamics of vegetation cover in the middle taiga subzone of Western Siberia during the Holocene // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2024. Vol. 15, № 3. PP. 200–210. doi: 10.18822/edgccc634013
 55. Визгалов Г.П., Фролов И.В., Никулин М.С. Селище Кулунигый 5: история археологического изучения и новые открытия // *История и современное мировоззрение*. 2022. Т. 4, № 4. С. 103–112. doi: 10.33693/2658-4654-2022-4-4-103-112
 56. Тонконогов В.Д. Опыт статистического анализа географических закономерностей почвообразования на примере песчаных подзолов севера Русской равнины // *Почвоведение*. 1971. № 2. С. 17–27.

57. Bourgault R.R., Ross D.S., Bailey S.W. Chemical and morphological distinctions between bertical and lateral podzolization at Hubbard Brook // Soil Science Society of America Journal. 2024. Vol. 79. PP. 428–439. doi: 10.2136/sssaj2014.05.0190
58. Jankowski M. The evidence of lateral podzolization in sandy soils of Northern Poland // Catena. 2014. Vol. 112. PP. 139–147. doi: 10.1016/j.catena.2013.03.013
59. Sommer M., Halm D., Geisinger C., Andruschkewitsch I., Zarei M., Stahr K. Lateral podzolization in a sandstone catchment // Geoderma. 2001. Vol. 103 (3–4). PP. 231–247. doi: 10.1016/S0016-7061(01)00018-0
60. Sheinkman V.S., Sedov S.N., Ovchinnikov A.Y., Maksharov A.M. Role of cryogenic and cryopedogenic processes of the past in the formation of Al-Fe-humus soils in the Nadym–Pur interfluvium, north of Western Siberia // Eurasian Soil Science. 2025. Vol. 58. 182. doi: 10.1134/S1064229325602409
61. Moens C., Dondeyne S., Panagea I., Smolders E. Depth profile of colloidal iron in the pore water of an Albic Podzol // European Journal of Soil Science. 2022. Vol. 73, № 5. 13305. doi: 10.1111/ejss.13305
62. Курасова А.О. Природно-антропогенная эволюция почв среднетаежной подзоны Западной Сибири в голоцене : дис. ... канд. биол. наук. Томск : Томский государственный университет, 2025. 189 с.
63. Alexandrovskiy A.L., Chendev Y.G., Yurtaev A.A. Soils with the second humus horizon, paleochernozems, and the history of pedogenesis at the border between forest and steppe areas // Eurasian Soil Science. 2022. Vol. 55. PP. 127–146. doi: 10.1134/S1064229322020028
64. Schaetzl R.J. Effects of treethrow microtopography on the characteristics and genesis of Spodosols, Michigan, USA // Catena. 1990. Vol. 17 (2). PP. 111–126. doi: 10.1016/0341-8162(90)90002-U
65. Martinez P., Buurman P., do Nascimento D.L., Vidal-Torrado P. Substantial changes in podzol morphology after tree-roots modify soil porosity and hydrology in a tropical coastal rainforest // Plant Soil. 2021. Vol. 463. PP. 77–95. doi: 10.1007/s11104-021-04896-y
66. Истигечев Г.И., Лойко С.В., Кузьмина Д.М., Крицков И.В., Кулижский С.П. Ветровальные почвенные комплексы в ареале альфегумусовых почв северной тайги Западной Сибири // Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века : сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 110-летию выдающегося организатора науки и первого директора ИПА СО РАН Романа Викторовича Ковалева, 4–8 декабря 2017 г., г. Новосибирск / отв. ред. А.И. Сысо. Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2017. Ч. I. С. 71–75. doi: 10.17223/9785946216456/16

