

## АГРОХИМИЯ И ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 631.4

doi: 10.17223/19988591/59/1

### Трансформация морфологических свойств почв вследствие закустаривания пятнистой тундры

Сергей Васильевич Лойко<sup>1</sup>, Дарья Михайловна Кузьмина<sup>2</sup>,  
Георгий Игоревич Истигечев<sup>3</sup>, Иван Викторович Крицков<sup>4</sup>,  
Артём Георгиевич Лим<sup>5</sup>, Нина Владимировна Климова<sup>6</sup>,  
Андрей Андреевич Новоселов<sup>7</sup>, Александр Олегович Константинов<sup>8</sup>,  
Эльвира Владимировна Новолодская<sup>9</sup>,  
Сергей Павлинович Кулижский<sup>10</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 9, 10</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>6</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
Томск, Россия

<sup>7, 8</sup> Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

<sup>1</sup> s.loйко@yandex.ru; <sup>2</sup> kuzmina.d.m.95@gmail.com; <sup>3</sup> istigechev.g@yandex.ru;

<sup>4</sup> krickov\_ivan@mail.ru; <sup>5</sup> lim\_artyom@mail.ru; <sup>6</sup> ninmilk@yandex.ru;

<sup>7</sup> mr.andreygeo@mail.ru; <sup>8</sup> konstantinov.alexandr72@gmail.com

<sup>9</sup> novolodskaya.elvira.tsu@gmail.com; <sup>10</sup> kulizhskiy@yandex.ru

**Аннотация.** Потепление климата в Субарктике приводит к значительному увеличению площади кустарниковых экосистем. Наиболее часто плакорные тундры зарастают ольхой в комплексе с ерником и ивами. Однако до сих пор мало данных о скорости и направлении изменения морфологических свойств почв при такой смене растительности. Для улучшения представлений об этих процессах нами изучен модельный ольховник с несколькими сукцессионными стадиями в южной тундре Западной Сибири. Выполнен морфометрический анализ 34 почвенных профилей, из них 8 характеризуют фоновые почвы тундры. Показано, что с начала 60-х гг. XX в., когда начал формироваться модельный ольховник, произошло улучшение гидротермических условий, а глубина мерзлоты опустилась местами до 4 м. За это время исходные глееземы мерзлотные и торфяно-глееземы мерзлотные претерпели существенные изменения. Мощность органогенных горизонтов уменьшилась, торфяные горизонты превратились в грубогумусированные, в условиях микроводоразделов стали формироваться серогумусовые горизонты с признаками грубогумусированных. Процессы оструктурирования минеральных горизонтов привели к формированию криометаморфической оолитовой структуры. Площадь глеевых пятен уменьшилась. Наиболее продвинутой стадией почвенной сукцессии стало формирование криометаморфических глееватых почв. Проведенные исследования подтвердили гипотезу о том, что в условиях тундры существенные изменения растительного сообщества способны вызвать классификационно значимые трансформации морфологических свойств почв за несколько десятилетий.

**Ключевые слова:** *Duschekia fruticosa*, закустаривание, почвы тундры, южная тундра, Газовская тундра, макроморфология, оглеение, криотурбации, пятна-медальоны

**Источник финансирования:** Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-77-10045). Полевые работы выполнены при поддержке РФФИ и Департамента внешних связей ЯНАО (проект № 19-44-890013).

**Для цитирования:** Лойко С.В., Кузьмина Д.М., Истигечев Г.И., Крицков И.В., Лим А.Г., Климова Н.В., Новоселов А.А., Константинов А.О., Новолодская Э.В., Кулижский С.П. Трансформация морфологических свойств почв вследствие закустаривания пятнистой тундры // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2022. № 59. С. 6–41. doi: 10.17223/19988591/59/1

Original article

doi: 10.17223/19988591/59/1

## **The Transformation of Morphological Properties of Soils Due to the Low Arctic Tundra Shrubification**

**Sergey V. Loiko<sup>1</sup>, Daria M. Kuzmina<sup>2</sup>, Georgy I. Istigechev<sup>3</sup>,  
Ivan V. Kritskov<sup>4</sup>, Artyom G. Lim<sup>5</sup>, Nina V. Klimova<sup>6</sup>,  
Andrey A. Novoselov<sup>7</sup>, Alexander O. Konstantinov<sup>8</sup>,  
Elvira V. Novolodskaya<sup>9</sup>, Sergey P. Kulizhsky<sup>10</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 9, 10</sup> Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>6</sup> Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

<sup>7, 8</sup> Tyumen State University, Tyumen, Russia

<sup>1</sup> s.loйко@yandex.ru; <sup>2</sup> kuzmina.d.m.95@gmail.com; <sup>3</sup> istigechev.g@yandex.ru;

<sup>4</sup> krickov\_ivan@mail.ru; <sup>5</sup> lim\_artyom@mail.ru; <sup>6</sup> ninmilk@yandex.ru;

<sup>7</sup> mr.andreygeo@mail.ru; <sup>8</sup> konstantinov.alexandr72@gmail.com

<sup>9</sup> novolodskaya.elvira.tsu@gmail.com; <sup>10</sup> kulizhskiy@yandex.ru

**Summary.** Climate warming in the Subarctic leads to the expansion of shrub ecosystems. The most common upland tundra shrubification is by alder in combination with dwarf birch and willows. However, the nature and rate of changes in the morphological properties of soils in the low arctic tundra during shrubification remain unknown. To study the impact of new shrub ecosystems on tundra soils, we studied alder shrubs in the south of the Western Siberian tundra. The key site is located between the rivers Taz and Pur. The village of Tazovsky, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (Russia) is located nearby. This area is called the Taz tundra, near its transition to the forest tundra. The coordinates of the center of alder shrubs are N67°22'17.4", E78°42'11.7" (Fig. 1). The formation of alder shrubs at the study site began no later than 1957. We studied 34 soil profiles. Of these, eight soil profiles were studied in the tundra, eight more in the tundra ecotone and alder shrubs. Eighteen soil profiles characterized the periphery or central zone of alder shrubs (Fig. 2, 3). In the field, we studied the vegetation, the depth of permafrost, photographed soil profiles, and took samples of soil horizons and a micromonolith. We quantified soil morphological parameters such as soil horizon boundary depth, soil horizon thickness, thixotropy index, gley patch percentage, root penetration depth, charcoal abundance, and horizon coloration in the CIE-L\*a\*b\* system. A topographic survey was made within the key site. The age of shrubs and the relief form for each soil profile were determined. The obtained values were processed using the methods of basic statistics and the method of principal components.

The studied alder shrubs in the Taz Tundra are located in the upper part of the slopes of stream valleys. The expansion of shrubs at the key site has been observed since the beginning of the second half of the 20th century. For the key site with alder, the succession stages of transformation of tundra into a shrub ecosystem are described. At the first stage, only a few young shoots of alder are observed in tundra (Fig. 10). Alder appears as a result of seed germination on devoid of vegetation areas of cryoturbated soils (patterned-ground). Alder actively colonizes the territory adjacent to the original places of germination, which leads to the expansion of the original range and the concentric structure of shrubs. The second stage is represented by tundra and alder ecotone. In this ecotone, the cover and height of alder increase, and so does the habitus of the original shrubs (dwarf birch and wild rosemary). The main transformations of soil properties are associated with an increase in the active layer thickness. The third stage is the peripheral part of the alder shrubs, where the height of the alder is maximum and reaches 4.5 m. The fourth stage is the central zone of the alder shrubs, where there appear reed-sedge meadows with fireweed. Meadows form in places where the alder bushes died out.

The main changes at the third and fourth stages are associated with a radical improvement in the hydrothermal conditions of soil formation, which leads to deepening of the permafrost surface to 3–4.5 m, and a talik is formed. Soil fertility increases due to its enrichment with nitrogen by nitrogen-fixing alder. Alder leaves susceptible to decomposition fall on the soil surface, which is important for earthworms and has a priming effect for the decomposition of tundra litter. The depth of the root system increases. An increase in evapotranspiration leads to a decrease in soil moisture and disappearance of their thixotropic properties. The area of gley patches in soils decreases (Fig. 6). The thickness of peat and litter horizons decreases (Fig. 7). Initially, thixotropic horizons are structured according to the ooid type (Fig. 8). Root and animal tunnels, which are stable in seasonal cycles, are formed in the soil. The resulting pores and soil aggregates allow the development of soil mesofauna. All the above mentioned cause formation of humus-accumulative horizons on convex slopes under alder. Reductaquic Cryosols and Follic Reductaquic Cryosols evolve into Gleyic Cambisol, Stagnic Cambisol (Ochric), and Gleysol (Ochric). Thus, our study confirmed the hypothesis that the radical change of tundra vegetation during the expansion of shrubs causes significant classificatory changes in the morphological properties of soils over several decades.

*The article contains 10 figures, 79 references.*

**Keywords:** *Dusckekia fruticosa*, shrubification, tundra soils, southern tundra, Taz tundra, macromorphology, gleying, Cryosols

**Acknowledgments:** The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 18-77-10045), field work was carried out with the support of the RFBR and the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (project No. 19-44-890013). The reported study was carried out using the equipment of the Unique Research Installation “System of experimental bases located along the latitudinal gradient” TSU with financial support from the Ministry of Education and Science of Russia (RF ---- 2296.61321X0043, 13.YHY.21.0005, agreement No. 075-15-2021-672).

**For citation:** Loiko SV, Kuzmina DM, Istigechev GI, Kritskov IV, Lim AG, Klimova NV, Novoselov AA, Konstantinov AO, Novolodskaya EV, Kulizhsky SP. The Transformation of Morphological Properties of Soils Due to the Low Arctic Tundra Shrubification. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2022;59:6-41. doi: 10.17223/19988591/59/1

## **Введение**

Продолжающиеся климатические изменения в Субарктике и Арктике [1–4] сопровождаются увеличением продолжительности вегетационного периода, количества осадков, доступности элементов минерального питания для растений и как следствие продуктивности растительности [5–7]. Эффект повышения продуктивности растительности, или позеленения, достоверно установлен по данным дистанционного зондирования поверхности Земли [8–11]. Позеленение вызвано не только увеличением продуктивности тундровых растительных сообществ, но и сукцессионными процессами, такими как зарастание растительностью донных отложений осушенных бассейнов термокарстовых озёр [12, 13], оползней и термокарстовых понижений [14] либо закустаривание тундры [8, 15, 16]. Последний процесс является наиболее масштабным из сукцессионных процессов. Изучение закустаривания важно для моделирования будущих состояний ландшафтов, так как масштабное увеличение доли кустарникового покрова изменяет структуру экосистем тундры и потоки энергии, региональный климат, почвенно-атмосферный обмен водой, углеродом и элементами питания растений, а также экологические взаимодействия между видами [17].

Вопросам закустаривания тундры посвящено значительное количество работ (см., например, обзоры [18–20]). Закустаривание вызвано поселением ольхи, ив и разрастанием ерников [21]. Часто все эти виды расселяются вместе с доминированием какого-либо одного вида. Наиболее подходящими для закустаривания являются балки и долины ручьев [22]. Ивняки чаще формируются на месте нарушенных местообитаний, например по местам развития оползневых процессов [23, 24]. Ольховники формируются как по местам нарушений, так и на зарастающих пятнах-медальонах [16, 25]. Ерник в южной тундре произрастает как в зональных условиях, так и под прикрытием ивняков и ольховников. Наиболее существенные экологические изменения происходят при колонизации тундры ольхой, так как она значительно обогащает почвы соединениями азота [26]. В ольховниках зимой образуются сугробы, оказывающие обогревающее воздействие [25], а из-за затенения летом температура почвы, наоборот, ниже. Зимнее обогревающее воздействие оказывается более весомым в годовом температурном режиме [27], в связи с чем под ольховниками происходит углубление многолетней мерзлоты, а криотурбационные процессы подавлены [28]. Листовой опад кустарников приводит к эффекту прайминга – увеличивается скорость разложения органических соединений [20], в том числе ранее накопленных в верхних горизонтах почвы [29, 30]. Комплексное влияние ольховников на окружающую среду тундр требует их тщательного изучения, так как более глубокое понимание долгосрочных взаимодействий между многолетней мерзлотой, климатом, растительностью и снежным покровом, а также улучшение модельных представлений о грунтовой толще, включая подземный лед, снизит неопределенность в отношении состояния многолетней мерзлоты в будущем [31].

Проведенные ранее исследования были сосредоточены на экосистемных и ландшафтных последствиях от внедрения кустарников в тундровые

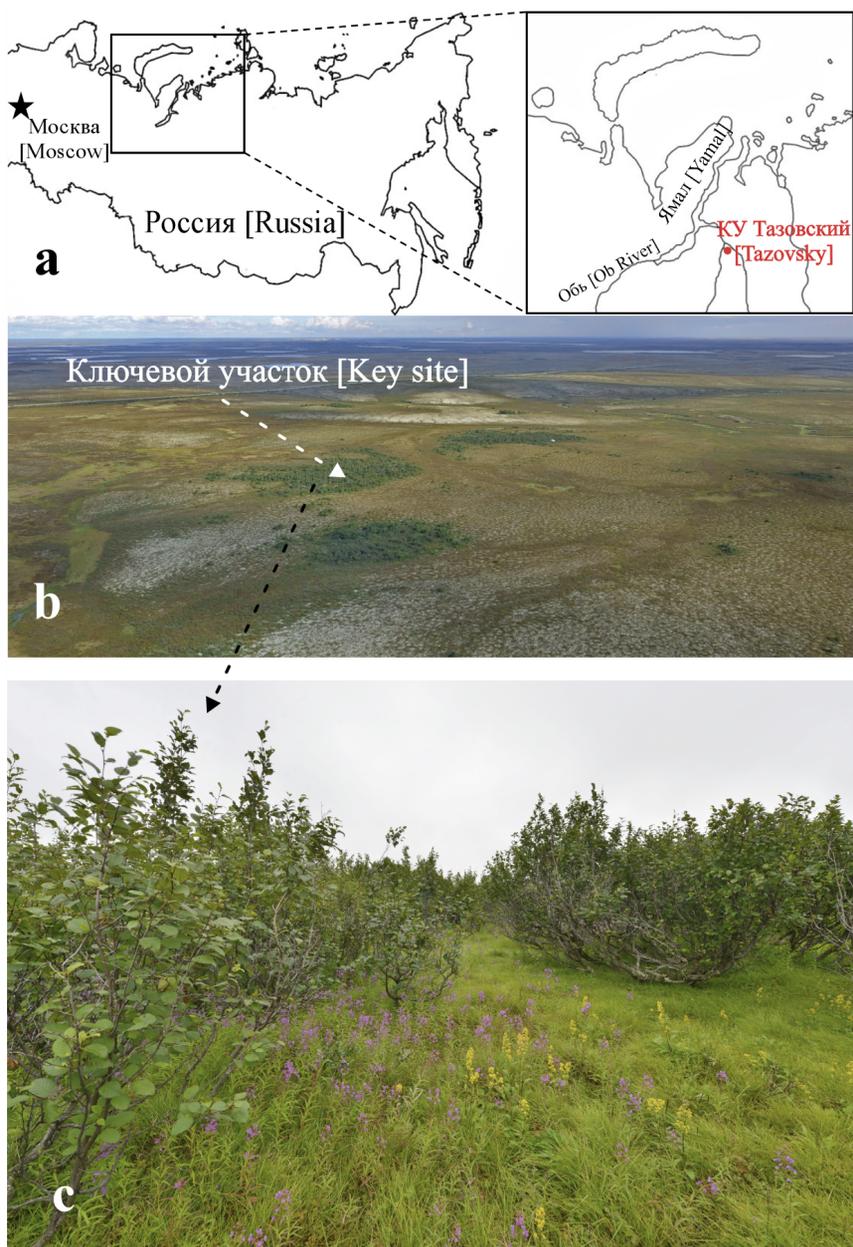
экосистемы [32–34]. Хорошо изучено влияние ольховников на температурные режимы почв [27, 28] и биогеохимические циклы [35]. Вместе с тем нами не встречены работы, в которых бы изучалась эволюция почв тундры под влиянием их закустаривания.

