

ЛАНДШАФТНО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ ВАЛОВОГО И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД МЕРЗЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЯКУТИИ

А. Г. Шепелев^{1*}, А. М. Черепанова¹, Т. Х. Максимов²

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,

г. Якутск, Российская Федерация

²Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН – обособленное подразделение

ФГБУН ФИЦ «ЯНИЦ СО РАН»,

г. Якутск, Российская Федерация

*carbon-shag@yandex.ru

Аннотация. Валовой и гранулометрический состав почвообразующих пород является фундаментальной характеристикой, определяющей генезис, физико-химические свойства и экологическое состояние почв криолитозоны, однако для обширной и слабоизученной территории Якутии систематические сравнительные исследования в широтном поясе остаются крайне ограниченными. Цель работы состояла в анализе валового и гранулометрического состава почвообразующих пород в трех репрезентативных ландшафтах Якутии, различающихся по природно-климатическим условиям: лесные стационары «Спасская падь» (Центральная Якутия), «Эльгээйи» (Юго-Восточная Якутия) и тундровый полигон «Чокурдах» (Северо-Восточная Якутия). Для получения данных применены рентгенофлуоресцентный анализ валового химического состава, методика определения гранулометрического состава пород и современные методы химического анализа. Установлено, что почвообразующие породы закономерно изменяются в ряду от супесчаных аллювиальных отложений тундры с преобладанием фракции 0,05–0,01 мм («Чокурдах») до песчано-суглинистых карбонатных отложений ледового комплекса («Спасская падь») к однородным элювиально-делювиальным суглинкам с максимальным содержанием физической глины («Эльгээйи»). Валовой химический состав отражает кварц-полевошпатовый минералогический профиль, при этом отложения «Спасской пади» характеризуются карбонатностью с высоким содержанием CaO (до 20,03 %) и Sr (до 519 мг/кг), «Эльгээйи» – повышенными концентрациями Fe₂O₃ (до 6,10 %) и TiO₂ (до 0,91 %), а «Чокурдах» – максимальным содержанием Zr (до 656 мг/кг), что связано с присутствием акцессорных минералов в аллювиальных отложениях. Выявленные различия коррелируют с условиями криогенеза, мощностью сезонноталого слоя (от 24 до 106 см), содержанием органического углерода (от 1,15 до 46,8 %) и типом почв. Полученные результаты обосновывают необходимость дифференцированного подхода при оценке почвенных ресурсов, моделировании углеродных пулов и служат основой для усовершенствования региональной классификации почв.

Ключевые слова: криолитозона, мерзлотные ландшафты, почвообразующие породы, состав и свойства.

Финансирование:

1. Эволюция и устойчивость мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири (рег. № 126020516688-9);
2. История развития и современная динамика континентальной и шельфовой криолитозоны Сибири и Арктики (рег. № 126020516709-1);
3. Физиолого-биохимические основы устойчивости и адаптации растений репрезентативных экосистем криолитозоны в изменяющемся климате (рег. № 126021217284-2);
4. Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах (рег. № 123030300031-6).

Для цитирования: Шепелев А.Г., Черепанова А.М., Максимов Т.Т. Ландшафтно-генетическая обусловленность валового и гранулометрического состава почвообразующих пород мерзлотных экосистем Якутии. *Вестник СВФУ*. 2026;(3): 99-112. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-99-112

Original article

LANDSCAPE-GENETIC CONDITIONALITY OF GROSS AND PARTICLE SIZE DISTRIBUTION IN PERMAFROST PARENT MATERIALS OF YAKUTIA

Andrei G. Shepelev^{1}, Aleksandra M. Cherepanova¹, Trofim Kh. Maximov²*

¹P.I. Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation

²Institute for Biological Problems of the Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation

*carbon-shag@yandex.ru

Abstract. The gross and particle size distribution (PSD) of parent materials is a fundamental characteristic determining genesis, physical, chemical properties, and ecological status of permafrost. Systematic comparative studies across the latitudinal belt remain extremely limited in Yakutia. The aim of this study was to analyze the gross and PSD of parent materials in three different landscapes: Spasskaya Pad (Central Yakutia), Elgeei (Southeastern Yakutia), and Chokurdakh tundra site (Northeastern Yakutia). The methods of PSD and X-ray fluorescence analyzes of gross chemical composition were methodological basis. It has been established that the soil-forming rocks change in series from sandy loam alluvial deposits of tundra with of 0.05–0.01 mm fraction (Chokurdakh) through sandy-loamy carbonate deposits of Ice complex (Spasskaya Pad) to homogeneous eluvial-deluvial loams with maximum content of physical clay (Elgeei). The gross chemical composition reflects quartz-feldspar mineralogical profile, with Spasskaya Pad rocks being characterized by carbonate content with high CaO (up to 20.03 %) and Sr (up to 519 µg/g) contents; Elgeei rocks by elevated Fe₂O₃ (up to 6.10 %) and TiO₂ (up to 0.91 %) concentrations; and Chokurdakh by maximum Zr content (up to 656 µg/g), which is associated with the presence of accessory minerals in alluvial deposits. The identified differences correlate with cryogenesis, the thickness of the seasonally thawed layer (from 24 to 106 cm), organic carbon content (from 1.15 to 46.8 %), and the soil type. The results substantiate the need for an approach to assessing soil resources, modeling carbon pools and can serve as a basis for improving regional classification systems.

Keywords: cryolithozone, permafrost landscapes, parent materials, composition and properties

Funding:

1. Evolution and stability of permafrost landscapes in Eastern Siberia (Registration number: 126020516688-9);
2. History of development and modern dynamics of the continental and shelf cryolithozone of Siberia and the Arctic (reg. No. 126020516709-1);
3. Physiological and biochemical foundation of plant resistance and adaptation in representative ecosystems of cryolithozone in a changing climate (Registration number: 126021217284-2);
4. Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems (Registration number: 123030300031-6).