References

1. Gerasimova MI, Gubin SV, Shoba SA. Mikromorfologiya pochv prirodnikh zon SSSR [Micromorphological features of the USSR zonal soils]. Dobrovol'skiy GV, editor. Pushchino: Pushchino Scientific Center RAS Publ.; 1992. 215 p. In Russian
2. Stoops G, Sedov S, Shoba S. Regoliths and soils on volcanic ash. In: Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths, 2nd ed. Stoops G, Marcelino V, Mees F, editors. Amsterdam: Elsevier; 2018. pp. 721–751. doi: 10.1016/B978-0-444-63522-8.00025-5
3. Bockheim JG. Diversity of diagnostic horizons in soils of the contiguous USA: A case study. *Catena*. 2018;168:5–13. doi: 10.1016/j.catena.2017.10.016
4. Hartemink AE, Zhang Y, Bockheim JG, Curi N, Silva SHG, Grauer-Gray J, Lowe DJ, Krasilnikov P. Soil horizon variation: A review. In: Advances in Agronomy. Sparks DL, editor. USA: Elsevier; 2020;160(1):125–185. doi: 10.1016/bs.agron.2019.10.003

5. Kornblyum EA, Mikhaylov IS, Nogina NA, Targul'yan VO. Bazovye shkaly svoystv morfologicheskikh elementov pochv [Basic scales of properties of soil morphological elements]. Moscow: Pochvennyy instiut im. VV. Dokuchaeva Publ.; 1982. 57 p. In Russian
6. Martinez FSJ, Muñoz-Ortega FJ, Caniego Monreal FJ, Kravchenko AN, Wang W. Soil aggregate geometry: Measurements and morphology. *Geoderma*. 2015;237-238:36-48. doi: 10.1016/j.geoderma.2014.08.003
7. Hartemink AE, Minasny B. Towards digital soil morphometrics. *Geoderma*. 2014;230-231(2):305-317. doi: 10.1016/j.geoderma.2014.03.008
8. Bryk M. Macrostructure of diagnostic B horizons relative to underlying BC and C horizons in Podzols, Luvisol, Cambisol, and Arenosol evaluated by image analysis. *Geoderma*. 2016;263:86-103. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.09.014
9. Grauer-Gray J, Hartemink AE. Raster sampling of soil profiles. *Geoderma*. 2018;318:99-108. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.12.029
10. Zhang Y, Hartemink AE. A method for automated soil horizon delineation using digital images. *Geoderma*. 2019;343:97-115. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.02.002
11. Plotnikova OO, Romanis TV, Kust PG. Comparison of digital image analysis methods for morphometric characterization of soil aggregates in thin sections. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2020;104:199-222. doi: 10.19047/0136-1694-2020-104-199-222
12. Kozlovskiy FI, Goryachkin SV. Pochva kak zerkalo landshtafta i kontseptsiya informatsionnoy struktury pochvennogo pokrova [Soil as a mirror of landscape and the concept on informational structure of soil cover]. *Pochvovedenie*. 1996;3:288-297. In Russian
13. Targul'yan VO, Goryachkin SV. Pamyat' pochv: pochva kak pamyat' biosferno geosferno-antropogennykh vzaimodeystviy [Soil memory: Soil as a memory of biosphere-geosphere-anthropogenic interactions]. Moscow: LKI Publ.; 2008. 692 p. In Russian
14. Loyko SV, Gerasko LI, Kulizhsky SP. Grouping the carriers of soil memory (the case of the northern area chernovaya taiga). *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya – Tomsk State University Journal of Biology*. 2011;3(15):38-49. In Russian, English summary
15. Targulian VO, Bronnikova MA. Soil memory: Theoretical basics of the concept, its current state, and prospects for development. *Eurasian Soil Science*. 2019;52:229-243. doi: 10.1134/S0032180X19030110
16. Abe SS, Yamamoto S, Wakatsuki T. Soil-particle selection by the mound-building termite *Macrotermes bellicosus* on a sandy loam soil catena in a Nigerian tropical savanna. *Journal of Tropical Ecology*. 2009;25(4):449-452. doi: 10.1017/S0266467409006142
17. Pietsch D. Krotovinas-soil archives of steppe landscape history. *Catena*. 2013;104:257-264. doi: 10.1016/j.catena.2012.12.003
18. Ponomarenko D, Ponomarenko E. Describing krotovinas: A contribution to methodology and interpretation. *Quaternary international*. 2019;502:238-245. doi: 10.1016/j.quaint.2018.05.037
19. Pawlik Ł, Šamonil P. Biomechanical and biochemical effects recorded in the tree root zone - soil memory, historical contingency and soil evolution under trees. *Plant and Soil*. 2018;426:109-134. doi: 10.1007/s11104-018-3622-9
20. Karpachevskiy LO, Dmitriev EA, Skvortsova EA, Basevich VF. Rol' vyvalov v formirovaniy struktury pochvennogo pokrova [The role of landfalls in the formation of the structure of soil cover]. *Struktura pochvennogo pokrova i ispol'zovanie pochvennykh resursov*. Moscow: Nauka, 1978. pp. 37-42. In Russian
21. Shatzel JS, Johnson DL, Burns SF, Small TW. Tree uprooting: Review of terminology, process, and environmental implications. *Canadian Journal of Forest Research*. 1989;19(1):1-11. doi: 10.1139/x89-00
22. Vasenev II, Targulyan VO. Windthrow and taiga soil formation (regimes, processes, morphogenesis of soil successions). Moscow: Nauka; 1995. 247 p.
23. Bobrovsky MV. Forest soil in European Russia: Biotic and anthropogenic factors of soil formation. Komarov AS, editor. Moscow: KMK Scientific Press Ltd.; 2010. 359 p. In Russian, English summary