Характерное время почвенных процессов, протекающих в почвах тундр, например оглеения, невелико и измеряется первыми годами или десятками лет [36, 37]. Поэтому была сформулирована гипотеза о том, что за промежуток времени в более чем половину столетия, в течение которого наблюдается экспансия кустарников, изменения морфологических свойств почв могут достигнуть классификационно значимого выражения. Для проверки гипотезы было изучено изменение морфологических признаков и таксономической принадлежности почв под влиянием закустаривания. Использована методология иерархического морфосубстантивного исследования твердофазного каркаса почв [38–40], сочетающая изучение почвенного тела на макро-, мезо- и микроморфологических уровнях. Эта методология позволяет проводить интегральную оценку экологического состояния экосистемы с параллельным выявлением истории её формирования и возможностью прогнозирования ближайшего будущего.

В качестве района исследований выбран юг тундровой зоны Западной Сибири, так как для этого обширного района региональные аспекты закустаривания изучены лишь в бассейне реки Сось (Приуральский район ЯНАО) [16, 28]. Изучение педологической стороны процесса закустаривания тундры для этого региона находится на начальном уровне. Дополнительным мотивом нашей работы было протестировать возможности иерархического морфологического анализа почв для диагностики эволюционных процессов в условиях тундры на малых характерных временах. Это исследование продолжает серию работ по иерархическому морфогенетическому анализу почв Западной Сибири, выполненных нами ранее [41–46].

### Материалы и методики исследования

**Район исследований, критерии выбора и характеристика ключевого участка.** Исследования проведены неподалёку от пос. Тазовский в Тазовской тундре, расположенной в северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья (Западно-Сибирская равнина). В административном отношении это Тазовский район Ямало-Ненецкого автономного округа (Россия). Согласно схеме почвенно-экологического районирования территория относится к IV Тазовско-Гыданскому округу Западно-Сибирской тундровой провинции [47]. Работы проводили в пределах надпойменных озерно-аллювиальных террас р. Таз (рис. 1). Террасы сложены пылеватými супесями, суглинками, реже глинами и песками, мерзлота имеет сплошное распространение [48]. В условиях суглинистых плакоров и склонов под тундровой растительностью встречаются два типа почв глеевого отдела: глеезёмы мерзлотные, распространённые на повышенных элементах рельефа (верхняя и средняя часть склона), и торфяно-глеезёмы мерзлотные, залегающие в мезо- и микропонижениях (ложбины, промоины, трещины) [49].



**Рис. 1.** Ключевой участок «Тазовский»: *a* – место расположения; *b* – общий вид местности с дрона; *c* – центральная часть исследованного ольховника  
**[Fig. 1.** Tazovsky site: *a* – geographic location; *b* – aerial photograph of the key site; *c* – central part of the key alder shrubs]

Для выбора ключевого участка весной 2021 г. были проведены маршрутные исследования, в ходе которых оценивали проективное покрытие мхов, травянистых видов и осок, в камеральных условиях сравнивали раз-

новременные снимки, доступные через приложение Google Earth Pro, чтобы определить, какие заросли ольховника увеличиваются в площади, а какие стабильны. Возраст ольхи оценивался с помощью подсчёта годичных колец по кернам, полученным возрастным буравом Пресслера (Haglof, Швеция).

Критериями выбора ключевого участка для дальнейшего проведения почвенно-морфологических исследований были: 1) наличие стволов ольхи возрастом в несколько десятилетий; 2) концентрическое строение кустов с разными сукцессионными стадиями от края к центру ольховника; 3) минимальные различия геометрии форм рельефа в ольховнике и соседней тундре, являющейся фоном для сравнения. Последнее условие оказалось наименее выполнимым, так как ольховники обычно растут на склонах [50]. В таких условиях фоновая тундра и место произрастания ольховника приурочены к различным секторам геохимической катены. В изучаемой местности ольховники также в большинстве случаев приурочены к бровкам мезосклонов, покатым склонам, лишь немногие из них расположены в верхней части пологих рассеивающих стоков склонов и подходят для целей исследования.

По результатам рекогносцировочных работ выбран ольховник, расположенный в верхней части пологого рассеивающего мезосклона долины ручья без выраженного бровочного перегиба. Самый старый ствол ольхи, обнаруженный в ольховнике, начал свой рост в 1957 г. Для заложения разрезов сравнения выбрана прилегающая тундра. Координаты центра ольховника – N67°22'17.4", E78°42'11.7". В пределах ольховника сформировалась термокарстовая псевдотерраска, связанная с понижением поверхности, вызванной опусканием кровли многолетней мерзлоты под кустарником.

**Полевые работы.** В пределах тундры и выбранного модельного ольховника заложено 34 почвенных разреза, по восемь штук на четырех профилях, параллельных границе тундры и ольховника, и два дополнительных разреза. Каждый профиль характеризовал одну сукцессионную стадию и пересекал как рассеивающие, так и собирающие формы микрорельефа. Для характеристики рельефа проведена съемка высот с помощью электронного тахеометра Nikon Nivo 3.0 (Япония). Для создания фотоплана использована съемка с помощью дрона Mavic 2 Pro (DJI, Китай).

Вблизи каждого из разрезов выполнены стандартные геоботанические описания – отмечали видовой состав сообщества или парцеллы, проективное покрытие всех слагающих видов, определяли возраст самого старого ствола ольхи.

Каждый почвенный разрез был сфотографирован фотоаппаратом Nikon D850 (Япония) с объективом 14-24mm f/2.8G ED AF-S Nikkor и внешней фотовспышкой Nikon Speedlight SB-700. Для определения окраски отобрано по 2 образца из каждого почвенного разреза. Первый образец отбирался из горизонта, непосредственно контактирующего с органогенным, второй – из следующего за ним снизу, соответствуя в глееземах глеевому горизонту. Мощность сезонно-талого слоя определялась с использованием

металлического прута длиной 1,5 м, введившегося в дно разрезов. В случае глубокого залегания мерзлоты бурение проводили ручным буром Эдельмана (Eijkelkamp, Нидерланды) до кровли мерзлоты, попутно отмечая уровень надмерзлотной верховодки.

Для изучения микроморфологических признаков агрегации почвенной массы под воздействием сезонного промерзания был отобран микромоноклит размером 40 мм в длину и 37 мм в ширину из диапазона глубин 9–13 см в горизонте АО/CRM+[AYao] (профиль Tz21-34). Отбор произведен из наименее гумусированной части горизонта.

**Камеральная обработка материалов.** На изученный ключевой участок на основе съемок с дрона составлен фотоплан, на который были наложены данные тахеометрической съемки в программе Surfer 19 (Golden Software, США). Для всех отобранных почвенных образцов проведено измерение окраски бесконтактным спектрофотометром X-Rite VS450 (США). Значения фиксировались в системе CIE-L\*a\*b\* [51]. Из микромонолита изготовлен просвечивающий петрографический шлиф. Изучение микротекстур выполнено на поляризационном микроскопе Olympus-BX53MTRF (Япония). Морфометрические параметры почвенных профилей получены путем экспертного анализа цифровых фотографий с использованием программы ImageJ. Названия почвам дано на основе полевых описаний и анализа цифровых фотографий с использованием Классификации и диагностики почв России 2004 г. [52] с дополнениями 2008 г. [53]. Дополнительно даны названия по Международной классификации почв WRB 2014 с дополнениями 2015 г. [54].

Для статистического анализа определены значения следующих морфологических показателей почв: ALT – глубина залегания многолетней мерзлоты (см); hog.A – мощность горизонта AYao (см); Thixotropy – показатель тиксотропности (%); hog.O – мощность органогенного горизонта (см); S(hog.G) – площадь глеевых пятен в диапазоне 0–40 см от минеральной поверхности (%); Gcf – глубина верхней границы горизонта от минеральной поверхности почвы (см); Root – предельная глубина множественного проникновения корней толщиной более 1–2 мм (см); CharC – количество макроуглей размером более 1 мм (шт.) в диапазоне 0–40 см от минеральной поверхности почвы; M1(L\*), M1(a\*), M1(b\*) – яркость, количество красного и желтого пигментов в первом горизонте от минеральной поверхности почвы соответственно; M2(L\*), M2(a\*), M2(b\*) – те же показатели, что и выше, но во втором от минеральной поверхности почвы горизонте. Для оценки влияния факторов почвообразования на морфологические параметры оценены значения абсолютной высоты в метрах (Altitude), формы микрорельефа (параметр Microtop имеющий значения –1 для вогнутых склонов, 0 – прямых и 1 – выпуклых) и возраста кустарников на каждой точке (AgeShrubs, лет).

Из вышеперечисленных параметров авторами впервые предложен метод определения количественной меры тиксотропности почв – показатель тиксотропности. Он рассчитан, основываясь на предположении о том, что

чем более текучее состояние у почвы, тем быстрее заплывет почвенный разрез при прочих равных условиях. Так как верхние горизонты скреплены корнями, то этот процесс начинается с оплывания самой нижней части стенки разреза. При этом происходит разрыв массы вышерасположенных горизонтов в виде «гармошки», что приводит к формированию серии горизонтально ориентированных трещин-разрывов. Чем сильнее тиксотропность, тем больше трещин формируется в единицу времени. Исходя из этого показатель тиксотропности рассчитан путем отношения суммарной ширины трещин (ШТ) к ширине межтрещинной почвенной массы (ШПМ) в слое 0–40 см от минеральной поверхности почвы

$$\text{Thixotropy (\%)} = \text{ШТ/ШПМ} \cdot 100.$$

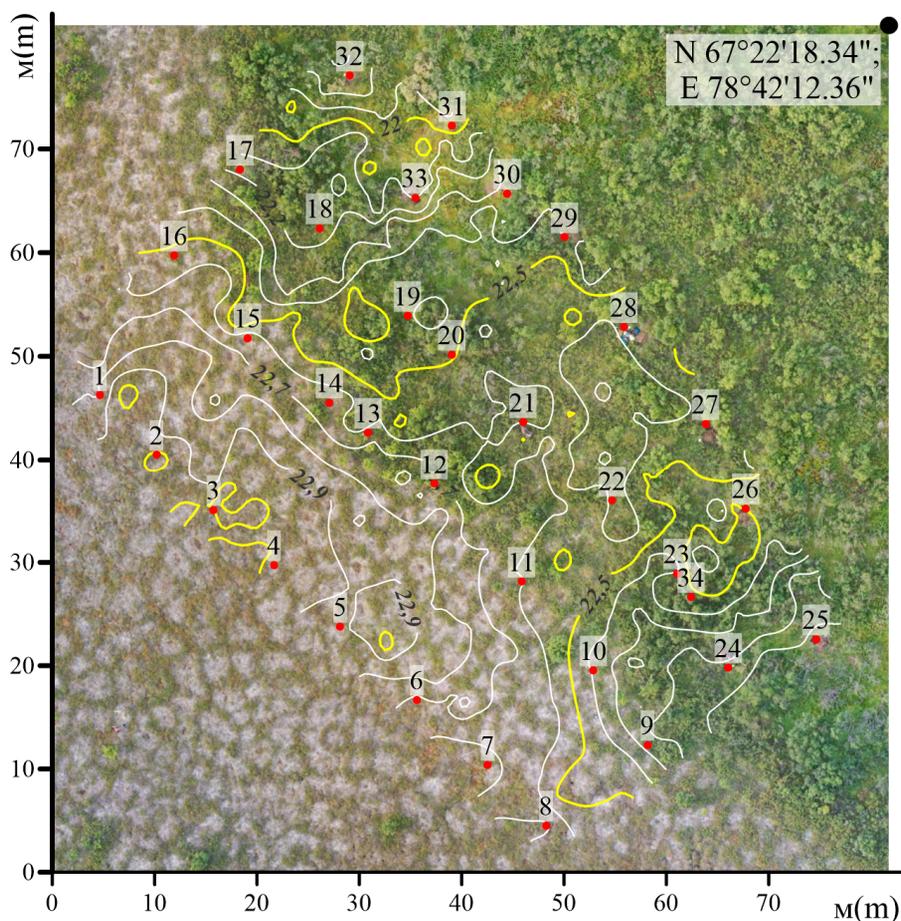
Расчет базовых статистических показателей выполнен в программе Microsoft Excel 2016, модель взаимосвязи ландшафтных и почвенных параметров получена методом главных компонент с использованием программы Statistica 12 (StatSoft, USA). Для графической визуализации этой модели использована программа Grapher 17 (Golden Software, США).

### Результаты исследования

**Экосистемы разных сукцессионных стадий ключевого участка.** Растительность тундрового участка (разрезы с Tz21-1 по Tz21-8) представлена кустарничково-мохово-лишайниковыми сообществами (рис. 2, 3). Кустарничковый ярус редкий. На пятнах-медальонах встречаются отдельные кусты ольхи (*Duschekia fruticosa*) (проективное покрытие (ПП) менее 1%) высотой (В) до 1,5–2 м. ПП карликовой березки (*Betula nana*) – 3%, В – 20 см. В травяно-кустарничковом ярусе преобладает *Ledum palustre* (ПП – 15%, В – 20 см), в небольшом обилии присутствуют другие кустарнички (*Vaccinium uliginosum*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Empetrum nigrum*) и травы (*Rubus chamaemorus*, *Carex globularis*). ПП мохово-лишайникового покрова составляет 90%, основу его образуют лишайники – *Cladonia rangiferina* (50%) с примесью *Cladonia alpina* и *Cetraria* sp. Среди мхов преобладает *Sphagnum* sp. Средняя глубина залегания мерзлоты слабо варьирует, составляя 65 см (см. рис. 3).

Экотон тундры и ольховника (разрезы с Tz21-9 по Tz21-16) расположен на 0,3–0,4 м ниже по рельефу (см. рис. 2, 3) и представляет собой начальную сукцессионную стадию в ряду зарастания тундры. Фоновая парцелла представлена закустаренной ерником (карликовая береза) кустарничково-зеленомошно-лишайниковой тундрой (см. рис. 3). Произрастают те же виды, что и на тундровом участке, но в другом количественном соотношении. Высота кустов ольхи 1,5–2,5 м, растут они на расстоянии 2–3 м друг от друга. ПП ерника – 25%, В – 45 см. Тундровые кустарнички также немного выше (багульник – 26 см, голубика – 20 см). ПП мохово-лишайникового покрова ниже – 60%. Основу его составляют лишайники с доминированием *Cladonia rangiferina*. Среди мхов преобла-

дает лесной вид *Pleurozium schreberi*, а сфагнума почти нет. Средняя глубина залегания мерзлоты – 114 см, минимальная – 77 см, а максимальная составляет 156 см (см. рис. 3).