For citation: Shepelev A.G., Cherepanova A.M., Maximov T. Kh. Landscape-genetic determination of the gross and granulometric composition of soil-forming rocks of permafrost ecosystems of Yakutia. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(3): 5-10. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-5-10

Введение

Исследования валового и гранулометрического состава, биогенных элементов почв и почвообразующих пород являются основополагающими для понимания генезиса, свойств и эко-

логического состояния почвенного покрова криолитозоны, которые регулируют многие физико-химические свойства почв, включая водно-воздушный режим и емкость катионного обмена. Для территории Якутии, характеризующейся резко континентальным климатом и повсеместным распространением многолетнемёрзлых пород, эти исследования приобретают актуальное значение. Холодный климат с самой продолжительной в Северном полушарии зимой и годовыми амплитудами температур до 70–100°C создает уникальные условия почвообразования [1]. В мерзлотных почвах процессы физического выветривания, оглеения, криотурбации, накопления гумуса и аккумуляции продуктов почвообразования на мёрзлом основании остаются ведущими, тогда как процессы внутрипрофильного перераспределения веществ выражены слабо или вовсе отсутствуют [2, 3].

Современные исследования подчеркивают ключевую роль валового химического и минералогического состава [4] почвообразующих пород в формировании органоминеральных связей и стабилизации органического углерода в криогенных экосистемах. Особое значение минеральный состав приобретает в контексте сохранности органического углерода в условиях потепления климата. В почвах криолитозоны значительная часть органического углерода защищена от микробной деструкции благодаря физико-химическим процессам в минерал-органических ассоциациях. В криотурбированных криоземах Сибирской Арктики до 55 % общего органического углерода в метровом слое ассоциировано с минеральной фазой, причем значительная доля этого углерода сосредоточена в криотурбированных горизонтах и верхней части многолетней мерзлоты [5].

Ключевую роль в стабильности органического углерода играют минеральные образования, прежде всего оксиды, гидроксиды железа и алюминия, а также глинистые минералы. Связывание органического углерода с минеральными фазами Al и Fe наиболее выражено в кислых почвах, характерных для молодых ландшафтов Арктики [6]. В многолетнемёрзлых торфяниках концентрация металл-связанного органического углерода в анаэробных условиях в 4 раза выше, чем в немёрзлых торфяниках, что обусловлено сохранением минералов железа и преобладанием медленнорастущих микроорганизмов, продуцирующих органическое вещество [7].

Интерес представляет органический углерод в межслоевом пространстве набухающих глинистых минералов. На примере почв о. Шпицбергена показано, что от 10 до 15 % органического углерода и от 30 до 45 % общего азота илстой фракции внедрены в межслоевые промежутки смектитов и смешанослойных минералов [8]. Данная фракция органического вещества характеризуется высокой устойчивостью к химическому и термическому окислению, что делает ее важным резервуаром стабильного углерода в криогенных почвах [8]. Кроме того, установлен механизм стабилизации органического углерода в арктических мерзлотных почвах, связанный с активностью пероксидаз, продуцируемых преимущественно грибами. Пероксидазная активность тесно коррелирует с содержанием минерал-связанного органического углерода, а также с изотопными характеристиками углерода ($\delta^{14}\text{C}$ и $\delta^{13}\text{C}$), что свидетельствует о ее высокой прогностической способности в отношении сохранности углерода в мерзлотных экосистемах [9]. Окислительные ферменты, стабилизированные минералами, участвуют не только в деградации органического вещества, но и способны его сохранять через образование устойчивых органо-минеральных комплексов.

Минеральные образования почвообразующих пород выполняют двойную функцию в углеродном цикле криолитозоны. С одной стороны, они способствуют стабилизации и аккумуляции органического углерода через образование органоминеральных ассоциаций. С другой – при деградации мерзлоты и изменении гидрологических условий защищенный пул углерода становится источником парниковых газов, что подчеркивает необходимость учета минералогических признаков при прогнозировании углеродного баланса мерзлотных экосистем [10].

Цель работы – выявить ландшафтно-генетические закономерности распределения макро- и микроэлементов, гранулометрических фракций и их взаимосвязи с содержанием углерода и

азота на основе анализа валового химического и гранулометрического состава почвообразующих пород.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены на трех постоянно действующих научных стационарах, расположенных в различных природно-климатических зонах Якутии, принадлежащих Институту биологических проблем криолитозоны СО РАН (рис. 1).