24. Bobrovsky MV, Loyko SV. Patterns of pedoturbation by tree uprooting in forest soils. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2016;1:1-21. doi: 10.21685/2500-0578-2016-1-3
25. Brantley SL, Eissenstat DM, Marshall JA, Godsey SE, Balogh-Brunstad Z, Karwan DL, Papuga SA, Roering J, Dawson TE, Evaristo J, Chadwick O, McDonnell JJ, Weathers KC. Reviews and syntheses: On the roles trees play in building and plumbing the critical zone. *Biogeosciences*. 2017;14(22):5115-5142. doi: 10.5194/bg-14-5115-2017
26. Vasil'evskaya VD, Ivanov VV. Pochvy severa Zapadnoy Sibiri [Soils of the north Western Siberia]. Moscow: Moscow State University Publ.; 1986. 225 p. In Russian
27. Bockheim JG, Tarnocai C. Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soils. *Geoderma*. 1998;81(3-4):281-293. doi: 10.1016/S0016-7061(97)00115-8
28. Ping CL, Bockheim JG, Kimble JM, Michaelson GJ, Walker DA. Characteristics of cryogenic soils along a latitudinal transect in Arctic Alaska. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1998;103(22):28917-28928. doi: 10.1029/98JD02024
29. Goryachkin SV. Pochvennyy pokrov Severa (struktura, genesis, ekologiya, evolyutsiya) [The soil cover of the North (structure, genesis, ecology, evolution)]. Moscow: GEOS Publ.; 2010. 414 p. In Russian
30. Gavrilova IP, Dolgova LS. Peschanye pochvy srednetaezhnoy podzony Zapadnoy Sibiri [Sandy soils of the middle taiga subzone of Western Siberia]. In: *Prirodnye usloviya Zapadnoy Sibiri* [Natural conditions of Western Siberia]. Moscow: Moscow State University Publ.; 1972. pp. 34-50. In Russian
31. Matyshak GV, Bogatyrev LG, Goncharova OY, Bobrik AA. Specific features of the development of soils of hydromorphic ecosystems in the northern taiga of Western Siberia under conditions of cryogenesis. *Eurasian Soil Sciences*. 2017;50:1115-1124. doi: 10.1134/S1064229317100064
32. Murton JB, Worsley P, Gozdzik J. Sand veins and wedges in cold aeolian environments. *Quaternary Science Reviews*. 2000;19(9):899-922. doi: 10.1016/S0277-3791(99)00045-1
33. Smolentsev BA. Struktura pochvennogo pokrova sibirskikh uvalov (severotaezhnaya podzona Zapadnoy Sibiri) [Structure of the soil cover of the Siberian ridges (northern taiga subzone of Western Siberia)]. Novosibirsk: Siberian Branch Publ.; 2002. 117 p. In Russian
34. Morse PD, Burn CR. Field observations of syngenetic ice wedge polygons, outer Mackenzie Delta, western Arctic coast, Canada. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2013;118(3):1320-1332. doi: 10.1002/jgrf.20086
35. Rémillard AM, Hétu B, Bernatchez P, Buylaert J-P, Murray AS, St-Onge G, Geach M. Chronology and palaeoenvironmental implications of the ice-wedge pseudomorphs and composite-wedge casts on the Magdalen Islands (eastern Canada). *Boreas*. 2015;44(4):658-675. doi: 10.1111/bor.12125
36. Wolfe SA, Morse PD, Neudorf CM, Kokelj SV, Lian OB, O'Neill HB. Contemporary sand wedge development in seasonally frozen ground and palaeoenvironmental implications. *Geomorphology*. 2018;308:215-229. doi: 10.1016/j.geomorph.2018.02.015
37. Makeev AO. Poverkhnostnye paleopochvy lessovykh vodorazdelov Russkoy ravniny [Surface paleosols of loess areas in the center of the Russian plain]. Moscow: Molnet; 2012. 260 p. In Russian
38. Bertran P, Andrieux E, Antoine P, Sylvie C, Deschodt L, Gardere P, Marion H, Legentil C, Arnaud L, Liard M, Mercier N, Moine O, Sitzia L, Van Vliet-Lanoë B. Distribution and chronology of Pleistocene permafrost features in France: Database and first results. *Boreas*. 2014;43(3):699-711. doi: 10.1111/bor.12025
39. Ovchinnikov AY, Alifanov VM, Khudyakov OI. The impact of paleocryogenesis on the formation of gray forest soils in Central Russia. *Eurasian Soil Sciences*. 2020;53:1354-1364. doi: 10.1134/S1064229320100142
40. Makeev A, Lebedeva M, Kaganova A, Rusakov A, Kust P, Romanis T, Yanina T, Kurbanov R. Pedosedimentary environments in the Caspian Lowland during MIS5 (Srednaya Akhtuba reference section, Russia). *Quaternary International*. 2021;590:164-180. doi: 10.1016/j.quaint.2021.03.015