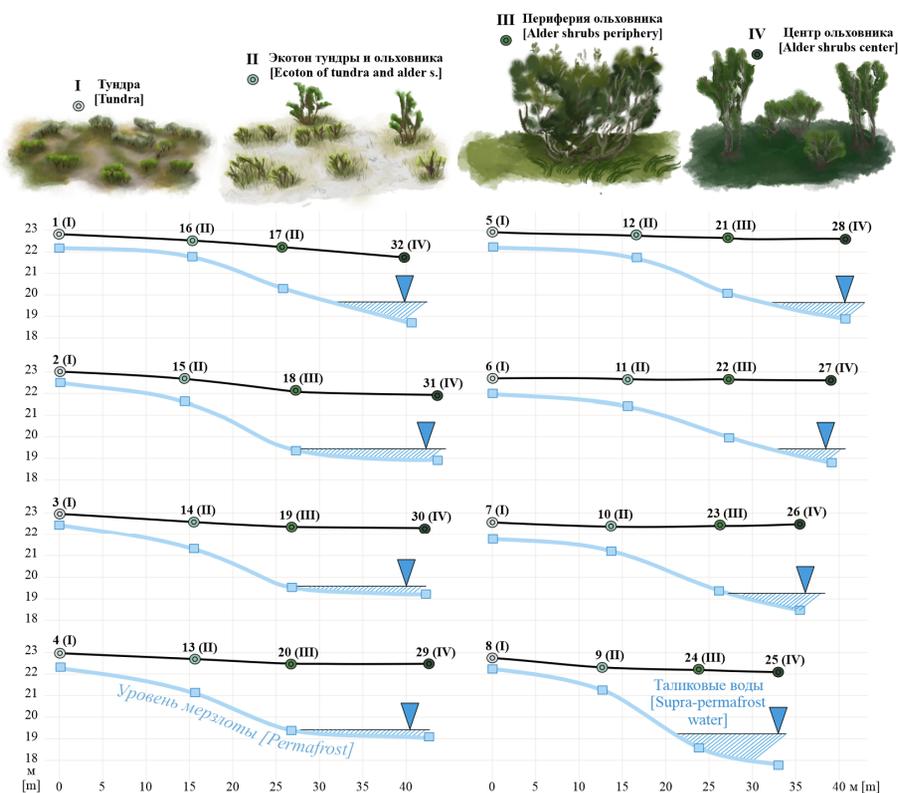


**Рис. 2.** Изолинии высот и точки заложения почвенных разрезов, наложенные на фотоплан местности

**[Fig. 2.** Elevation contours and codes of soil profiles on the photomap of the Tazovsky site]

Ольховник охарактеризован точками с Tz21-17 по Tz21-34-ю (см. рис. 2, 3). Кустарниковый ярус хорошо развит и представлен куртинами ольхи (ПП 20%), перемежающимися с куртинами карликовой березки (20–25%). Высота кустов ольхи от 2–2,5 до 3–4 м, березки – от 80 до 120 см. Травяно-кустарничковый ярус хорошо развит (ПП 65%) и представлен участками с преобладанием *Carex globularis* (35%) и участками с преобладанием *Calamagrostis lapponica* (20%), меньше по площади участки с преобладанием *Rubus arcticus* (3%). Участие кустарничков низкое (4%), наиболее обилен *Vaccinium uliginosum*. Моховой ярус представлен редкими

дернинами гипновых мхов (*Pleurozium schreberi*). В ольховнике выделяются две сукцессионные стадии, это периферия ольховника, представленная более молодыми, рослыми, сомкнутыми кустами высотой 3–4 м (точки с Tz21-17 по Tz21-24 и Tz21-34), и центральная зоны ольховника (точки с Tz21-25 по Tz21-32 и Tz21-33) с меньшей высотой кустов ольхи (2–3 м), что связано с полеганием стволов. В центральной зоне формируются луговины, состоящие из двух вариантов парцелл – с преобладанием осоки либо вейника. На периферии ольховника средняя глубина кровли мерзлоты составляет 284 см, в центральной зоне – 348 см. Самое глубокое залегание мерзлоты в 430 см обнаружено в точке Tz21-25. Из рис. 3 видно, что профиль мерзлоты образует «чашу», из-за чего глубже 2 м формируется надмерзлотная верховодка, а отложения приобретают однородную ярко-сизую окраску.



**Рис. 3.** Высоты поверхности почвы и многолетней мерзлоты на профилях через точки заложения почвенных профилей на ключевом участке «Газовский». Римскими цифрами обозначены сукцессионные стадии, арабскими – номера почвенных профилей [Fig. 3. Altitude of the soil surface and permafrost on profiles through the sites of soil profiles at the Tazovsky site. Roman numerals denote succession stages, Arabic numerals denote soil profile codes]

### Морфологические параметры почв разных сукцессионных стадий.

В изученных глееземах тундры глеевый горизонт представлен чаще в виде отдельных морфонов, реже имеет сплошное залегание. Сухая масса горизонта G имеет средний цвет по шкале Манселла – 1.3Y 5.9/3.3, тогда как

для глеевого горизонта необходимо значение  $2.5Y\ 5-6/\leq 3$ , что указывает на их близость к криоземам. Мощность сезонно-талого слоя в почвах не превышает 1 м, а в некоторых случаях составляет всего 40 см.

На рис. 4, 5 приведены фотографии типичных почвенных профилей изученного ключевого участка, сгруппированные по четырем сукцессионным стадиям и двум формам микрорельефа для каждой стадии.



**Рис. 4.** Почвенные профили на участке тундры (a, b) и экотона тундра – ольховник (c, d).

Показаны отдельно почвы рассеивающих (a, c) и собирающих (b, d) микросклонов:

a – глеезем криогенно-ожеженный мерзлотный тяжелосуглинистый;

b – торфяно-глеезем криотурбированный криогенно-ожеженный остаточно-гумусированный мерзлотный тяжелосуглинистый;

c – глеезем мерзлотный

тяжелосуглинистый;

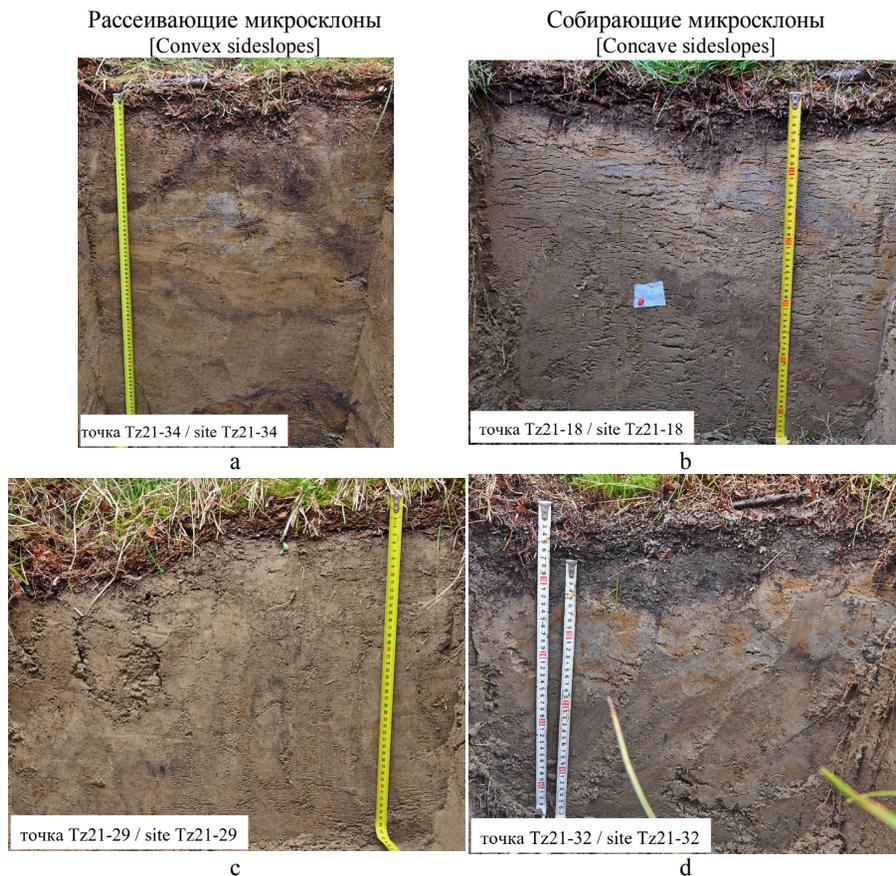
d – торфяно-криозем поверхностно-глееватый

**[Fig. 4.** Soil profiles of (a, b) tundra and (c, d) alder shrubs – tundra ecotone. Photographs of soil profiles convex sideslopes (a, c) on the left, profiles of concave sideslopes (b, d) on the right:

a – Reductaquic Cryosol; b – Follic Reductaquic Cryosol;

c – Reductaquic Cryosol; d – Follic Oxyaquic Cryosol]

В тундре на рассеивающих микросклонах встречаются глееземы криогенно-ожелезненные мерзлотные с формулой профиля (на примере почвенного разреза Tz21-2): O(0-6)–cf(6-11/13)–G(11/13-15/19)–Bg(15/19-38)–Gox(38–52)–Gox ⊥ (52+). Микроводоразделы экотона заняты такими же глееземами мерзлотными криогенно-ожелезненными, но с более мощным сезонно-талым слоем. Их формула профиля (разрез Tz21-12): O(0-3)–[G]+Gcf(10-23)–Bg(23-104)–C ⊥ (104+).



**Рис. 5.** Почвенные профили периферии (a, b) и центральной зоны ольховника (c, d). Показаны отдельно почвы рассеивающих (a, c) и собирающих (b, d) микросклонов: a – криометаморфическая грубогумусированная глееватая; b – глеезем грубогумусированный криометаморфизованный криотурбированный криогенно-ожелезненный; c – криометаморфическая типичная; d – глеезем грубогумусированный криогенно-ожелезненный

[Fig. 5. Soil profiles of alder shrubs periphery (a, b) and alder shrubs center (c, d): a – Gleyic Cambisol (Ochric); b – Gleyic Cambisol; c – Stagnic Cambisol (Ochric); d – Gleysol (Ochric)]

В периферической части ольховника почвы принадлежат уже иному отделу и представлены криометаморфическими грубогумусированными глееватыми с формулой профиля (разрез Tz21-34): O(0-4/6)–ao(4/6-8/10)–AO/CRM+[AYao](8/10-14/23)–CRM/Gox+[AYao](14/23-40/49)–BCm (40/49-

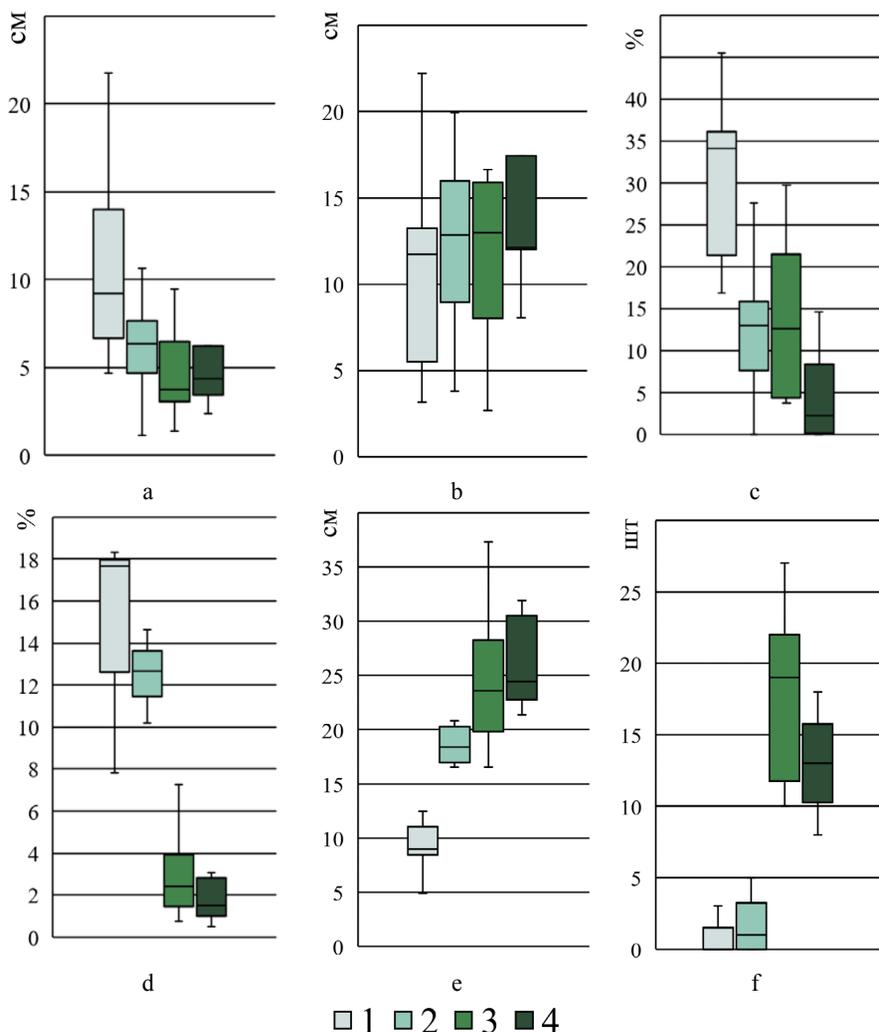
67/78)–I(fe+hh)(67/78-80+). В центральной части ольховника на рассеивающих микросклонах могут встречаться криометаморфические типичные почвы с формулой профиля (разрез Tz21-29): O(0-4)–CRM(4-20/30)–BCfe+[a](20/30-48+) уже практически без признаков глееватости.

Почвы собирающих склонов в пределах ключевого участка отличаются большей глееватостью, влажностью и мощностью органогенного горизонта. Так, на собирающем склоне в тундре распространены торфяно-глееземы криотурбированные криогенно-ожелезненные остаточно-гумусированные мерзлотные с формулой профиля (разрез Tz21-1): T1(0-7)–T2(7-11)–cf(11-15)–G(15-21/24)–Box,g+[AYao]@(21/24-54)–Box,g+[AU]@(54-59)–Box,g+[AU]@⊥(59-62+). На экотоне ольховника в ложбине встречаются не только глееземы, но и торфяно-криоземы поверхностно-глееватые с формулой профиля (разрез Tz21-9): T1(0-8)–T2(8-19)–CRg(19-34)–CR(34-60)–BC(60-105)–C⊥(105+). На собирающем склоне в периферической части ольховника встречен глеезем грубогумусированный криометаморфизованный криотурбированный криогенно-ожелезненный с формулой профиля (разрез Tz21-18): O(0-5)–ao(5-6/9)–cf(6/9–8/12)–Vm+[G]+[Gcf](8/14-13/19)–Vm+[AY]+[Gox]@(13/19-45/50)–BCg(45/50-56+). Ниже по склону в аналогичной форме микрорельефа встречен глеезем грубогумусированный криогенно-ожелезненный с формулой профиля (разрез Tz21-32): O1(0-5)–O2(5-7)–AO(7-12)–ao(12-14/16)–G(14/16-24)–Bg(24-45+).