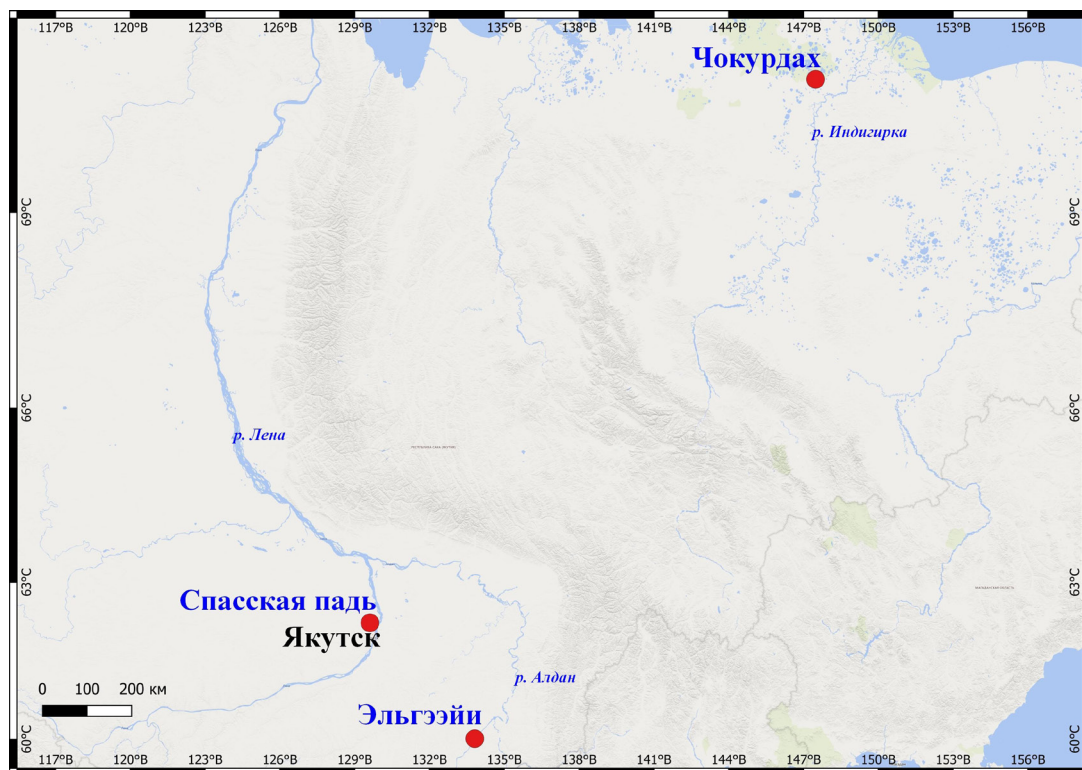


Рис. 1. Расположение репрезентативных ландшафтов Якутии

Fig. 1. Location of representative landscapes of Yakutia

Среднепродуктивная лесная научная станция «Спаская падь» (Центральная Якутия, 62°14'50" с.ш., 129°37'14" в.д.) – лесная научная станция в 24 км к северо-западу от г. Якутска. Полигон относится к Северо-восточносибирской тайге, Центральноякутскому экорегиону. Климат умеренно-теплый, засушливый. Сумма активных температур 1400–1500°C, коэффициент увлажнения <0,20 [11]. Почвообразующие породы представлены песчано-суглинистыми карбонатными отложениями [12]. Почвенный покров – дерново-палевые осолоделые грубогумусированные почвы [1]. Согласно «Классификации и диагностике почв России», данные почвы относятся к отделу палево-метаморфических почв ствола постлитогенных почв [13]. Диагностическим признаком для отдела является палево-метаморфический горизонт BPL, представляющий собой срединный горизонт палевой или буровато-палевой окраски, формирующийся в условиях холодного континентального климата при близком залегании многолетней мерзлоты [14]. Наличие в профиле серогумусового горизонта AY позволяет диагностировать тип дерново-палевых почв [1, 12]. По классификации Мировой реферативной базы почвенных ресурсов (WRB) данные почвы относятся к Cambic Cryosols.

Высокопродуктивная лесная научная станция «Эльгээйи» (Юго-Восточная Якутия, 60°00'48" с.ш., 133°49'11" в.д.) – лесная научная станция в 60 км южнее п. Усть-Мая. Климат умеренно-теплый, слабозасушливый, коэффициент увлажнения 0,20–0,30 [11]. Почвообразующие породы – элювиально-делювиальные суглинистые карбонатные отложения на коренных породах [12]. Здесь развиты дерново-палевые типичные почвы с профилем AY–BPL–BCa–Cca [1, 12] (по WRB – Cambic Cryosols). В отличие от «Спасской пади», почвы «Эльгээйи» характеризуются более мощным гумусовым горизонтом и отсутствием признаков осолодения [11].

Тундровая научная станция «Чокурдах» (Северо-Восточная Якутия, 70°49'41" с.ш., 147°29'23" в.д.) – тундровая научная станция находится в 30 км севернее пгт Чокурдах. Относится к экорегиону Северо-восточносибирской прибрежной тундры, Лено-Колымскому биому. Почвообразующие породы супесчаные [1]. Преобладающий тип почв – перегнойно-торфяно-глееземы (WRB – Gleysols) с профилем O–T–G₁ и близким залеганием многолетней мерзлоты [15]. Принадлежат к отделу глеевых почв ствола постлитогенных почв, для которых характерно наличие глеевого горизонта G [13]. Торфяной горизонт T диагностируется как органо-генный горизонт, состоящий из слаборазложившихся растительных остатков.

Основные физико-химические анализы проводились в Почвенном институте им. В.В. Докучаева. Водородный показатель pH водной вытяжки в почвенных образцах анализировался потенциометрически в суспензии почва/вода из соотношения для проб органо-генных горизонтов 1:25 и минеральных горизонтов – 1:2,5. Определение карбонатов в минеральных горизонтах почв по Ф.И. Козловскому. Определение содержания неорганического (TIC) и органического (TOC) углерода на элементном анализаторе Leco RC612 (Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН), а содержание общего азота (N_{общ}) на анализаторе ECS 8022. Гранулометрический состав определялся методом пипетки по Н.А. Качинскому. Валовой состав почвообразующих пород – рентгенофлуоресцентным анализом с предварительной пробоподготовкой.

Статистическая обработка данных проведена в Microsoft Excel и включала расчет среднего арифметического (M), стандартного отклонения (SD), коэффициента вариации (CV, %) для каждой группы образцов по полигонам.