41. Kust P, Makeev A, Lessovaia S, Milanovsky E, Rusakov A, Abrosimov K, Belyaev V, Ryazantsev P. Polygenetic features in Retisols, formed in Moscow (Late Saalian) glacial till. *Catena*. 2022;214(106245):1-21. doi: 10.1016/j.catena.2022.106245
42. Garankina EV, Lobkov VA, Shorkunov IG, Belyaev VR. Identifying relict periglacial features in watershed landscape and deposits of Borisoglebsk Upland, Central European Russia. *Journal of the Geological Society*. 2022;179(5). doi: 10.1144/jgs2021-135
43. Vorob'eva GA. Pochva kak letopis' prirodnikh sobytiy Pribaykal'ya: problemy evolyutsii i klassifikatsii pochv [Soil as a chronicle of natural events in the Baikal region: problems of soil evolution and classification]. Irkutsk: Izd-vo Irkut. gos. un-ta; 2010. 205 p. In Russian
44. Dolgikh AV, Aleksandrovskii AL. Soils and cultural layers in Velikii Novgorod. *Eurasian Soil Science*. 2010;43(5):477-487. doi: 10.1134/S1064229310050017
45. Wang Q, Hartemink AE, Jiang Z, Jin N, Sun Z. Digital soil morphometrics of crotonas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China. *Geoderma*. 2017;301:11-18. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.04.010
46. IUSS Working Group WRB. World Reference Base of Soil Resources 2014, update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO.; 2015. 192 p.
47. Dudko AA, Vasilyeva YuA, Bychkov DA. Results of field archaeological works of the Yugansk detachment in the Surgut region of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug (Yugra) in 2018. *Archeology, Ethnography, and Anthropology of Siberia and Adjacent Territories*. 2018;24:470-473. In Russian
48. Reimer PJ, Austin WEN, Bard E et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*. 2020;62(4):725-757. doi: 10.1017/RDC.2020.41
49. Konstantinov A, Loiko S, Kurasova A, Konstantinova E, Novoselov A, Istigechev G, Kulizhskiy S. First findings of buried late-glacial paleosols within the dune fields of the Tomsk Priobye region (SE western Siberia, Russia). *Geosciences*. 2019;9(2):82. doi: 10.3390/geosciences9020082
50. Kurasova AO, Konstantinov AO, Kulizhskiy SP, Konstantinova EYu, Khoroshavin VYu, Loyko SV. Patterns of soil cover organization within the northern part of the Kondinskaya lowland (Western Siberia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya – Tomsk State University Journal of Biology*. 2020;49:6-24. doi: 10.17223/19988591/49/1
51. Loiko SV, Kuz'mina DM, Dudko AA, Konstantinov AO, Vasil'eva YA, Kurasova AO, Lim AG, Kulizhskii SP. Charcoals in the Middle Taiga Podzols of Western Siberia as an Indicator of Geosystem History. *Eurasian Soil Science*. 2022;55(2):154-168. doi: 10.1134/S1064229322020089
52. Loiko SV, Klimova NV, Kritkov IV, Kuzmina DM, Kulizhsky SP. Soils and vegetation of the riverside floodplain in the hydrological continuum of the southern tundra within the Pur–Taz interfluvium (Western Siberia). *Acta Biologica Sibirica*. 2023;9:293-315. doi: 10.5281/zenodo.7879848
53. Loiko SV, Krickov IV, Shefer NV, Nedyak I, Manasyov RM, Kulizhskiy SP. Soils and vegetation of the permafrost floodplain of the small river Tenyakh (Messoyakh basin, Western Siberia). *Acta Biologica Sibirica*. 2024;10:1779-1803. doi: 10.5281/zenodo.14542969
54. Pupyshova MA, Blyakharchuk TA. The impact of wildfires on the dynamics of vegetation cover in the middle taiga subzone of Western Siberia during the Holocene. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2024;15(3):200-210. doi: 10.18822/edgccc634013
55. Vizgalov GP, Frolov IV, Nikulin MS. Selishche Kulunigyy 5: istoriya arkhеologicheskogo izucheniya i novye otkrytiya [Kulunigyy 5 settlement: The history of archaeological research and new discoveries]. *History and Modern Perspectives*. 2022;4(4):103-112. doi: 10.33693/2658-4654-2022-4-4-103-112. In Russian
56. Tonkonogov VD. Opyt statisticheskogo analiza geograficheskikh zakonornostey pochvoobrazovaniya na primere peschanykh podzolov severa Russkoy ravniny [Experience in