Различия классификационного наименования и формул почвенных профилей подтверждаются отличиями отдельных параметров почв. Средняя мощность органогенного горизонта уменьшается при переходе от тундрового участка к периферии ольховника от  $11 \pm 6$  (m±st.d.) до  $5 \pm 3$  см соответственно (рис. 6, a). Средняя глубина появления глеевого горизонта, измеренная от минеральной поверхности почвы, увеличивается от тундры к центру ольховника с  $10,7 \pm 6,6$  до  $20,1 \pm 17,0$  см соответственно (рис. 6, b). Средняя площадь глеевых пятен в почвах тундры составляет  $30,2 \pm 10,5\%$ , а в центральной части ольховника падает вплоть до  $3,1 \pm 4,7\%$  (рис. 6, c). Наиболее ярко различия между рассматриваемыми стадиями сукцессии выражаются показателем тиксотропности, напрямую коррелирующим с глубиной залегания мерзлотного водопора (рис. 6, d). Глубина проникновения корней больше в ольховнике, особенно в его более молодой периферической части (рис. 6, e).

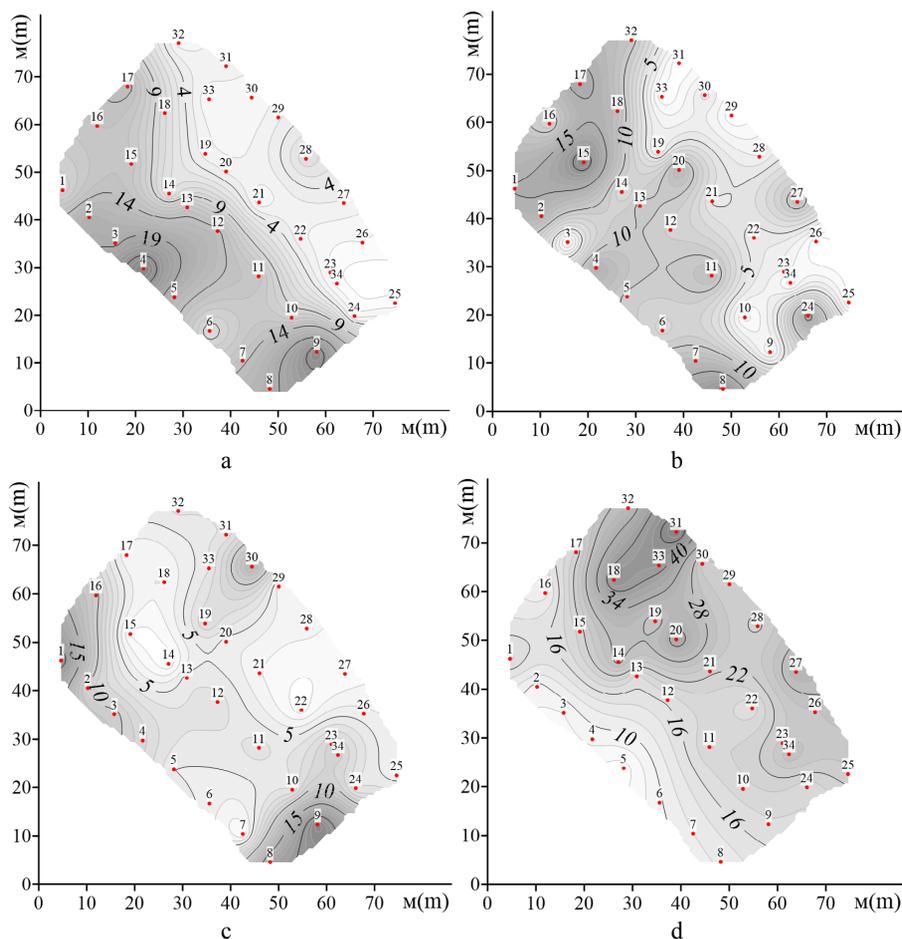
Количество макроуглей максимально в почвах периферической части ольховника (рис. 6, f). В ольховнике появляются морфоны горизонта AYao, а горизонт, залегающий под органогенным, приобретает черты грубогумусированного. Глеевый горизонт в ольховнике фрагментарный, в пространстве залегающий в виде морфонов, разделенных неогленной серовато-бледно-палевой массой.

Изученные параметры имеют высокую вариабельность внутри одной сукцессионной стадии. На рис. 7 показаны изолинии ряда параметров в пределах ключевого участка. Показатель тиксотропности достигает наибольших значений в точках Tz21-4 и 9, что приурочены к тундровой и экотональной частям участка (рис. 7, a).



**Рис. 6.** Медианы, кватили, максимальные и минимальные значения (без учета выбросов) морфологических параметров почв по сукцессионным стадиям (1 – тундра, 2 – экотон ольховника и тундры, 3 – периферия ольховника, 4 – ольховник с луговинами): *a* – мощность органогенного горизонта, см; *b* – глубина верхней границы горизонта Gcf от минеральной поверхности почвы, см; *c* – площадь глеевых пятен в диапазоне 0–40 см от минеральной поверхности, %; *d* – показатель тиксотропности, %; *e* – глубина проникновения корней, см; *f* – количество макроуглей, шт.

[Fig. 6. Medians, quartiles, maximum and minimum values (excluding outliers) of soil morphological parameters by succession stages (1 – tundra, 2 – alder shrubs and tundra ecotone, 3 – periphery of alder shrubs, 4 – alder shrubs with meadows): *a* – thickness of organic horizons (cm); *b* – upper boundary of the horizon Gg from the mineral soil surface (cm); *c* – rate of gley patches in the range of 0–40 cm from the mineral surface (%); *d* – thixotropy index (%); *e* – lower depth of occurrence of roots (cm); *f* – number of macrocoals (pcs)]

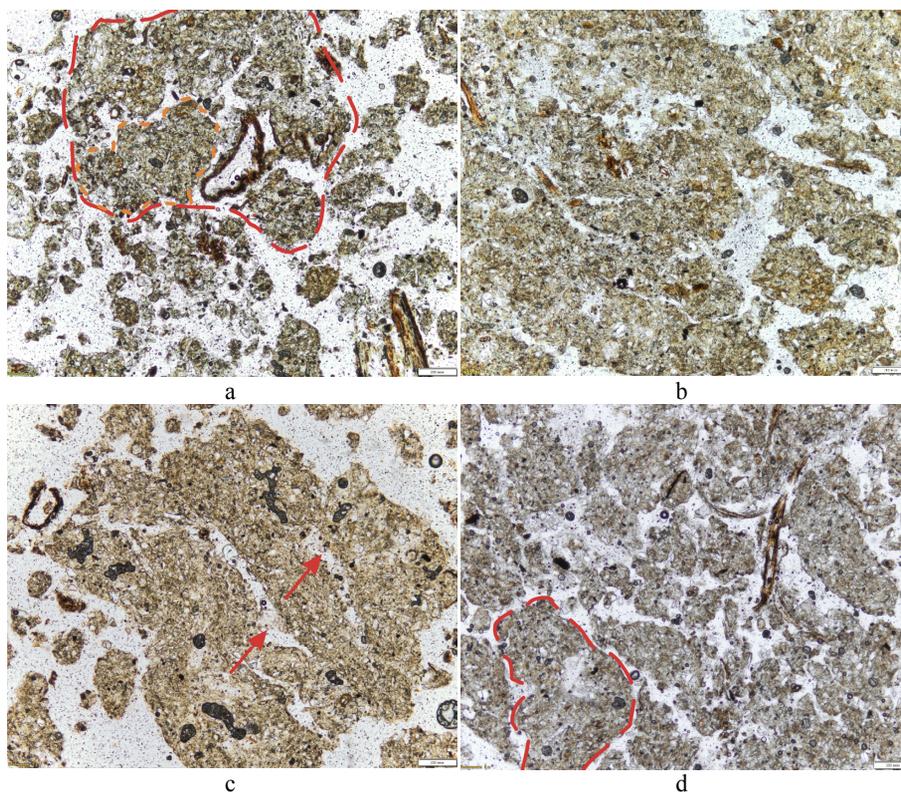


**Рис. 7.** Изолинии значений почвенных морфологических параметров: *a* – показатель тиксотропности, %; *b* – площадь глеевых пятен в диапазоне 0–40 см от минеральной поверхности, %; *c* – мощность органогенного горизонта, см; *d* – глубина проникновения корней, см

[Fig. 7. Contours of values of soil morphological parameters: *a* – thixotropy index (%); *b* – thickness of organic horizons (cm); *c* – area of gley patches in the range of 0–40 cm from the mineral surface (%); *d* – lower depth of occurrence of roots (cm)]

Минимальных значений показатель достигает в центральной части ольховника. Площадь глеевых пятен имеет паттерн пространственного распределения иной, чем предыдущий параметр (рис. 7, *b*). Например, в Tz21-9, несмотря на максимальную тиксотропность, глеевые пятна почти отсутствуют, а почва является торфяно-криоземом. Мощность органогенного горизонта закономерно увеличивается в ложбинах и в целом меньше под ольховниками (рис. 7, *c*). Глубина проникновения корней имеет два ареала максимумов (рис. 7, *d*), связанных с группой точек Tz21-18,31,32 и группой Tz21-23,26,27,34. Эти группы приурочены к наиболее старым частям ольховника в его периферической и центральной частях.

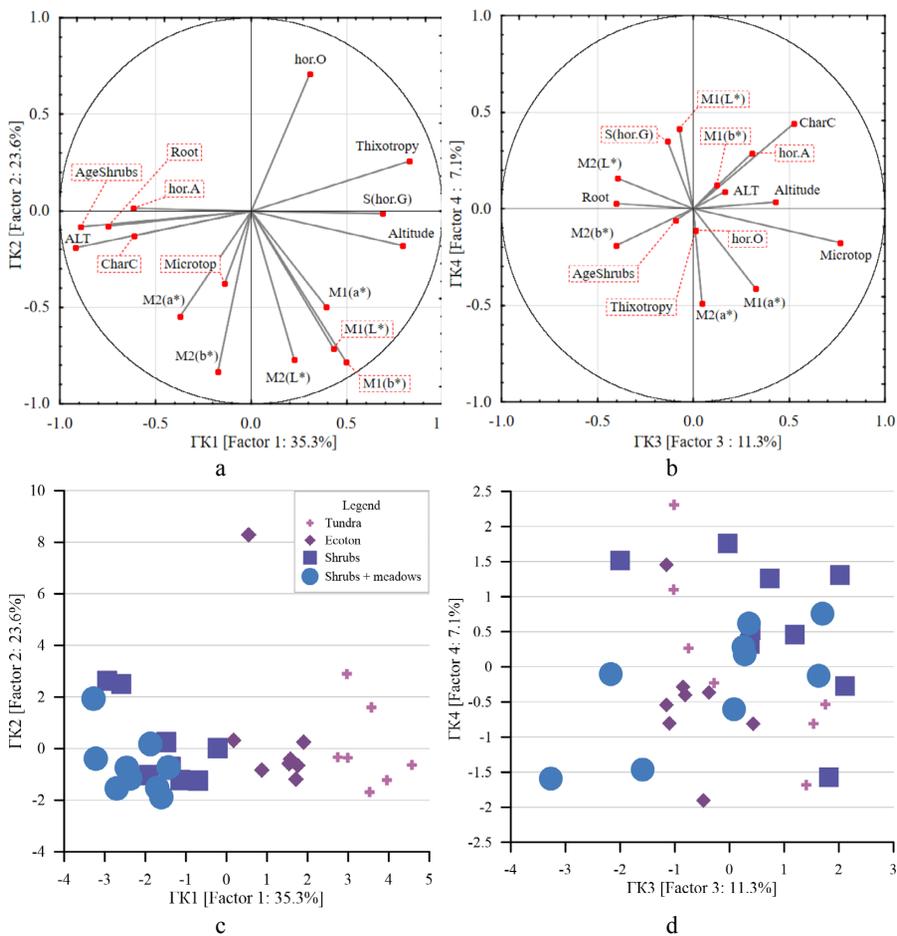
Вслед за рассмотренными параметрами изменяется и такой важный показатель, как структура почв. Тиксотропные почвы тундры и экотона являются бесструктурными. В условиях ольховников, где хорошо развиты корневые системы, тиксотропность подавлена, в почвах появляются условия для структурообразования. Исходная бесструктурная масса оструктурируется по криометаморфическому типу с формированием оолитовой структуры в верхней части почвенного профиля и ореховатой в нижней. Оолитовая структура многопорядковая (рис. 8, *a*). Формируется она в виде отдельных зон, перемежаемых бесструктурными участками (рис. 8, *b*), либо участками её фрагментарного развития (рис. 8, *c*, *d*).



**Рис. 8.** Микроморфологические признаки верхней части криометаморфического горизонта почвы центральной части ольховника: *a* – зона с многопорядковой оолитовой структурой и накоплением растительных остатков (прерывистой оранжевой линией обведен агрегат первого порядка, прерывистой красной – оолитовый агрегат второго порядка); *b* – зона начального агрегатообразования по оолитовому типу; *c* – агрегат с трещинами-разрывами внутри (трещины обозначены красными стрелками); *d* – зона с плотной упаковкой агрегатов (красной прерывистой линией обозначен оолитовый агрегат). Мерная риска равна 200 мкм

[Fig. 8. Micromorphological features of the upper part of the cryometamorphic soil horizon of the central part of alder shrubs: *a* – zone with multiorder aggregates and plant remains; *b* – zone of initial aggregation of the oolitic type; *c* – aggregate with cracks-ruptures inside; *d* – zone with dense packing of aggregates. The risk measure is 200 μm]

**Взаимосвязи между ландшафтными и морфологическими параметрами почв.** На рис. 9 приведены результаты анализа, полученные методом главных компонент. Анализируемые морфометрические и ландшафтные параметры хорошо описываются четырьмя главными компонентами (ГК) (рис. 9, *a, b*).



**Рис. 9.** Результаты анализа полученных данных методом главных компонент: *a, b* – корреляция изученных параметров почв и экотопов с полученными главными компонентами; *c, d* – ординация почвенных профилей, сгруппированных по сукцессионным стадиям, в пространстве главных компонент. Расшифровки сокращений на рисунке приведены в разделе «Материалы и методики исследования»  
**[Fig. 9.** PCA results for soil profiles of four successional stages: *a, b* – correlation of the studied parameters of soils and ecotopes with factors; *c, d* – ordination by factors of soil profiles grouped by succession stages. Explanations of abbreviations in the figure are given in the section “Materials and research methods”]

Наибольший вклад в ГК1 вносят экосистемные параметры. Отрицательно скоррелированы с ГК1 возраст кустарников, глубина проникновения корней, глубина многолетней мерзлоты, количество угольков и мощность горизонта АУао. Положительно скоррелированы показатель тиксотропности, площадь

глеевых пятен и высота поверхности. ГК2 положительно скоррелирована с мощностью органогенного горизонта, сильная отрицательная корреляция у ГК2 с желтым пигментом в окраске и яркостью образца.

Наиболее хорошо ГК3 коррелирует с параметром, характеризующим форму микрорельефа, а также с количеством макроуглей в профиле. С ГК4 коррелируют хроматические параметры. Так, яркость минерального горизонта, непосредственно залегающего под органогенным, положительно коррелирует с ГК4, в то время как количество красного пигмента второго горизонта от минеральной поверхности почвы отрицательно коррелирует с ГК4.