Результаты

Оценка почвенных разрезов выявила закономерную смену типов почвообразования в соответствии с широтной зональностью и климатическими условиями (табл. 1). Стационар «Спасская падь» характеризуется развитием палевых осолоделых почв на песчано-суглинистых карбонатных отложениях. Почвенные разрезы вскрывают профиль мощностью до 90–106 см с разделением на органо-генный (OFH, AO) и минеральный горизонты (BPL, BC, C). Цвет минеральных горизонтов варьирует от 5Y 4/1 до 2.5Y 4/2, что указывает на различную степень ожелезнения и гумусированности. Многолетняя мерзлота вскрывается на глубине 90–106 см. Согласно исследованиям [11, 12], палевые осолоделые почвы характеризуются значениями кислотности в слабокислом диапазоне в верхних горизонтах и щелочном в нижних, низким содержанием углерода в минеральных горизонтах и высокой долей слабо-разложившегося органического вещества в органо-генных. Профильная дифференциация глинистых минералов в криогенных почвах выражена слабо из-за криогенной гомогенизации, однако выветривание минералов в палевых почвах Центральной Якутии является более значительным, чем считалось ранее [1].

Таблица 1

Физико-химическая характеристика почв

Table 1

Physical and chemical characteristics of soils

Горизонт	Глубина, см	Цвет по шкале Манселла	Механический состав	pH _{Н2О}	CO ₂ карбонатов, %	TIC	TOC	Нобщ
						%		
Спасская падь								
OF	0,0-1,5	10 YR 7/6	неразложившиеся орг. остатки	5,30	—	—	14,40	1,05
ОНao	1,5-6,0	2.5 Y 4/1	слаборазложившиеся орг. остатки	5,90	—	—	12,90	0,38
BPL	6,0-51,0	5Y 4/1	песчаный и супесчаный	4,40	—	0,03	0,65	0,08
BC	51,0-93,0	2.5Y 6/3	песчаный и супесчаный	8,00	1,58	0,02	0,23	0,01
C	93,0-100,0	2.5Y 4/2	легко- и среднесуглинистый	7,30	отсутствуют	0,01	0,03	0,12
Эльгээйи								
OF	0,0-4,0	2.5 Y 6/1	неразложившиеся орг. остатки	5,70	—	—	23,21	0,83
ОНao	4,0-11,0	5 Y 5/3	слаборазложившиеся орг. остатки	5,10	—	—	19,97	0,91
АН	11,0-40,0	5 Y 5/1	слаборазложившиеся орг. остатки	6,30	—	—	5,13	0,25
BPL	40,0-70,0	5Y 6/3	от песчаного и супесчаного до легко- и среднесуглинистого	8,70	3,04	0,12	0,76	0,04
BC	70,0-85,0	5Y 6/4	от песчаного и супесчаного до легко- и среднесуглинистого	8,50	3,22	0,59	0,51	0,04
C⊥	85,0-104,0	5Y 6/3	легко- и среднесуглинистый	6,80	2,65	0,48	0,31	0,03
Чокурдах								
O	0,0-3,0	10YR 4/3	неразложившиеся орг. остатки	5,20	—	—	39,62	0,78
T	3,0-20,0	10YR 4/3	полуразложившиеся орг. остатки	5,20	—	—	12,74	1,84
GC⊥	20.0-29	10Y 5/1	песчаный и супесчаный	6,00	—	0,16	1,15	0,11

Примечание. TIC – общий неорганический углерод, TOC – общий органический углерод, Нобщ – общий азот, прочерк – не определяли.

Стационар «Эльгээйи» представлен дерново-палевыми типичными почвами на элювиально-делювиальных суглинистых карбонатных отложениях. Характерно наличие хорошо выраженного гумусово-аккумулятивного горизонта АН мощностью 29 см.

Стационар «Чокурдах» отличается формированием перегнойно-торфяно-глееземов на супесчаных отложениях. Мощность мерзлотного слоя минимальна (24–41 см) и вскрывается во всех разрезах. Торфяной горизонт Т характеризуется полуразложившимися органическими остатками (степень разложения Н5 по шкале фон Поста). Цвет глеевого горизонта G⊥ – 10Y 5/1, что характерно для восстановительных условий.

Анализ гранулометрического состава выявил значительные различия, обусловленные генезисом почвообразующих пород и условиями осадконакопления (табл. 2). На Спасской пади он

варьирует от супесчаного до суглинистого с преобладанием крупных фракций, указывающих на неоднородность условий седиментации, характерную для ледового комплекса. Содержание илстой фракции ($<0,001$ мм) составляет от 2,6 % до 14,96 %, что позволяет отнести породы к легким и среднесуглинистым разновидностям. Высокий коэффициент вариации для крупных фракций ($CV=52,9$ %) и илстой фракции ($CV=46,0$ %) показывает значительную разницу в составе отложений, что согласуется с полигенетическим характером покровных карбонатных отложений Центральной Якутии [1, 12]. Минеральные горизонты диагностированы как песчаные и супесчаные, реже легко- и среднесуглинистые.

В Эльгээйи больше содержание тонких фракций по сравнению со Спасской падью. Среднее содержание физической глины ($<0,01$ мм) составляет 35,81 % против 17,59 % на Спасской пади, при этом коэффициент вариации минимален ($CV=7,5$ %), что подчеркивает однородность элювиально-делювиальных отложений. На изучаемой территории развиты дерново-палевые типичные почвы с более высоким содержанием илстых фракций и физической глины [12, 13].

В Чокурдах почвообразующие породы – супесчаные отложения, характерные для озерно-термокарстовых равнин Яно-Индибирской низменности. Гранулометрический состав отличается преобладанием фракции 0,05–0,01 мм (49,50–66,22 %) и относительно низким содержанием илстой фракции (8,24–11,61 %). Для почв бассейна р. Алазея, расположенных в сходных природно-климатических условиях, также характерен относительно легкий гранулометрический состав с преобладанием суглинистых и супесчаных разновидностей [2].