- statistical analysis of geographical patterns of soil formation using the example of sandy podzols in the north of the Russian Plain]. *Pochvovedenie*. 1971;2:17-27. In Russian
57. Bourgauff RR, Ross DS, Bailey SW. Chemical and morphological distinctions between vertical and lateral podzolization at Hubbard Brook. *Soil Science Society of America Journal*. 2024;79:428-439. doi: 10.2136/sssaj2014.05.0190
 58. Jankowski M. The evidence of lateral podzolization in sandy soils of Northern Poland. *Catena*. 2014;112:139-147. doi: 10.1016/j.catena.2013.03.013
 59. Sommer M, Halm D, Geisinger C, Andruschkewitsch I, Zarei M, Stahr K. Lateral podzolization in a sandstone catchment. *Geoderma*. 2001;103(3-4):231-247. doi: 10.1016/S0016-7061(01)00018-0
 60. Sheinkman VS, Sedov SN, Ovchinnikov AY, Maksharov AM. Role of cryogenic and cryopedogenic processes of the past in the formation of Al-Fe-humus soils in the Nadym-Pur interfluvium, North of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2025;58:182 doi: 10.1134/S1064229325602409
 61. Moens C, Dondeyne S, Panagea I, Smolders E. Depth profile of colloidal iron in the pore water of an Albic Podzol. *European Journal of Soil Science*. 2022;73(5):13305. doi: 10.1111/ejss.13305
 62. Kurasova AO. *Prirodno-antropogennaya evolyutsiya pochv srednetazhnoy podzony Zapadnoy Sibiri v golotsene* [Natural-anthropogenic evolution of soils in the mid-taiga subzone of Western Siberia during the Holocene. CandSci. Dissertation Biology]. Tomsk: Tomsk State University; 2025. 189 p. In Russian.
 63. Alexandrovskiy AL, Chendev YG, Yurtaev AA. Soils with the second humus horizon, paleochnozems, and the history of pedogenesis at the border between forest and steppe areas. *Eurasian Soil Science*. 2022;55:127-146. doi: 10.1134/S1064229322020028
 64. Schaetzl RJ. Effects of treethrow microtopography on the characteristics and genesis of Spodosols, Michigan, USA. *Catena*. 1990;17(2):111-126. doi: 10.1016/0341-8162(90)90002-U
 65. Martinez P, Buurman P, do Nascimento DL, Vidal-Torrado P. Substantial changes in podzol morphology after tree-roots modify soil porosity and hydrology in a tropical coastal rainforest. *Plant Soil*. 2021;463:77-95. doi: 10.1007/s11104-021-04896-y
 66. Istigechev GI, Loyko SV, Kuz'mina DM, Kritskov IV, Kulizhskiy SP. Pit-and-mound topography in the podzols area of northern taiga of Western Siberia. In: *Pochvennye resursy Sibiri: vyzovy XXI veka*. Sbornik materialov Vserossiyskoy nauch. konf. s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 110-letiyu vydavushchegosya organizatora nauki i pervegogo direktora IPA SO RAN Romana Viktorovicha Kovaleva [Soil Resources of Siberia: Challenges of the 21st Century. Proc. of the All-Russian Sci. Conf. with International Participation Dedicated to the 110th Anniversary of the Outstanding Organizer of Science and the First Director of the Institute of Soil Soils of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Roman Viktorovich Kovalev (Novosibirsk, Russia, 4-8 December, 2017)]. Syso AI, editor. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University; 2017. Part I. pp. 71-75. In Russian. English summary. doi: 10.17223/9785946216456/16