### **Обсуждение результатов исследования**

Почвенный покров изученного ключевого участка представлен пятнистостью глееземов микроводоразделов и торфяно-глееземов ложбин. В аналогичной природной зоне северо-восточной части Восточно-Европейской равнины топографическим аналогом глееземов являются текстурно-криометаморфические глееватые и глееземы криометаморфические, описанные в [55]. Дополнительным компонентом почвенного покрова являются криоземы и торфяно-криоземы [56]. Последние выступают в качестве ведущего компонента почвенного покрова на покровных отложениях тундр Средней и Северо-Восточной Сибири, отражая фациальные особенности этих территорий [57–58]. Появление почв из криогенного отдела в почвенном покрове Тазовской тундры логично, исходя из относительной близости Средней Сибири. На ключевом участке торфяно-криозем поверхностно-глееватый был встречен в одном из микропонижений (см. р. Tz21-9 на рис. 4, *d*). Видимо, его появление связано с влиянием торфяного горизонта, оказывающего теплоизолирующий эффект, что сильно уменьшает период оттаивания и не позволяет в полной мере реализоваться глеевому процессу.

Сезонно-талый слой на тундровом участке находится в пределах метра. Глубина оттаивания может увеличиваться в теплые годы, как это было зафиксировано в окрестностях Тазовского участка в 2012 г. [59], либо в результате пожаров [25, 60]. Под ольховником глубина протаивания резко увеличивается до 3–4 м, формируется талик с надмерзлотными водами, не замерзающий зимой (см. рис. 3). Несмотря на столь сильное увеличение глубины протаивания, благодаря усилению транспирации, тиксотропность и криотурбированность почв уменьшаются [28], а их физическая устойчивость увеличивается. Влияние растительности на несущую способность грунтов до сих пор не учитывается. Так, например, в работе [61] моделируется резкое осушение почвы при достижении уровня залегания мерзлоты в 5 м. В случае ольховников осушение наступает при более высоком уровне залегания мерзлоты и не связано с оттоком воды, а вызвано увеличением эвапотранспирации. Вместе с тем на глубине около 2 м сохраняется надмерзлотная верховодка, так как талик имеет в профиле форму западины, что препятствует стоку. Поэтому любые модели необходимо вери-

фицировать в полевых условиях, дабы избежать ошибочных прогнозов [62]. Ольховники являются хорошим модельным объектом для этого, позволяя оценить потенциал лесорастительных мелиораций на Севере, что могло бы быть дополнением к уже накопленным обширным сведениям по данному вопросу [63].

Колонизация тундры ольхой начинается с появления проростков на пятнах-медальонах вблизи ольховника (рис. 10).



**Рис. 10.** Проростки ольхи на пятне-медальоне в экотоне тундра–ольховник  
[Fig. 10. Alder seedlings on a nonsorted circle in the tundra-alder ecotone]

Важным условием разрастания ольховников является не только наличие подходящих геогенных условий, но и поступление семян [34]. Первым эффектом воздействия ольхи на почвы является зимнее потепление, вызванное накоплением снега в сугробах [64]. Это приводит к увеличению мощности сезонно-талого слоя (см. рис. 3), промерзающего зимой в условиях экотона тундры и ольховника, но превращающегося в глубокий талик в центре ольховых кустов. Второй эффект связан с поступлением опада ольхи, обогащенного азотом, в почву [26, 64–66], что увеличивает её плодородие за счёт роста концентрации нитратов [67] и совместно с улучшенными гидротермическими условиями содействует внедрению осок, вейников и других травянистых видов. Улучшение качества опада приводит к появлению дождевых червей, увеличению численности мезофауны. Так, во время работ в порах почв нами отмечены скопления коллембол, в грубогумусированном горизонте встречены дождевые черви. Поступление опада ольхи, появление мезофауны, улучшение термических условий приводят к активизации деструкционных процессов [68, 69], что выражается в появлении

грубогумусированных и даже серогумусовых горизонтов с признаками грубогумусированных. Мощность органогенных горизонтов уменьшается, дождевые черви приводят к увеличению их зольности за счет привноса минерального субстрата. Выявленное уменьшение мощности органогенного горизонта после поселения кустарников хорошо согласуется с ранее проведенными исследованиями [70]. Появление морфонов серогумусового горизонта свидетельствует об активизации процессов гумусонакопления, что подтверждается преобладанием алифатических фрагментов в гуминовых кислотах, а также углеводов, полисахаридов, простых эфиров и аминокислот. Это определяет уязвимость и высокую чувствительность почв Ямальского региона к потеплению [71].

Исчезновение тиксотропности приводит к появлению в почвах устойчивого в сезонных циклах порового пространства. Поры имеют разнообразное происхождение, – межагрегатные поры упаковки, ходы червей и корней кустарников, трещины усадки при усыхании / промерзании. Поры важны как микроместообитания для почвенной мезофауны. Благодаря порам улучшается аэрация почвы, что имеет важное значение для всей экосистемы, усиливается накопление нитратов [72], источником которых является опад азотфиксирующей ольхи, что сказывается на росте продуктивности всей экосистемы. Процессы агрегации почвенной массы приводят к эволюции почв в сторону типа криометаморфических почв, что можно диагностировать [73] по появлению локально оструктуренных по оолитовому типу морфонов (см. рис. 8). Со временем имеющие признаки криометаморфизации глееземы и криоземы превращаются на рассеивающих микросклонах в экстразональные криометаморфические почвы, характерные в качестве ведущего компонента почвенного покрова для суглинистых плакоров лесотундры и северной тайги [74], расположенных на сто километров южнее. С этими почвами схожи описанные ранее в подгольцовом поясе Приполярного Урала дерново-криометаморфическая стратифицированная и серогумусовая почвы [75].

Признаки оглеения приобретают остаточный характер, глубина расположения глеевых морфонов от минеральной поверхности почвы увеличивается. Количество глеевых пятен на срезе почвы уменьшается. Глеевый горизонт превращается в окисленно-глеевый, что выражается в увеличении содержания красного (\*а) и желтого пигментов (\*b). Вместе с тем криогенно-ожелезненный подгоризонт, залегающий выше глеевого, становится более тусклым, и роль в окраске вышеобозначенных пигментов падает. Отметим, что изменение морфологических свойств почв при зарастании тундры ольховыми кустами протекает дифференцированно, в зависимости от формы микрорельефа. Так, в центральной зоне ольховника наиболее устойчивы признаки оглеения в глееземе грубогумусированном ложбины (см. р. Tz21-32 на рис. 5, *d*), но, в отличие от своего тундрового аналога (см. рис. 4, *b*) – торфяно-глеезема (см. р. Tz21-1 на рис. 4, *b*), в этой почве торфяной горизонт сработан в грубогумусированный. Вместе с тем на

микроводоразделах под ольховником местами признаки оглеения в верхних 40 см почвы практически исчезают (см. рис. 5, с).

Интересную информацию дает и изучение распределения в пространстве почвенных макроуглей древесно-кустарниковой растительности. Так, содержание углей в почвах тундрового и экотонального участков было минимально. Вместе с тем в верхних 40 см минеральной части почв ольховника количество углей на профиль было максимальным (в среднем 1,3 в тундре против 14,2 в ольховнике). Максимумы количества углей обнаружены в расположенных рядом друг с другом разрезах Tz21-19, 21, 22, 23, 28, что позволяет предположить существование на этом же месте кустарников в прошлом и их уничтожение пожаром. Можно предположить, что появление ольхи, в первую очередь, происходит в устойчивых во времени очагах, из которых она расселяется на прилегающие территории в периоды, когда климатические условия наиболее благоприятны. Эту гипотезу подтверждают результаты моделирования влияния рельефа на расселение кустарников, показавшие, что для расселения ольховников предпочтительны определенные части склона холмов, имеющие ограниченную площадь [20]. Скоррелированность значений количества макроуглей и мощности горизонта АУао (см. рис. 10) также свидетельствует в пользу того, что в своём онтогенезе почвы центральной части ольховников несколько раз проходили кустарниковую стадию. Это объясняет факт наличия морфонов АУао в глубине профиля, что на фоне минимальной тиксотропности не могло произойти на существующем этапе расширения кустов. Видимо, в прошлом на ключевом участке пожары уже уничтожали ольховник, что приводило к агрегации мерзлоты, активизации криотурбаций и погружению сформировавшегося горизонта АУао.

Ранее показано, что ольха в условиях плакорной тундры начинает колонизацию пространства с пятен-медальонов [16, 25, 64]. Полученные нами датировки времени появления ольхи на ключевом участке показали, что это был период конца 50-х гг. Во второй половине 1960-х – начале 1970-х гг. на этой территории работал А.П. Тыртиков [25, 64], в его монографиях приведены снимки ольховников, представленных молодыми кустами, возраст которых визуальнo можно оценить в 10–15 лет. Активное появление новых ольховых кустов в период локального похолодания начала второй половины XX в. [76] можно объяснить активным пучением грунтов, сопровождаемым формированием пятен-медальонов, которые необходимы для поселения ольхи. Современное потепление климата должно было привести к уменьшению количества образующихся пятен-медальонов, но увеличению семенной продуктивности ольхи, что позволяет кустам расширяться дальше. Отметим, что в ходе проведенных нами рекогносцировочных работ не отмечено ольховников, время появления которых могло бы быть более ранним, чем конец 40-х гг. Поэтому считаем, что временной интервал в 70 лет – это тот период времени, за который произошли отмеченные в работе эволюционные изменения почв. Обозначенное время начала экспансии кустарников в Тазовской тундре хорошо

соотносится с выводами регионального анализа о том, что экспансия кустарников и деревьев на юге тундры Сибири началась с 1960-х гг. [77].

Ряд авторов рассматривают расширение ареала азотфиксирующих растений в Субарктике как экосистемную угрозу, так как растут вынос соединений азота в атмосферу и водоёмы, кислотность почв [78], однако проведенные наблюдения за ольховниками свидетельствуют об обратном, физические свойства почв становятся благоприятнее для растений и почвенной мезофауны, а на ландшафтном уровне биоразнообразия, как минимум за счёт мезофауны, должно увеличиваться. Заметим, что описанная ситуация в Альпах [79] иного плана, ольха колонизирует там исходно богатые залежные луга на плодородных почвах.

Описанные морфологические изменения почв позволяют предположить значительные последствия и для углеродного цикла. Это ещё раз доказывает, что происходящее потепление климата может вызывать существенный отклик со стороны почвенных процессов даже в условиях плакорных тундр, имеющих относительно невысокие запасы углерода органических соединений [59]. А это значит, что необходимо проводить дальнейшие исследования трансформации почв в ходе протекания климатогенных сукцессий растительности.

### **Заключение**

Заросли ольхи в Тазовской тундре приурочены в рельефе к верхним частям склонов и находятся в состоянии экспансии с начала второй половины XX в. В условиях ненарушенных плакорных тундр развиваться они начинают с момента поселения проростков ольхи на пятна-медальоны, активно захватывая прилегающие пространства, что приводит к расширению исходного ареала и концентрическому строению ольховника. В пределах модельного ольховника изучено четыре зоны (сукцессионные стадии): это прилегающая фоновая тундра, где отмечаются лишь единичные молодые побеги ольхи, экотон тундры и ольховника, в котором основные изменения растительности выражены в появлении ольхи и увеличении высоты исходных кустарников (ерники, багульник), периферия ольховника, в которой растительность полностью меняется во всех ярусах, и центральная зона, в которой появляются луговины, представляющие собой финальную стадию, связанную с началом усыхания ольховых кустов. Главные изменения условий почвообразования сводятся к улучшению гидротермических условий, обогащению биогеохимического цикла азотом и поступлению легкоразлагаемого опада на поверхность почвы.

Исходные тундровые почвы, представленные глееземами и торфяно-глееземами мерзлотными под воздействием изменившейся растительности и микроклимата начинают активно изменяться. Вначале опускается вглубь уровень многолетней мерзлоты. Затем, по мере расширения синузид травянистой растительности под ольхой, нарастания корневой массы ольхи и трав, происходит лучшее осушение почвы, исчезают тиксотропные свой-

ства. Начинаются процессы оструктурирования почвенной массы по ооидному типу, формируются устойчивые в сезонных циклах ходы корней и животных. Появившееся поровое пространство и структурные отдельности позволяют развиваться почвенной мезофауне. Почвы приобретают черты криометаморфических, мощность торфяных и подстилочных горизонтов снижается, они превращаются в грубогумусовые горизонты. В наиболее продвинутых случаях этого сукцессионного процесса формируются криометаморфические почвы, а также появляются серогумусовые горизонты или морфоны с признаками грубогумусированных.

Установлено, что экспансия ольховников в плакорных условиях южных тундр приводит к протеканию довольно быстрых сукцессионных изменений почв, из-за чего у исходных глееземов и криоземов возникают признаки, позволяющие относить их к криометаморфизированным и грубогумусированным подтипам, а по мере прогрессирования этих процессов почвы превращаются в криометаморфические. Таким образом, подтверждена исходная гипотеза о том, что в условиях тундры значительная смена растительного сообщества способна вызвать классификационно значимые изменения морфологических свойств почв за несколько десятилетий.

#### Список источников

1. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Моделирование мощности сезонно-талого слоя с учетом изменений климата и растительности: прогноз на середину XXI века и анализ неопределенностей // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 2. С. 3–10. doi: 10.21782/KZ1560–7496–2017–2(3–10)
2. Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G., Malkova G.V., Nyland K.E., Streletskiy D.A. Permafrost degradation in the western Russian arctic // Environmental Research Letters. 2020. Vol. 15, № 4. Article № 045001. doi: 10.1088/1748-9326/ab6f12
3. Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D., Shiklomanov N., Pastukhov A., Novakovskiy A., Sadurtdinov M., Skvortsov A., Tsarev A., Pochikalov A., Malitsky S., Kraev G. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North // Polar Geography. 2021. Vol. 44, № 3. PP. 203–216. doi: 10.1080/1088937X.2021.1981476
4. Fewster R.E., Morris P.J., Ivanovic R.F., Swindles G.T., Peregón A.M., Smith C.J. Imminent loss of climate space for permafrost peatlands in Europe and Western Siberia // Nature Climate Change. 2022. Vol. 12, № 4. PP. 373–379. doi: 10.1038/s41558-022-01296-7
5. Wu Z., Dijkstra P., Koch G.W., Peñuelas J., Hungate B.A. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: A meta-analysis of experimental manipulation // Global Change Biology. 2011. Vol. 17, № 2. PP. 927–942. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02302
6. Huang M., Piao S., Janssens I.A., Zhu Z., Wang T., Wu D., Ciais P., Myneni R.B., Peaucelle M., Peng S. Velocity of change in vegetation productivity over northern high latitudes // Nature ecology and evolution. 2017. Vol. 1, № 11. PP. 1649–1654. doi:10.1038/s41559-017-0328-y
7. Reichle L.M., Epstein H.E., Bhatt U.S., Raynolds M.K., Walker D.A. Spatial heterogeneity of the temporal dynamics of Arctic Tundra vegetation // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45, № 17. PP. 9206–9215. doi: 10.1029/2018GL078820
8. Тишков А.А., Кренке-мл. А.Н. «Позеленение» Арктики в XXI веке как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения // Арктика: экология и экономика. 2015. № 4. С. 28–38.