Таблица 2

Гранулометрический состав почвообразующих пород (% от массы)

Table 2

Particle size distribution of soil-forming rocks (% by weight)

Показатель	Частицы размером, мм и их содержание, %						Сумма частиц, %	
	1,0–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,002	0,002–0,001	$< 0,001$	$< 0,01$
Спасская падь								
M	35,55	21,12	21,27	4,47	4,48	2,44	10,68	17,59
SD	18,80	7,46	12,65	3,32	3,64	1,30	4,91	6,98
CV, %	52,9	35,3	59,5	74,3	81,3	53,3	46,0	39,7
min	11,05	15,28	0,84	0,40	0,60	0,44	2,60	3,44
max	60,39	34,73	35,11	9,60	10,22	3,78	14,96	26,54
Эльгээйи								
M	7,20	18,48	30,37	7,74	8,47	4,18	23,56	35,81
SD	2,52	2,97	4,10	0,68	1,25	0,73	3,20	2,69
CV, %	35,0	16,1	13,5	8,8	14,8	17,5	13,6	7,5
min	4,16	14,40	25,04	6,68	7,09	3,18	20,11	31,97
max	10,74	21,80	35,31	8,41	10,44	5,19	28,22	38,66
Чокурдах								
M	1,14	15,50	57,26	7,08	5,49	3,51	10,01	18,60
SD	0,83	7,16	6,24	1,77	0,67	0,70	1,35	1,91
CV, %	72,8	46,2	10,9	25,0	12,2	19,9	13,5	10,3
min	0,45	7,91	49,50	4,69	4,69	2,88	8,24	15,81
max	2,58	26,01	66,22	9,52	6,69	4,27	11,61	20,48

Примечание. Здесь и далее. Физическая глина рассчитана как сумма фракций $<0,01$ мм. M – среднее арифметическое, SD – стандартное отклонение, CV – коэффициент вариации, %, min и max – минимальное и максимальное значение.

Валовой химический состав отражает как исходный минералогический состав пород, так и степень проявления элементарных почвенных процессов (табл. 3 и 4). Для четвертичных отложений Спасской пади характерен кварц-полевошпатовый состав [16]. Содержание SiO_2 варьирует от 60,69 % до 63,31 % (исключая оподзоленный горизонт с 45,38 %), Al_2O_3 – 16,64–18,01 %, Fe_2O_3 – 4,28–4,91 %. Обращает на себя внимание высокое содержание CaO 20,03 % при низком содержании SiO_2 (45,38 %) и Al_2O_3 (9,76 %). Значительная концентрация CaO при низком содержании CO_2 карбонатов (1,58 % в горизонте ВС и отсутствии в горизонте С) означает, что значительная часть кальция, вероятно, связана с силикатными минералами (например, полевыми шпатами), а не только с карбонатными конкрециями, как предполагалось ранее. Это соответствует повышенному содержанию Sr (519 мг/кг), характерного для карбонатных пород (табл. 4). Содержание K_2O (2,44–2,73 %), Na_2O (1,43–1,88 %) и MgO (2,25–2,62 %) находится в типичных для пород Центральной Якутии пределах. Высокий коэффициент вариации для CaO ($\text{CV}=135,8$ %) и Cu ($\text{CV}=87,6$ %) свидетельствует о гетерогенности пород по содержанию этих элементов. В автоморфных почвах большая часть химических элементов выносятся из поверхностных органогенных горизонтов и концентрируется в минеральных, причем наибольшими коэффициентами радиальной дифференциации отличаются Ca , Ti , Mn , Fe , Zn и Zr [17, 18]. Сопоставление с морфологическими данными показывает, что наибольшие концентрации Fe_2O_3 и TiO_2 приурочены к горизонтам с более темной окраской (10YR 4/1), в результате чего аккумуляция железа и титана происходит в тонкодисперсных фракциях. Наличие древесного угля в горизонтах BPL и BC свидетельствует о пирогенном факторе в почвообразовании [19]. В палевых типичных постпирогенных почвах Центральной Якутии содержание несиликатного Fe по Тамму в горизонте С составляет 0,12 %, увеличиваясь в гумусовых горизонтах в 1,5–3,0 раза [19].

Таблица 3

Валовый химический состав почвообразующих пород (макроэлементы, %)

Table 3

Gross chemical composition of soil-forming rocks (macroelements, %)

Показатель	Содержание оксидов, %										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	MnO	TiO_2	SO_3
Спасская падь											
M	60,63	16,45	4,45	4,83	2,49	2,49	1,52	0,15	0,07	0,70	0,19
SD	6,53	2,68	0,64	6,56	0,19	0,26	0,35	0,04	0,02	0,13	0,02
CV, %	10,80	16,30	14,40	135,80	7,60	10,40	23,00	26,70	33,30	18,60	10,50
min	45,38	9,76	3,20	1,73	2,19	1,94	0,91	0,09	0,04	0,43	0,17
max	64,66	18,01	5,27	20,03	2,84	2,73	1,88	0,22	0,11	0,78	0,23
Эльгээйи											
M	58,15	15,90	5,83	2,64	2,33	2,23	1,31	0,13	0,08	0,77	0,17
SD	1,40	0,62	0,21	0,86	0,37	0,06	0,39	0,02	0,01	0,03	0,03
CV, %	2,40	3,90	3,60	32,60	15,90	2,70	29,80	15,40	16,90	3,90	17,60
min	55,38	14,94	5,55	1,86	1,84	2,14	0,87	0,09	0,06	0,73	0,15
max	59,23	16,45	6,10	4,16	2,84	2,29	1,85	0,15	0,10	0,80	0,21
Чокурдах											
M	64,73	15,76	4,35	0,72	1,28	1,77	1,82	0,17	0,04	0,84	0,20
SD	2,50	0,74	0,63	0,12	0,15	0,11	0,29	0,04	0,01	0,05	0,07
CV, %	3,90	4,70	14,50	16,70	11,70	6,20	15,90	23,50	19,40	6,00	35,00
min	59,22	14,44	3,62	0,62	1,11	1,62	1,41	0,12	0,03	0,77	0,12
max	67,95	16,96	5,76	1,03	1,60	1,95	2,35	0,22	0,05	0,91	0,34