67.

Информация об авторах:

Кузьмина Дарья Михайловна, канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9121-5407>

E-mail: kuzmina.d.m.95@gmail.com

Лойко Сергей Васильевич, канд. биол. наук, зав. лабораторией биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2020-4716>

E-mail: s.loyko@yandex.ru

Курасова Алина Олеговна, м. н. с. лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4479-3789>

E-mail: kurasovalina@gmail.com

Дудко Александр Андреевич, инженер-исследователь, Научно-производственный центр «АРХЕО» (Омск, Россия).

E-mail: a-dudko9@mail.ru

Васильева Юлия Александровна, инженер-исследователь, Ямальская археологическая экспедиция (Салехард, Россия).

E-mail: jvsl@mail.ru

Константинов Александр Олегович, м. н. с. лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6950-2207>

E-mail: konstantinov.alexandr72@gmail.com

Кулижский Сергей Павлович, д-р биол. наук., зав. каф. почвоведения и экологии почв, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5545-1296>

E-mail: kulizhskiy@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Daria M. Kuzmina, Cand. Sci. (Biol.), senior researcher of the BioGeoClim Laboratory, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9121-5407>

E-mail: kuzmina.d.m.95@gmail.com

Sergey S. Loiko, Cand. Sci. (Biol.), Head of the BioGeoClim Laboratory, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2020-4716>

E-mail: s.loyko@yandex.ru

Alina O. Kurasova, junior researcher of the BioGeoClim Laboratory, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4479-3789>

E-mail: kurasovalina@gmail.com

Alexander A. Dudko, research engineer, Scientific and Production Center "ARHEO" (Omsk, Russian Federation)

E-mail: a-dudko9@mail.ru

Yulia A. Vasilyeva, research engineer, Yamal Archaeological Expedition (Salekhard, Russian Federation).

E-mail: jvsl@mail.ru

Alexandr O. Konstantinov, junior researcher of the BioGeoClim Laboratory, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6950-2207>

E-mail: konstantinov.alexandr72@gmail.com

Sergey P. Kulizhsky, Doctor Sci. (Biol.), Head of the Department of Soil Science and Soil Ecology, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5545-1296>

E-mail: kulizhskiy@yandex.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 25.02.2025;
одобрена после рецензирования 25.10.2025; принята к публикации 16.12.2025.*

*The article was submitted 25.02.2025;
approved after reviewing 25.10.2025; accepted for publication 16.12.2025.*