9. Frost G.V., Bhatt U.S., Epstein H.E., Walker D.A., Raynolds M.K., Berner L.T., Bjerke J.W., Breen A.L., Forbes B.C., Goetz S.J. Tundra Greenness // *Arctic Report Card. Phaffikon, Switzerland*, 2019. doi: 10.25923/8n78-wp73
10. Berner L.T., Massey R., Jantz P., Forbes B.C., Macias-Fauria M., Myers-Smith I., Kumpula T., Gauthier G., Andreu-Hayles L., Gaglioti B.V., Burns P., Zetterberg P., D'Arrigo R., Goetz S.J. Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11, № 1. PP. 1–12. doi: 10.1038/s41467-020-18479-5
11. Myers-Smith I.H., Kerby J.T., Phoenix G.K., Bjerke J.W., Epstein H.E., Assmann J.J., John C., Andreu-Hayles L., Angers-Blondin S., Beck P.S.A., Berner L.T., Bhatt U.S., Bjorkman A.D., Blok D., Bryn A., Christiansen C.T., Cornelissen J.H.C., Cunliffe A.M., Elmendorf S.C., Forbes B.C., Goetz S.J., Hollister R.D., de Jong R., Loranty M.M., Macias-Fauria M., Maseyk K., Normand S., Olofsson J., Parker T.C., Parmentier F.-J.W., Post E., Schaepman-Strub G., Stordal F., Sullivan P.F., Thomas H.J.D., Tømmervik H., Treharne R., Tweedie C.E., Walker D.A., Wilmking M., Wipf S. Complexity revealed in the greening of the Arctic // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10, № 2. PP. 106–117. doi: 10.1038/s41558-019-0688-1
12. Lara M.J., Nitze I., Grosse G., Martin P., McGuire A.D. Reduced Arctic tundra productivity linked with landform and climate change interactions // *Scientific reports*. 2018. Vol. 8, № 1. PP. 1–10. doi: 10.1038/s41598-018-20692-8
13. Loiko S., Klimova N., Kuzmina D., Pokrovsky O. Lake drainage in permafrost regions produces variable plant communities of high biomass and productivity // *Plants*. 2020. Vol. 9, № 7. Article 867. doi: 10.3390/plants9070867
14. Walker D.A., Leibman M.O., Epstein H.E., Forbes B.C., Bhatt U.S., Raynolds M.K., Comiso J.C., Gubarkov A.A., Khomutov A.V., Jia G.J. Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index // *Environmental Research Letters*. 2009. Vol. 4, № 4. Article № 045004. doi: 1088/1748-9326/4/4/045004
15. Tape K., Sturm M., Racine C. The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic // *Global Change Biology*. 2006. Vol. 12, № 4. PP. 686–702. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01128.x
16. Frost G.V., Epstein H.E., Walker D.A., Matyshak G., Ermokhina K. Patterned-ground facilitates shrub expansion in Low Arctic tundra // *Environmental Research Letters*. 2013. Vol. 8, № 1. Article № 015035. doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015035
17. Myers-Smith I.H., Forbes B.C., Wilmking M., Hallinger M., Lantz T., Blok D., Tape K.D., Macias-Fauria M., Sass-Klaassen U., Levesque E., Boudreau S., Ropars P., Hermanutz L., Trant A., Collier L.S., Weijers S., Rozema J., Rayback S.A., Schmidt N.M., Sc-Strub G., Wipf S., Rixen C., Menard C.B., Venn S., Goetz S., Andreu-Hayles L., Elmendorf S., Ravolainen V., Welker J., Grogan P., Epstein H.E., Hik D.S. Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities // *Environmental Research Letters*. 2011. Vol. 6, № 4. Article № 045509. doi: 10.1088/1748-9326/6/4/045509
18. Vowles T., Björk R.G. Implications of evergreen shrub expansion in the Arctic // *Journal of Ecology*. 2019. Vol. 107, № 2. PP. 650–655. doi: 10.1111/1365-2745.13081
19. Chen Y., Hu F.S., Lara M.J. Divergent shrub-cover responses driven by climate, wildfire, and permafrost interactions in Arctic tundra ecosystems // *Global change biology*. 2021. Vol. 27, № 3. PP. 652–663. doi: 10.1111/gcb.15451
20. Mekonnen Z., Riley W., Berner L., Bouskill N., Torn M., Iwahana G., Breen A., Myers-Smith I., Criado M., Liu Y. Arctic tundra shrubification: A review of mechanisms and impacts on ecosystem carbon balance // *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16, № 5. Article № 053001. doi: 10.1088/1748-9326/abf28b
21. Tape K.D., Hallinger M., Welker J.M., Ruess R.W. Landscape Heterogeneity of Shrub Expansion in Arctic Alaska // *Ecosystems*. 2012. Vol. 15, № 5. PP. 711–724. doi: 10.1007/s10021-012-9540-4

22. Liljedahl A.K., Timling I., Frost G.V., Daanen R.P. Arctic riparian shrub expansion indicates a shift from streams gaining water to those that lose flow // *Communications Earth and Environment*. 2020. Vol. 1, № 1. PP. 1–9. doi: 10.1038/s43247-020-00050-1
23. Ukraintseva N., Leibman M., Streletskaya I., Mikhaylova T. Study of Plant-Soil-Permafrost System on Landslide-Affected Slopes Using Geochemical Methods on Yamal, Russia // *Landslide Science for a Safer Geoenvironment / Sassa K., Canuti Y.Y. editors. Cham: Springer International Publishing, 2014. PP. 523–528*
24. Verdonen M., Berner L.T., Forbes B.C., Kumpula T. Periglacial vegetation dynamics in Arctic Russia: decadal analysis of tundra regeneration on landslides with time series satellite imagery // *Environmental research letters*. 2020. Vol. 15, № 10. Article № 105020. doi: 10.1088/1748-9326/abb500
25. Тыртиков А.П. Динамика растительного покрова и развитие вечной мерзлоты в Западной Сибири. М. : Изд-во МГУ, 1974. 199 с.
26. Rhoades C., Oskarsson H., Binkley D., Stottleyer B. Alder (*Alnus crispa*) effects on soils in ecosystems of the Agashashok River valley, northwest Alaska // *Ecoscience*. 2001. Vol. 8, № 1. PP. 89–95. doi: 10.1080/11956860.2001.11682634
27. Kropp H., Loranty M.M., Natali S.M., Kholodov A.L., Rocha A.V., Myers-Smith I., Abbot B.W., Abermann J., Blanc-Betes E., Blok D. Shallow soils are warmer under trees and tall shrubs across Arctic and Boreal ecosystems // *Environmental research letters*. 2020. Vol. 16, № 1. Article № 015001. doi: 10.1088/1748-9326/abc994
28. Frost G.V., Epstein H.E., Walker D.A., Matyshak G., Ermokhina K. Seasonal and Long-Term Changes to Active-Layer Temperatures after Tall Shrubland Expansion and Succession in Arctic Tundra // *Ecosystems*. 2018. Vol. 21, № 3. PP. 507–520. doi: 10.1007/s10021-017-0165-5
29. Marsh P., Bartlett P., MacKay M., Pohl S., Lantz T. Snowmelt energetics at a shrub tundra site in the western Canadian Arctic // *Hydrological Processes*. 2010. Vol. 24, № 25. PP. 3603–3620. doi: 10.1002/hyp.7786
30. Heijmans M.M.P.D., Magnusson R.I., Lara M.J., Frost G.V., Myers-Smith I.H., van Huissteden J., Jorgenson M.T., Fedorov A.N., Epstein H.E., Lawrence D.M., Limpens J. Tundra vegetation change and impacts on permafrost // *Nature Reviews Earth and Environment*. 2022. Vol. 3, № 1. PP. 68–84. doi: 10.1038/s43017-021-00233-0
31. Smith S.L., O’Neill H.B., Isaksen K., Noetzli J., Romanovsky V.E. The changing thermal state of permafrost // *Nature Reviews Earth and Environment*. 2022. Vol. 3, № 1. PP. 10–23. doi: 10.1038/s43017-021-00240-1
32. Bonfils C.J.W., Phillips T.J., Lawrence D.M., Cameron-Smith P., Riley W.J., Subin Z.M. On the influence of shrub height and expansion on northern high latitude climate // *Environmental Research Letters*. 2012. Vol. 7, № 1. Article № 015503.
33. Loranty M.M., Goetz S.J. Shrub expansion and climate feedbacks in Arctic tundra // *Environmental Research Letters*. 2012. Vol. 7, № 1. Article № 011005
34. Liu Y., Riley W.J., Keenan T.F., Mekonnen Z.A., Holm J.A., Zhu Q., Torn M.S. Dispersal and fire limit Arctic shrub expansion // *Nature communications*. 2022. Vol. 13, № 1. PP. 1–10. doi: 10.1038/s41467-022-31597-6
35. Villani M., Mauclet E., Agnan Y., Druel A., Jasinski B., Taylor M., Schuur E.A.G., Opfergelt S. Mineral element recycling in topsoil following permafrost degradation and a vegetation shift in sub-Arctic tundra // *Geoderma*. 2022. Vol. 421. Article № 115915. doi: 10.1016/j.geoderma.2022.115915
36. Зайдельман Ф.П. Теория образования светлых кислых элювиальных горизонтов почв и ее прикладные аспекты. М.: КРАСАНД, 2010. 248 с.
37. Замотаев И.В., Белобров В.П. Элементарные почвообразовательные процессы в почвоподобных техногенных образованиях футбольных полей России // *Почвоведение*. 2014. № 8. С. 998–1013.
38. Таргульян В.О., Горячкин С.В. Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропогенных взаимодействий. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. 692 с.

39. Герасимова М.И., Бронникова М.А., Хитров Н.Б., Шоркунов И.Г. Опыт иерархического морфогенетического анализа Курского чернозема // Морфология почв: от макро- до субмикроруровня: материалы научной конференции. М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2016. С. 85–100.
40. 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
41. 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.
42. Лойко С.В., Бобровский М.В., Новокрещенных Т.А. Признаки ветровального морфогенеза в фоновых почвах черневой тайги (на примере Томь-Яйского междуречья) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 4. С. 20–35.
43. Лойко С.В., Герасько Л.И., Кулижский С.П., Амелин И.И., Истигечев Г.И. Строение почвенного покрова северной части ареала черневой тайги юго-востока Западной Сибири // Почвоведение. 2015. № 4. С. 410–423. doi: 10.7868/S0032180X15040061
44. 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. Article № 82. doi: 10.3390/geosciences9020082
45. 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
46. 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
47. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1 : 2 500 000 / И.С. Урусевская, И.О. Алябина, В.П. Винокова, Л.Б. Востокова, Е.И. Дорофеева, С.А. Шоба, Л.С. Щипихина ; под ред. Г.В. Добровольского, И.С. Урусевской. М. : Талка+, 2013.
48. Слагода Е.А., Новосёлов А.А., Королева Е.С., Кузнецова А.О., Бутаков В.И., Тихонова Я.В., Зазовская Э.П. Следы криогенных процессов в позднеплейстоценовых отложениях Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири // Криосфера Земли. 2022. Т. 26, № 1. doi: 10.15372/KZ20220103
49. Заров Е.А., Голубятников Л.Л., Лапшина Е.Д., Лойко С.В. Растительность и почвы тундровых ландшафтов Пур-Тазовского междуречья // Известия РАН. Серия биологическая. 2022. № 1. С. 82–92.
50. Mekonnen Z.A., Riley W.J., Grant R.F., Salmon V.G., Iversen C.M., Biraud S.C., Breen A.L., Lara M.J. Topographical controls on hillslope-scale hydrology drive shrub distributions on the Seward Peninsula, Alaska // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. Vol. 126, № 2. Article № e2020JG005823. doi: 10.1029/2020JG005823
51. Водяницкий Ю.Н., Кириллова Н.П. Использование системы CIE–L\*a\*b\* для характеристики цвета почв // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1337–1346. doi: 10.7868/S0032180X16110101
52. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
53. Полевой определитель почв России. М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
54. 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.

55. Горячкин С.В. Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М. : ГЕОС, 2010. 414 с.
56. Гербер А.А., Лойко С.В., Истигечев Г.И., Лим А.Г. Углерод в глееземах и криоземах южной тундры Западной Сибири // Почвенно-экологические процессы в естественных и антропогенно-преобразованных ландшафтах Сибири и Дальнего Востока: материалы II Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Красноярск : Изд-во Красноярского ГАУ, 2018. С. 33–37.
57. Ананко Т.В., Конюшков Д.Е. Почвенный покров севера Средней Сибири на почвенной карте РСФСР (1988) и на листах государственной почвенной карты // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. № 81. С. 45–70.
58. Губин С.В., Лупачев А.В. Почвы суглинистых водоразделов приморских тундр севера Якутии: условия и процессы формирования // Почвоведение. 2017. № 2. С. 147–157.
59. Gentsch N., Mikutta R., Alves R.J.E., Barta J., Capek P., Gittel A., Hugelius G., Kuhry P., Lashchinskiy N., Palmtag J., Richter A., Šantrůckova H., Schnecker J., Shibistova O., Urich T., Wild B., Guggenberger G. Storage and transformation of organic matter fractions in cryoturbated permafrost soils across the Siberian Arctic // Biogeosciences. 2015. Vol. 12, № 14. PP. 4525–4542. doi: 10.5194/bg-12-4525-2015
60. Heim R.J., Bucharova A., Brodt L., Kamp J., Rieker D., Soromotin A.V., Yurtaev A., Hölzel N. Post-fire vegetation succession in the Siberian subarctic tundra over 45 years // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 760. Article № 143425. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143425
61. Teufel B., Sushama L. Abrupt changes across the Arctic permafrost region endanger northern development // Nature Climate Change. 2019. Vol. 9, № 11. PP. 858–862. doi: 10.1038/s41558-019-0614-6
62. O’Neil H.B., Burn C.R., Allard M., Arenson L.U., Bunn M.I., Connon R.F., Kokelj S.A., Kokelj S.V., LeBlanc A.M., Morse P.D., Smith S.L. Permafrost thaw and northern development // Nature Climate Change. 2020. Vol. 10, № 8. PP. 722–723. doi: 10.1038/s41558-020-0862-5
63. Хантимер И.С. Сельскохозяйственное освоение тундры. Л. : Наука, 1974. 226 с.
64. Тыргиков А.П. Динамика растительного покрова и развитие мерзлотных форм рельефа. М. : Наука, 1979. 116 с.
65. Salmon V.G., Breen A.L., Kumar J., Lara M.J., Thornton P.E., Wullschleger S.D., Iversen C.M. Alder Distribution and Expansion Across a Tundra Hillslope: Implications for Local N Cycling // Frontiers in Plant Science. 2019. Vol. 10. Article № 1099. doi: 10.3389/fpls.2019.01099
66. Ramm E., Liu C., Mueller C.W., Gschwendtner S.S., Yue H., Wang X., Bachmann J., Bohnhoff J.A., Ostler U., Schloter M., Rennenberg H., Dannenmann M. Alder-induced stimulation of soil gross nitrogen turnover in a permafrost-affected peatland of Northeast China // Soil Biology and Biochemistry. 2020. Vol. 172. Article № 108757. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108757
67. McCaully R.E., Arendt C.A., Newman B.D., Salmon V.G., Heikoop J.M., Wilson C.J., Sevanto S., Wales N.A., Perkins G.B., Marina O.C., Wullschleger S.D. High nitrate variability on an Alaskan permafrost hillslope dominated by alder shrubs // The Cryosphere. 2022. Vol. 16, № 5. PP. 1889–1901. doi: 10.5194/tc-16-1889-2022
68. Phillips C.A., Wurzburger N. Elevated rates of heterotrophic respiration in shrub-conditioned arctic tundra soils // Pedobiologia. 2019. Vol. 72. PP. 8–15. doi: 10.1016/j.pedobi.2018.11.002
69. Shi F.X., Chen H.M., Wang X.W., Mao R. Alder encroachment alters subsoil organic carbon pool and chemical structure in a boreal peatland of Northeast China // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 850. Article № 157849. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157849
70. Parker T.C., Thurston A.M., Raundrup K., Subke J.A., Wookey P.A., Hartley I.P. Shrub expansion in the Arctic may induce large-scale carbon losses due to changes in plant-soil interactions // Plant and Soil. 2021. Vol. 463, №1. PP. 643–651. doi: 10.1007/s11104-021-04919-8