Относительно высокое содержание Fe_2O_3 и TiO_2 (0,73–0,91 %) в Эльгээйи по сравнению со Спасской падью показывает на более интенсивное выветривание в условиях большего увлажнения (табл. 3 и 4). Содержание CaO варьирует от 1,73 % до 4,16 %, что ниже, чем в карбонатных породах Спасской пади. Низкие коэффициенты вариации для большинства элементов ($\text{SiO}_2=2,4$ %, $\text{Al}_2\text{O}_3=3,9$ %, $\text{TiO}_2=3,9$ %) показывают однородность элювиально-делювиальных отложений. При морфологическом описании заметно проявляется гумусовый горизонт АН с цветом 5Y 5/1 и влажностью от свежей до сырой. В горизонте BPL отмечены прикорневые и унаследованные новообразования, характерные для биогенной и криогенной переработки материала.

В Чокурдах зафиксировано высокое содержание SiO_2 (59,22–67,95 %), низкое – Al_2O_3 (14,44–16,95 %) и Fe_2O_3 (3,62–5,76 %) (табл. 3 и 4). Более того, высокое содержание Zr (359–656 мг/кг) и Nb (14–22 мг/кг) связано с присутствием акцессорных минералов в аллювиальных отложениях тундровой зоны. Содержание CaO минимально (0,62–0,81 %), что подтверждает отсутствие карбонатных новообразований. Содержание Sr (174–206 мг/кг) также существенно ниже, чем в лесных ландшафтах. Морфологический профиль характеризуется мощным торфяным горизонтом Т (до 20 см) со степенью разложения Н5 (полуразложившийся) по шкале фон Поста. Глеевый горизонт G₁ с цветом 10Y 5/1 и тиксотропностью указывает на восстановительные условия, характерные для торфяно-глееземов [15].

Таблица 4

Валовой химический состав почвообразующих пород (микроэлементы, мг/кг)

Table 4

Gross chemical composition of soil-forming rocks (microelements, mg/kg)

Показатель	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Br	Pb	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
Спасская падь												
M	30,80	40,20	59,00	26,80	2,70	9,30	15,50	93,30	384,00	27,20	303,00	16,30
SD	10,00	35,20	9,60	3,40	1,20	3,80	3,60	9,80	75,90	4,10	36,50	2,60
CV, %	32,50	87,60	16,30	12,70	44,40	40,90	23,20	10,50	19,80	15,10	12,00	16,00
min	18,00	16,00	46,00	22,00	0,00	5,00	13,00	73,00	312,00	20,00	242,00	12,00
max	47,00	112,00	73,00	31,00	4,00	14,00	23,00	102,00	519,00	32,00	340,00	19,00
Эльгээйи												
M	39,00	27,20	72,60	30,00	2,50	6,80	12,60	93,80	308,40	30,80	279,00	15,00
SD	3,70	4,40	3,90	3,10	2,40	4,60	2,70	3,40	25,90	1,60	19,50	2,00
CV, %	9,50	16,20	5,40	10,30	96,00	67,60	21,40	3,60	8,40	5,20	7,00	13,30
min	35,00	22,00	68,00	25,00	0,00	0,00	9,00	89,00	279,00	29,00	245,00	13,00
max	42,00	34,00	79,00	34,00	6,00	13,00	17,00	98,00	332,00	33,00	298,00	18,00
Чокурдах												
M	25,60	17,40	63,00	28,00	6,10	-	13,40	73,90	192,90	39,60	467,70	18,70
SD	4,40	4,40	4,80	3,70	2,00	-	2,40	3,90	9,90	2,90	97,80	2,10
CV, %	17,20	25,30	7,60	13,20	32,80	-	17,90	5,30	5,10	7,30	20,90	11,20
min	18,00	11,00	56,00	22,00	5,00	-	11,00	68,00	174,00	34,00	359,00	14,00
max	31,00	26,00	70,00	33,00	11,00	-	18,00	81,00	206,00	45,00	656,00	22,00

Анализ ТОС и Нобщ выявил выраженную зависимость от гранулометрического и минералогического состава пород. На Спасской пади максимальное содержание ТОС отмечено в органических горизонтах (OF: 14,40 %, ОН_{ао}: 12,90 %), что обусловлено аккумуляцией слаборазложившегося растительного опада на поверхности почвы. В минеральных горизонтах содержание ТОС резко снижается: от 0,65 % в горизонте BPL до 0,03 % в горизонте С. Содержание Нобщ также закономерно убывает с глубиной: 1,05 % в OF, 0,08 % в BPL, 0,01 % в ВС. Широкое

соотношение C/N в органогенных горизонтах (13,7–33,9) указывает на преобладание грубого гумуса и замедленную микробную трансформацию органического вещества [1]. В карбонат-содержащих горизонтах BC и C отмечено присутствие неорганического углерода (TIC 0,01–0,02 %), что согласуется с высоким содержанием CaO (до 3,92 %) в этих горизонтах.

В Эльгээйи содержание ТОС в органогенных горизонтах значительно выше, чем на Спасской пади (OF: 23,21 %, ONao: 19,97 %, AN: 5,13 %), это связано с более мощным гумусово-аккумулятивным горизонтом (АН до 40 см) и более благоприятными условиями увлажнения [12, 13]. Содержание Нобщ выше (OF: 0,83 %, ONao: 0,91 %, AN: 0,25 %), в минеральных горизонтах BPL, BC и C содержание TIC (0,12–0,59 %), коррелирует с карбонатами (2,65–3,22 %) и CaO (до 4,16 %). Повышенные значения ТОС в элювиально-делювиальных суглинках Эльгээйи обусловлены как более тяжелым гранулометрическим составом, способствующим сорбции органического вещества на поверхности глинистых частиц, так и высоким содержанием Fe_2O_3 (до 6,10 %) и TiO_2 , участвующих в формировании органоминеральных комплексов [17, 18].