71. Alekseev I., Abakumov E. Soil organic carbon stocks and stability of organic matter in permafrost-affected soils of Yamal region, Russian Arctic // *Geoderma Regional*. 2022. Vol. 28. Article № e00454. doi: 10.1016/j.geodrs.2021.e00454
72. Arendt C.A., Heikoop J.M., Newman B.D., Wilson C.J., Wainwright H., Kumar J., Andersen C.G., Wales N.A., Dafflon B., Cherry J., Wulfschlegler S.D. Increased Arctic NO<sub>3</sub><sup>-</sup> Availability as a Hydrogeomorphic Consequence of Permafrost Degradation and Landscape Drying // *Nitrogen*. 2022. Vol. 3, № 2. PP. 314–332. doi: 10.3390/nitrogen3020021
73. Пастухов А.В. Микроморфологическое строение мерзлотных и длительно сезонно-промерзающих суглинистых почв Европейского Северо-Востока // *Известия Коми научного центра УрО РАН*. 2012. Т. 12, № 4. С. 30–39.
74. Кулижский С.П., Лойко С.В., Гербер А.А. Закономерности распространения почв в дренированной лесотундре Западной Сибири (правобережная часть бассейна в среднем течении р. Пур) // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2017. Т. 211, № 11. С. 93–97.
75. Старцев В.В., Жангуров Е.В., Дымов А.А. Характеристика почв высотных поясов хребта Яптикнырд (Приполярный Урал) // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2017. № 38. С. 6–27. doi: 10.17223/19988591/38/1
76. Тишкова А.А., Белонская Е.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Лаппо Е.Г., Морозова О.В., Покровская И.В., Тертицкий Г.М., Титова С.В., Царевская Н.Г. Региональные биогеографические эффекты «быстрых» изменений климата в российской Арктике в XXI в. // *Арктика: экология и экономика*. 2020. Т. 38, № 2. С. 31–44. doi: 10.25283/2223-4594-2020-2-31-44
77. Frost G.V., Epstein H.E. Tall shrub and tree expansion in Siberian tundra ecotones since the 1960s // *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20, № 4. PP. 1264–1277. doi: 10.1111/gcb.12406
78. Hiltbrunner E., Aerts R., Bühlmann T., Huss-Danell K., Magnusson B., Myröld D.D., Reed S.C., Sigurdsson B.D., Körner C. Ecological consequences of the expansion of N<sub>2</sub>-fixing plants in cold biomes // *Oecologia*. 2014. Vol. 176, № 1. PP. 11–24. doi: 10.1007/s00442-014-2991-x
79. Bühlmann T., Hiltbrunner E., Körner C. *Alnus viridis* expansion contributes to excess reactive nitrogen release, reduces biodiversity and constrains forest succession in the Alps // *Alpine Botany*. 2014. Vol. 124, № 2. PP. 187–191. doi: 10.1007/s00035-014-0134-y

#### References

1. Anisimov O.A., Kokorev V.A. Modelirovanie moshchnosti sezonnotalogo sloya s uchetom izmeneniy klimata i rastitel'nosti: prognoz na seredinu XXI veka i analiz neopredelennostey [Russian permafrost in the 21st century: model-based projections and analysis of uncertainties]. *Kriosfera Zemli*. 2017;21(2):3-10. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(3-10). In Russian
2. Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G., Malkova G.V., Nyland K.E., Streletskiy D.A. Permafrost degradation in the western Russian arctic. *Environmental Research Letters*. 2020;15(4):045001. doi: 10.1088/1748-9326/ab6f12
3. Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D., Shiklomanov N., Pastukhov A., Novakovskiy A., Sadurtdinov M., Skvortsov A., Tsarev A., Pochikalov A., Malitsky S., Kraev G. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North. *Polar Geography*. 2021;44(3):203-216. doi: 10.1080/1088937X.2021.1981476
4. Fewster R.E., Morris P.J., Ivanovic R.F., Swindles G.T., Peregon A.M., Smith C.J. Imminent loss of climate space for permafrost peatlands in Europe and Western Siberia. *Nature Climate Change*. 2022;12(4):373-379. doi: 10.1038/s41558-022-01296-7
5. Wu Z., Dijkstra P., Koch G.W., Peñuelas J., Hungate B.A. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: A meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*. 2011;17(2):927-942. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02302
6. Huang M., Piao S., Janssens I.A., Zhu Z., Wang T., Wu D., Ciais P., Myneni R.B., Peaucelle M., Peng S. Velocity of change in vegetation productivity over northern high latitudes. *Nature ecology and evolution*. 2017;11(1):1649-1654. doi:10.1038/s41559-017-0328-y

7. Reichle LM, Epstein HE, Bhatt US, Raynolds MK, Walker DA. Spatial heterogeneity of the temporal dynamics of Arctic Tundra vegetation. *Geophysical Research Letters*. 2018;45(17):9206-9215. doi:10.1029/2018GL078820
8. Tishkov AA, Krenke Jr AN. "Poizelenenie" arktiki v XXI v. kak effekt sinergizma deystviya global'nogo potepleniya i khozyaystvennogo osvoeniya. ["Greening" of the arctic in the twenty-first century as a synergy effect of global warming and economic development]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2015;4(20):28-38. In Russian
9. Frost GV, Bhatt US, Epstein HE, Walker DA, Raynolds MK, Berner LT, Bjerke JW, Breen AL, Forbes BC, Goetz SJ. Tundra Greenness. *Arctic Report Card*. Phaffikon, Switzerland, 2019 doi: 10.25923/8n78-wp73
10. Berner LT, Massey R, Jantz P, Forbes BC, Macias-Fauria M, Myers-Smith I, Kumpula T, Gauthier G, Andreu-Hayles L, Gaglioti BV, Burns P, Zetterberg P, D'Arrigo R, Goetz SJ. Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome. *Nature Communications*. 2020;11(1):4621. doi:10.1038/s41467-020-18479-5
11. Myers-Smith IH, Kerby JT, Phoenix GK, Bjerke JW, Epstein HE, Assmann JJ, John C, Andreu-Hayles L, Angers-Blondin S, Beck PSA, Berner LT, Bhatt US, Bjorkman AD, Blok D, Bryn A, Christiansen CT, Cornelissen JHC, Cunliffe AM, Elmendorf SC, Forbes BC, Goetz SJ, Hollister RD, de Jong R, Loranty MM, Macias-Fauria M, Maseyk K, Normand S, Olofsson J, Parker TC, Parmentier F-JW, Post E, Schaepman-Strub G, Stordal F, Sullivan PF, Thomas HJD, Tømmervik H, Treharne R, Tweedie CE, Walker DA, Wilmking M, Wipf S. Complexity revealed in the greening of the Arctic. *Nature Climate Change*. 2020;10(2):106-117. doi:10.1038/s41558-019-0688-1
12. Lara MJ, Nitze I, Grosse G, Martin P, McGuire AD. Reduced Arctic tundra productivity linked with landform and climate change interactions. *Scientific reports*. 2018;8(1):1-10. doi:10.1038/s41598-018-20692-8
13. Loiko S, Klimova N, Kuzmina D, Pokrovsky O. Lake drainage in permafrost regions produces variable plant communities of high biomass and productivity. *Plants*. 2020;9(7):867. doi:10.3390/plants9070867
14. Walker DA, Leibman MO, Epstein HE, Forbes BC, Bhatt US, Raynolds MK, Comiso JC, Gubarkov AA, Khomutov AV, Jia GJ. Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index. *Environmental Research Letters*. 2009;4(4):045004. doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045004
15. Tape K, Sturm M, Racine C. The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic. *Global Change Biology*. 2006;12(4):686-702. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01128.x
16. Frost GV, Epstein HE, Walker DA, Matyshak G, Ermokhina K. Patterned-ground facilitates shrub expansion in Low Arctic tundra. *Environmental Research Letters*. 2013;8(1):015035. doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015035
17. Myers-Smith IH, Forbes BC, Wilmking M, Hallinger M, Lantz T, Blok D, Tape KD, Macias-Fauria M, Sass-Klaassen U, Lévesque E, Boudreau S, Ropars P, Hermanutz L, Trant A, Collier LS, Weijers S, Rozema J, Rayback SA, Schmidt NM, Sc-Strub G, Wipf S, Rixen C, Ménard CB, Venn S, Goetz S, Andreu-Hayles L, Elmendorf S, Ravolainen V, Welker J, Grogan P, Epstein HE, Hik DS. Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities. *Environmental Research Letters*. 2011;6(4): 045509. doi: 10.1088/1748-9326/6/4/045509
18. Vowles T, Björk RG. Implications of evergreen shrub expansion in the Arctic. *Journal of Ecology*. 2019;107(2):650-655. doi: 10.1111/1365-2745.13081
19. Chen Y, Hu FS, Lara MJ. Divergent shrub-cover responses driven by climate, wildfire, and permafrost interactions in Arctic tundra ecosystems. *Global change biology*. 2021;27(3):652-663 doi: 10.1111/gcb.15451
20. Mekonnen Z, Riley W, Berner L, Bouskill N, Torn M, Iwahana G, Breen A, Myers-Smith I, Criado M, Liu Y. Arctic tundra shrubification: A review of mechanisms and impacts on ecosystem carbon balance. *Environmental Research Letters*. 2021;16(5):053001. doi: 10.1088/1748-9326/abf28b

21. Tape KD, Hallinger M, Welker JM, Ruess, RW. Landscape Heterogeneity of Shrub Expansion in Arctic Alaska. *Ecosystems*. 2012;15(5):711-724. doi: 10.1007/s10021-012-9540-4
22. Liljedahl AK, Timling I, Frost GV, Daanen RP. Arctic riparian shrub expansion indicates a shift from streams gaining water to those that lose flow. *Communications Earth and Environment*. 2020;1(1):1-9. doi: 10.1038/s43247-020-00050-1
23. Ukraintseva N, Leibman, M, Streletskaya I, Mikhaylova T. Study of Plant-Soil-Permafrost System on Landslide-Affected Slopes Using Geochemical Methods on Yamal, Russia. *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. Sassa K, P. Canuti YY editors Cham: Springer International Publishing, 2014. pp. 523-528
24. Verdonen M, Berner LT, Forbes BC, Kumpula T. Periglacial vegetation dynamics in Arctic Russia: decadal analysis of tundra regeneration on landslides with time series satellite imagery. *Environmental research letters*. 2020;15(10):105020. doi: 10.1088/1748-9326/abb500
25. Tyrtikov AP. Dinamika rastitel'nogo pokrova i razvitiye vechnoy merzloty v prirode [Dynamics of vegetation cover and development of permafrost in Western Siberia]. Moscow: Moscow State University Publ.; 1974. 199 p. In Russian
26. Rhoades C, Oskarsson H, Binkley D, Stottlemeyer B. Alder (*Alnus crispa*) effects on soils in ecosystems of the Agashashok River valley, northwest Alaska. *Ecoscience*. 2001;8(1):89-95. doi: 10.1080/11956860.2001.11682634
27. Kropp H, Loranty MM, Natali SM, Kholodov AL, Rocha AV, Myers-Smith I, Abbot BW, Abermann J, Blanc-Betes E, Blok D. Shallow soils are warmer under trees and tall shrubs across Arctic and Boreal ecosystems. *Environmental research letters*. 2020;16(1):015001. doi: 10.1088/1748-9326/abc994
28. Frost GV, Epstein HE, Walker DA, Matyshak G, Ermokhina K. Seasonal and Long-Term Changes to Active-Layer Temperatures after Tall Shrubland Expansion and Succession in Arctic Tundra. *Ecosystems* 2018;21(3):507-520. doi: 10.1007/s10021-017-0165-5
29. Marsh P, Bartlett P, MacKay M, Pohl S, Lantz T. Snowmelt energetics at a shrub tundra site in the western Canadian Arctic. *Hydrological Processes*. 2010;24(25):3603-3620. doi: 10.1002/hyp.7786
30. Heijmans MMPD, Magnusson RI, Lara MJ, Frost GV, Myers-Smith IH, van Huissteden J, Jorgenson MT, Fedorov AN, Epstein HE, Lawrence DM, Limpens J. Tundra vegetation change and impacts on permafrost. *Nature Reviews Earth and Environment*. 2022;3(1):68-84. doi: 10.1038/s43017-021-00233-0
31. Smith SL, O'Neill HB, Isaksen K, Noetzli J, Romanovsky VE. The changing thermal state of permafrost. *Nature Reviews Earth and Environment*. 2022;3(1):10-23. doi: 10.1038/s43017-021-00240-1
32. Bonfils CJW, Phillips TJ, Lawrence DM, Cameron-Smith P, Riley WJ, Subin ZM. On the influence of shrub height and expansion on northern high latitude climate. *Environmental Research Letters*. 2012;7(1):015503.
33. Loranty MM, Goetz SJ. Shrub expansion and climate feedbacks in Arctic tundra. *Environmental Research Letters*. 2012;7(1):011005. doi: 10.1088/1748-9326/7/1/011005
34. Liu Y, Riley WJ, Keenan TF, Mekonnen ZA, Holm JA, Zhu Q, Torn MS. Dispersal and fire limit Arctic shrub expansion. *Nature communications*. 2022;13(1):1-10. doi: 10.1038/s41467-022-31597-6
35. Villani M, Mauclet E, Agnan Y, Druel A, Jasinski B, Taylor M, Schuur EAG, Opfergelt S. Mineral element recycling in topsoil following permafrost degradation and a vegetation shift in sub-Arctic tundra. *Geoderma*. 2022;421:115915. doi: 10.1016/j.geoderma.2022.115915
36. Zaidelman F.R. Teoriya obrazovaniya svetlykh kislykh elyuvial'nykh gorizontov pochv i yeye prikladnyye aspekty [The theory of formation of light acidic eluvial soil horizons and its applied aspects]. M.: KRASAND, 2010. 248 p. In Russian
37. Belobrov VP, Zamotaev IV. Evolution of the soil cover of soccer fields. *Eurasian Soil Science*. 2014;47(4):245-254. doi: 10.1134/S1064229314040012
38. Targul'yan VO, Goryachkin SV. Pamyat' pochv: pochva kak pamyat' biosferno-geosferno-antroposfernykh vzaimodeystviy [Soil memory: soil as a memory of biosphere-geosphere-anthroposphere interactions]. Moscow: LKI Publ., 2008. 692 p. In Russian

39. Gerasimova MI, Bronnikova MA, Khitrov NB, Shorkunov IG. Opyt ierarkhicheskogo morfogeneticheskogo analiza Kurskogo chernozema [Hierarchical morphogenetic analysis of kursk chernozem]. In: *Morfologiya pochv: ot makro- do submikrourovnya*. Materialy nauch. konf. (Moscow, Russia, 19-21 December, 2016). Moscow: Moscow Publ.; 2016. pp 85-100. In Russian
40. Targulian VO, Bronnikova MA. Soil Memory: Theoretical Basics of the Concept, Its Current State, and Prospects for Development. *Eurasian Soil Science*. 2019;3(52):259-275. doi:10.1134/S1064229319030116
41. Loyko SV, Geras'ko LI, Kulizhskiy SP. Gruppyrovka nositeley pochvennoy pamyati (na primere severnoy chasti areala chernykh sistem) [Grouping of soil memory carriers (on the example of the northern part of the area of black systems)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya - Tomsk State University Journal of Biology*. 2011;3(15):38-49. In Russian
42. Loiko SV, Bobrovsky MV, Novokreshchennyk TA. Indications of windfall morphogenesis in soils in the blackish taiga (by the example of the interfluvium between the Tom' and the Yaysk rivers) // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya - Tomsk State University Journal of Biology*. 2013;4(24):20-35. doi: 10.17223/19988591/24/2
43. Loiko SV, Geras'ko LI, Kulizhskii SP, Istigechev GI, Amelin II. Soil cover patterns in the northern part of the area of aspen-fir taiga in the southeast of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2015;48:359-372. doi: 10.1134/S1064229315040067
44. 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
45. 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
46. 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
47. Urusevskaya IS, Alyabina IO, Vinyukova VP, Vostokova LB, Dorofeeva EI, Shoba SA, Shchepikhina LS. Karta pochvenno-ekologicheskogo rayonirovaniya Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:2500000 [The map of soil-ecological zoning of the Russian Federation. Scale 1:2500000]. Dobrovolskiy GV and Urusevskaya IS, editors. Moscow: "Talka+" Publ.; 2013
48. Slagoda EA, Novoselov AA, Koroleva ES, Kuznetsova AO, Butakov VI, Tikhonravova YaV, Zazovskaya EP. Sledy kriogennykh protsessov v pozdneneopleystotsenovykh otlozheniyakh Pur-Tazovskogo mezhdurech'ya Zapadnoy Sibiri [Traces of cryogenic processes in the Late Pleistocene sediments of the Pur-Taz interfluvium (West Siberia)]. *Kriosfera Zemli*. 2022;26(1):21-35. doi: 10.15372/KZ20220103. In Russian
49. Zarov EA, Golubyatnikov LL, Lapshina ED, Loyko SV. Vegetation and Soils of Tundra Landscapes in the Pur-Taz Interfluvial Region. *Biology Bulletin*. 2021;48:118-127. doi:10.1134/S1062359022010186
50. Mekonnen ZA, Riley WJ, Grant RF, Salmon VG, Iversen CM, Biraud SC, Breen AL, Lara MJ. Topographical controls on hillslope-scale hydrology drive shrub distributions on the Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021;126(2):e2020JG005823. doi: 10.1029/2020JG005823
51. Vodyanitskii YN, Kirillova NP. Application of the CIE-L\*a\*b\* system to characterize soil color. *Eurasian Soil Science*. 2016;49:1259-1268. doi:10.1134/S1064229316110107
52. Shishov LL, Tonkonogov VD, Lebedeva II, Gerasimova MI. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Russian Soil Classification System]. Smolensk: Oikumena Publ.; 2004. 342 p. In Russian

53. Polevoy opredelitel' pochv Rossii [Field guide of soils of Russia]. Moscow: Soil Institute named V.V. Dokuchaev; 2008. 182 p. In Russian
54. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Report No. 106. FAO, Rome, 2015. 192 p.
55. Goryachkin SV. Pochvennyy pokrov Severa (struktura, genezis, ekologiya, evolyutsiya) [Soil cover of the North (structure, genesis, ecology, evolution)]. Moscow: GEOS, 2010. 414 p. In Russian
56. Gerber AA, Loiko SV, Istigeev GI, Lim AG. Uglerod v gleyezemakh i kriozemakh yuzhnoy tundry Zapadnoy Sibiri [Carbon in gleezems and cryozems of the southern tundra of Western Siberia] // In: *Pochvenno-ekologicheskiye protsessy v yestestvennykh i antropogenno-preobrazovannykh landshaftakh Sibiri i Dal'nego Vostoka*. Materialy nauch. konf. [III All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists (Krasnoyarsk, Russia, 25-27 April, 2018)]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Publ., 2018. pp. 33-37. In Russian
57. Ananko TV, Konyushkov DE. Pochvennyy pokrov severa Sredney Sibiri na pochvennoy karte RSFSR (1988) i na listakh gosudarstvennoy pochvennoy karty [Soil cover of the north of central Siberia as displayed on the soil map of the Russian federation (1988) and on the state soil map]. *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 2015;(81):45-70. In Russian
58. Gubin SV, Lupachev AV. Soils of loamy watersheds of coastal tundra in the north of Yakutia: Pedogenetic conditions and processes. *Eurasian Soil Science*. 2017;50(2):133-141. doi: 10.1134/S1064229317020041
59. Gentsch N, Mikutta R, Alves RJE, Barta J, Capek P, Gittel A, Hugelius G, Kuhry P, Lashchinskiy N, Palmtag J, Richter A, Šantrucková H, Schnecker J, Shibistova O, Urich T, Wild B, Guggenberger G. Storage and transformation of organic matter fractions in cryoturbated permafrost soils across the Siberian Arctic. *Biogeosciences*. 2015;12(14):4525-4542. doi: 10.5194/bg-12-4525-2015
60. Heim RJ, Bucharova A, Brodt L, Kamp J, Rieker D, Soromotin AV, Yurtaev A, Hölzel N. Post-fire vegetation succession in the Siberian subarctic tundra over 45 years. *Science of The Total Environment*. 2021;(760):143425. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143425
61. Teufel B, Sushama L. Abrupt changes across the Arctic permafrost region endanger northern development. *Nature Climate Change*. 2019;9(11):858-862. doi: 10.1038/s41558-019-0614-6
62. O'Neil, HB, Burn CR, Allard M, Arenson LU, Bunn MI, Connon RF, Kokelj SA, Kokelj SV, LeBlanc AM, Morse PD, Smith SL. Permafrost thaw and northern development. *Nature Climate Change*. 2020;10(8):722-723. doi: 10.1038/s41558-020-0862-5
63. Hantimer IS. Sel'skokhozyaystvennoye osvoyeniye tundry [Agricultural development of the tundra]. Leningrad: Nauka; 1974. 226 p. In Russian
64. Tyrtikov AP. Dinamika rastitel'nogo pokrova i razvitiye merzlotnykh form rel'yefa [Dynamics of vegetation cover and development of permafrost relief forms]. Moscow: Nauka Publ.; 1979. 116 p. In Russian
65. Salmon VG, Breen AL, Kumar J, Lara MJ, Thornton PE, Wullschleger SD, Iversen CM. Alder Distribution and Expansion Across a Tundra Hillslope: Implications for Local N Cycling. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:1099. doi: 10.3389/fpls.2019.01099
66. Ramm E, Liu C, Mueller CW, Gschwendtner SS, Yue H, Wang X, Bachmann J, Bohnhoff JA, Ostler U, Schlöter M, Rennenberg H, Dannenmann M. Alder-induced stimulation of soil gross nitrogen turnover in a permafrost-affected peatland of Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*. 2020;172:108757. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108757
67. McCaully RE, Arendt CA, Newman BD, Salmon, VG, Heikoop JM, Wilson CJ, Sevanto S, Wales NA, Perkins GB, Marina OC, Wullschleger SD. High nitrate variability on an Alaskan permafrost hillslope dominated by alder shrubs. *The Cryosphere*. 2022;16(5):1889-1901. doi: 10.5194/tc-16-1889-2022

68. Phillips CA, Wurzburger N. Elevated rates of heterotrophic respiration in shrub-conditioned arctic tundra soils. *Pedobiologia*. 2019;72:8-15. doi: 10.1016/j.pedobi.2018.11.002
69. Shi FX, Chen HM, Wang XW, Mao R. Alder encroachment alters subsoil organic carbon pool and chemical structure in a boreal peatland of Northeast China. *Science of The Total Environment*. 2022;850:157849. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157849
70. Parker TC, Thurston AM, Raundrup K, Subke JA, Wookey PA, Hartley IP. Shrub expansion in the Arctic may induce large-scale carbon losses due to changes in plant-soil interactions. *Plant and Soil*. 2021;463(1):643-651. doi: 10.1007/s11104-021-04919-8
71. Alekseev I, Abakumov E. Soil organic carbon stocks and stability of organic matter in permafrost-affected soils of Yamal region, Russian Arctic. *Geoderma Regional*. 2022;28:e00454. doi: 10.1016/j.geodrs.2021.e00454
72. Arendt CA, Heikoop JM, Newman BD, Wilson CJ, Wainwright H, Kumar J, Andersen CG, Wales NA, Dafflon B, Cherry J, Wulfschlegler SD. Increased Arctic NO<sup>3-</sup> Availability as a Hydrogeomorphic Consequence of Permafrost Degradation and Landscape Drying. *Nitrogen*. 2022;3(2):314-332. doi: 10.3390/nitrogen3020021
73. Pastukhov A.V. Micromorphological structure of permafrost-affected and seasonally long-term freezing loamy soils of the European northeast. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN*. 2012;4(12):30-39. In Russian
74. Kulizhsky SP, Loiko SV, Gerber AA. Zakonomernosti rasprostraneniya pochv v drenirovannoy lesotundre Zapadnoy Sibiri (pravoberezhnaya chast' basseyna v srednem techenii r. Pur) [Patterns of soil distribution in the drained forest tundra of Western Siberia (the right-bank part of the basin in the middle reaches of the Pur River)]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017;11(211):93-97. In Russian
75. Startsev VV, Zhangurov EV, Dymov AA. Kharakteristika pochv vysotnykh pojasov khrebtva Yaptiknyrd (Pripolyarnyy Ural) [Characteristics of soils in altitudinal belts of the Yaptiknyrd ridge (Subpolar Urals)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2017;38:6-27. doi: 10.17223/19988591/38/1. In Russian
76. Tishkov AA, Belonovskaya EA, Vaysfel'd MA, Glazov PM, Lappo EG, Morozova OV, Pokrovskaya IV, Tertitsky GM, Titova S. V., Tsarevskaya N. G. Regional'nyye biogeograficheskiye efekty "bystrykh" izmeneniy klimata v Rossiyskoy Arktike v XXI v. [Regional biogeographic effects of "fast" climate changes in the Russian Arctic in the 21st century]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2020;2(38):31-45. doi: 10.25283/2223-4594-2020-2-31-45. In Russian
77. Frost GV, Epstein HE. Tall shrub and tree expansion in Siberian tundra ecotones since the 1960s. *Global Change Biology*. 2014;20(4):1264-1277. doi: 10.1111/gcb.12406
78. Hiltbrunner E, Aerts R, Bühlmann T, Huss-Danell K, Magnusson B, Myrold DD, Reed SC, Sigurdsson BD, Körner C. Ecological consequences of the expansion of N<sub>2</sub>-fixing plants in cold biomes. *Oecologia*. 2014;176(1):11-24. doi: 10.1007/s00442-014-2991-x
79. Bühlmann, T, Hiltbrunner E, Körner C. *Alnus viridis* expansion contributes to excess reactive nitrogen release, reduces biodiversity and constrains forest succession in the Alps. *Alpine Botany*. 2014;124(2):187-191doi: 10.1007/s00035-014-0134-y

**Информация об авторах:**

**Лойко Сергей Васильевич** – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории БиоГеоКлим Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия).

E-mail: s.loyko@yandex.ru

**Кузьмина Дарья Михайловна** – инженер-исследователь лаборатории БиоГеоКлим Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия).

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

**Истигечев Георгий Игоревич** – мл. науч. сотр. лаборатории БиоГеоКлим Биологического института Томского государственного университета (г. Томск, Россия).

E-mail: istigechev.g@yandex.ru

**Крицков Иван Викторович** – мл. науч. сотр. лаборатории БиоГеоКлим Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия).

E-mail: krickov\_ivan@mail.ru

**Лим Артём Георгиевич** – мл. науч. сотр. лаборатории БиоГеоКлим Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия).

E-mail: lim\_artiom@mail.ru

**Климова Нина Владимировна** – мл. науч. сотр. лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Томск, Россия).

E-mail: ninmilk@yandex.ru

**Новоселов Андрей Андреевич** – мл. науч. сотр. Института экологической и сельскохозяйственной биологии (X-BIO) Тюменского государственного университета (Тюмень, Россия).

E-mail: mr.andreygeo@mail.ru

**Константинов Александр Олегович** – науч. сотр. Института экологической и сельскохозяйственной биологии (X-BIO) Тюменского государственного университета (Тюмень, Россия).

E-mail: konstantinov.alexandr72@gmail.com

**Новолодская Эльвира Владимировна** – инженер-исследователь лаборатории БиоГеоКлим Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия).

E-mail: novolodskaya.elvira.tsu@gmail.com

**Кулижский Сергей Павлович** – д-р биол. наук., зав. каф. почвоведения и экологии почв Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия).

E-mail: kulizhskiy@yandex.ru

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

***Information about the authors:***

**Sergey V. Loiko**, Ph.D., Senior Researcher of the BioGeoClim Laboratory of the Biological Institute, Tomsk State University (Tomsk, Russia).

E-mail: s.loiko@yandex.ru

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

**Daria M. Kuzmina**, research engineer of the BioGeoClim Laboratory of the Biological Institute, Tomsk State University (Tomsk, Russia).

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

**Georgy I. Istigechev**, junior researcher of the BioGeoClim Laboratory of the Biological Institute, Tomsk State University (Tomsk, Russia).

E-mail: istigechev.g@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8387-5341>

**Ivan V. Kritskov**, junior researcher of the BioGeoClim Laboratory of the Biological Institute, Tomsk State University (Tomsk, Russia).

E-mail: krickov\_ivan@mail.ru

**Artyom G. Lim**, junior researcher of the BioGeoClim Laboratory of the Biological Institute, Tomsk State University (Tomsk, Russia).

E-mail: lim\_artiom@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0165-4754>

**Nina V. Klimova**, junior researcher of the laboratory for monitoring forest ecosystems of the Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia).

E-mail: ninmilk@yandex.ru

**Andrey A. Novoselov**, junior researcher of the Institute of Ecological and Agricultural Biology (X-BIO), Tyumen State University (Tyumen, Russia).

E-mail: mr.andreygeo@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8589-2316>

**Alexander O. Konstantinov**, researcher of the Institute of Ecological and Agricultural Biology (X-BIO), Tyumen State University (Tyumen, Russia).

E-mail: konstantinov.alexandr72@gmail.com

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

**Elvira V. Novolodskaya**, Research Engineer of the BioGeoClim Laboratory of the Biological Institute, Tomsk State University (Tomsk, Russia).

E-mail: novolodskaya.elvira.tsu@gmail.com

**Sergey P. Kulizhsky**, Doctor of Biol. sci., head of the Department of Soil Science and Soil Ecology of the Biological Institute of Tomsk State University (Tomsk, Russia).

E-mail: kulizhskiy@yandex.ru

*The Authors declare no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 19.09.2022;  
одобрена после рецензирования 14.10.2022; принята к публикации 29.12.2022.*

*The article was submitted 19.09.2022;  
approved after reviewing 14.10.2022; accepted for publication 29.12.2022.*