В Чокурдах максимальное содержание ТОС зафиксировано в горизонте O (39,62 %), вследствие слабого разложения растительного опада в условиях короткого вегетационного периода. В торфяном горизонте T содержание ТОС снижается до 12,74 % при максимальном содержании Нобщ (1,84 %) и минимальном отношении C/N (6,9). Результаты показывают высокую степень гумификации, обогащение азотом за счет состава растительного опада и активную микробную деятельность в анаэробных условиях. Эти процессы приводят к замедлению деструкции органического материала, что способствует стабилизации и длительному сохранению органического вещества в горизонте T.

Глеевый горизонт GC₁ характеризуется низким содержанием ТОС (1,15 %) и Нобщ (0,11 %). Неорганического углерода содержится в незначительных количествах (TIC 0,16 %) (табл. 1) и минимальным содержанием CaO (0,72 %), в том числе отсутствием карбонатов. Супесчаный состав пород Чокурдах не способствует сорбции органического вещества, это объясняет низкое содержание ТОС в минеральных горизонтах.

Обнаружена зависимость между гранулометрическим и валовым составом, а также содержанием биогенных элементов. Суглинистые породы Эльгээйи с высоким содержанием илистой фракции и оксидов Fe и Ti характеризуются максимальным содержанием ТОС в минеральных горизонтах (до 5,13 %). В супесчаных отложениях Чокурдах с низким содержанием глинистых минералов и F_2O_3 содержание ТОС в минеральной толще (1,15 %) выше, чем в песчано-суглинистых породах Спасской пади (0,03–0,65 %), это связано с процессами криотурбации и тиксотропностью горизонтов. Промежуточное положение занимают песчано-суглинистые породы Спасской пади, где содержание ТОС в минеральных горизонтах варьирует от 0,03 до 0,65 % в зависимости от присутствия карбонатных включений и гранулометрического состава конкретного горизонта.

Коэффициенты вариации изученных параметров позволяют судить об однородности исследуемых выборок. По гранулометрическому составу заметная изменчивость характерна для Спасской пади (CV для физической глины=39,7 %). Минимальная отмечена для полигона «Эльгээйи» (CV для физической глины=7,5 %), что свидетельствует об однородности элювиально-делювиальных суглинистых отложений. По валовому химическому составу экстремально высокие значения CV характерны для CaO на Спасской пади (135,8 %) из-за присутствия карбонатных включений. Для Чокурдах коэффициент вариации Zr (20,9 %) отражает распределение акцессорных минералов в аллювиальных отложениях и характеризует среднюю или повышенную степень вариации.

Обсуждение

Полученные данные согласуются с результатами современных почвенных исследований. Уровень гумусонакопления в палевых осолоделых почвах Центральной Якутии увеличивается с утяжелением гранулометрического состава. Легкий гранулометрический состав обуславливает

увеличение доли фульвокислот в составе гумуса [3]. Наши данные подтверждают эту закономерность: суглинистые породы Спасской пади и Эльгээйи характеризуются более высоким содержанием ТОС в минеральных горизонтах по сравнению с супесчаными породами Чокурдах.

В автоморфных почвах большая часть химических элементов выносятся из поверхностных органогенных горизонтов и концентрируется в минеральных, причем наибольшими коэффициентами радиальной дифференциации отличаются Ca, Ti, Mn, Fe, Zn и Zr. По латеральному расчленению большинство изученных элементов накапливаются в верхней части почвенно-геохимической катены [17, 18]. Высокое содержание упомянутых выше элементов в материнской породе коррелирует с данными об их аккумуляции в минеральной толще.

Профильная дифференциация глинистых минералов в криогенных почвах выражена слабо из-за криогенной гомогенизации, а выветривание минералов в палевых почвах Центральной Якутии является более значимым фактором [1]. Специфика минералогического состава покровных отложений Центральной Якутии подтверждается исследованиями [11], показавшими, что отличительной особенностью почвообразующих пород Ленского плато является высокая доля каолинита среди глинистых минералов. При исследовании валового состава почв бассейна р. Алазея установлено, что легкий гранулометрический состав, насыщенность слаборазложившимися органическими остатками и низким молярным соотношением различных оксидов определяют ослабленные процессы выветривания в экстремальных условиях Севера [2]. Полученные нами данные для Чокурдах согласуются с этими выводами: соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в породах тундровой зоны составляет в среднем 4,11, что подтверждает низкую интенсивность криогенного выветривания.

По палинологическим реконструкциям в бассейне Верхней Индигирки показано, что в поздней ледниковой эпохе и голоцене происходили значительные изменения растительного покрова, связанные с климатическими колебаниями. Они, в свою очередь, влияли на характер почвообразования и свойства почвообразующих пород [20]. Полученные нами данные отражают современное состояние почв, сформировавшихся в условиях длительного развития термокарстовых процессов в голоцене.

Заключение

Гранулометрический состав почвообразующих пород закономерно изменяется в ряду от супесей тундровых ландшафтов (Чокурдах, физическая глина 18,60 %) и супесей лесов Центральной Якутии (Спасская падь, физическая глина 17,59 %) к однородным суглинкам южно-таежных экосистем (Эльгээйи, физическая глина 35,81 %), что обусловлено сменой генезиса отложений от озерно-аллювиального к элювиально-делювиальному. Несмотря на близость значений физической глины для Чокурдах и Спасской пади, их генезис различен: в первом случае это озерно-аллювиальные отложения, во втором – полигенетичные отложения ледового комплекса, что подтверждается высокой вариабельностью гранулометрического состава на Спасской пади.

Валовой химический состав, отражающий исходную минералогию пород и степень выветривания, закономерно варьирует в этом же ряду: карбонатные породы Спасской пади обогащены CaO (до 20,03 %) и Sr (до 519 мг/кг), однако значительная часть CaO, связана с силикатными минералами, тогда как в гомогенных супесях Чокурдах их содержание минимально, а отложения Эльгээйи, напротив, отличаются повышенными концентрациями Fe_2O_3 и TiO_2 , свидетельствующими о более интенсивном выветривании.

Содержание органического углерода в минеральных горизонтах тесно зависит от гранулометрического состава: максимальные значения зафиксированы в суглинках Эльгээйи (до 5,13 %). В супесчаных отложениях Чокурдах (1,15 %) содержание ТОС выше, чем в песчано-суглинистых отложениях Спасской пади (0,03–0,65 %). В тундровых ландшафтах это обусловлено тиксотропными свойствами минеральных горизонтов. Это подтверждает определяющую роль не только гранулометрического, но и криогенного факторов в стабилизации и перераспределении органического вещества мерзлотных экосистем.

Литература

1. Десяткин Р.В., Лесовая С.Н., Оконешникова М.В. и др. Криоземы и палевые слабодифференцированные почвы тундр и тайги Якутии: свойства, минералогический состав и классификация. *Почвоведение*. 2021;12:1423-1436. DOI: 10.31857/S0032180X21120042
2. Иванова А.З., Десяткин Р.В. Валовой состав основных типов почв бассейна реки Алазея. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2016;21(1):110-114.
3. Оконешникова М.В. Гумусное состояние мерзлотных палевых осолоделых почв Центральной Якутии разного гранулометрического состава. *Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова*. 2019;4:34-45. DOI: 10.25587/SVFU.2019.72.35046
4. Nizamutdinov T.I., Abakumov E.V., Khalitov R.M. et al. Microstructure and mineral composition of long-cultivated permafrost-affected soils from the Yamal experimental agricultural station (Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous Okrug). *Eurasian Soil Sci.* 2025;58(12):1-13. DOI: 10.1134/S106422932560232X
5. Gentsch N., Mikutta R., Shibistova O. et al. Properties and bioavailability of particulate and mineral-associated organic matter in Arctic permafrost soils, Lower Kolyma Region, Russia. *Eur J Soil Sci.* 2015;66:722-734. DOI: 10.1111/ejss.12269
6. Montaña-López F., Landis J.D., Wilkins S.D. et al. Organo-mineral interactions in active layer and permafrost soils along aging Arctic landscapes. *Catena*. 2025;272:110377. DOI: 10.1016/j.catena.2026.110377
7. Monhonval A., Opfergelt S., Verrecchia E.P. et al. Thermokarst processes increase the supply of stabilizing surfaces and elements (Fe, Mn, Al, and Ca) for mineral–organic carbon interactions. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2022;33(4):398-413. DOI: 10.1002/ppp.2162
8. Szymański W., Drewnik M., Stolarczyk M. et al. Occurrence and stability of organic intercalation in clay minerals from permafrost-affected soils in the High Arctic – case study from Spitsbergen (Svalbard). *Geoderma*. 2022;408:115591. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115591
9. Zhu J.-H., Martens J., Kuzyakov Y. et al. Mineral–enzyme interactions drive soil organic carbon accumulation and stabilization in permafrost. *Environ Sci Technol.* 2025;59(51):27824-27835. DOI: 10.1021/acs.est.5c08036
10. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G. et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*. 2009;23(2):GB2023. DOI: 10.1029/2008GB003327
11. Оконешникова М.В., Лесовая С.Н., Десяткин Р.В. Почвы лиственничных лесов стационаров «Спасская падь» и «Элгээйи» (Центральная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2018;25(3):71-79. DOI: 10.31242/2618-9712-2018-25-3-71-79
12. Desyatkin R.V., Lessovaia S.N., Okonishnikova M.V. et al. Genesis, properties, and mineralogical features of soils of the Lena Plateau, Yakutia. *Eurasian Soil Sci.* 2026;59(3). DOI: 10.1134/S1064229325601647
13. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена; 2004. 342 с.
14. Бронникова М.А., Герасимова М.И., Конопляникова Ю.В. и др. Кριοаридные почвы как генетический тип в классификации почв России: география, морфология, диагностика. *Почвоведение*. 2022;3:263-280. DOI: 10.31857/S0032180X22030030
15. Meisel O.H., Rijkers R., Dean J.F. et al. Geochemical, sedimentological and microbial diversity in two thermokarst lakes of far Eastern Siberia. *Biogeochemistry*. 2023;165:239-263. DOI: 10.1007/s10533-023-01076-1
16. Васильева Т.И. Особенности формирования свойств и состава мерзлотных почв Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2016;21(1):100-106.
17. Vasil'chuk Y.K., Ginzburg A.P. Lateral and radial differentiation of cryogenic soil chemical composition in the Vilyuy River Valley, Central Yakutia. *Moscow Univ Soil Sci Bull.* 2024;79(1):S34-S48. DOI: 10.3103/S0147687424700339
18. Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П. Латеральная и радиальная дифференциация химического состава криогенных почв долины реки Вилюй, Центральная Якутия. *Арктика и Антарктика*. 2023;1:68-87. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40034
19. Desyatkin A., Okonishnikova M., Fedorov P., et al. The impact of catastrophic forest fires of 2021 on the light soils in Central Yakutia. *Land*. 2024;13(8):1130. DOI: 10.3390/land13081130
20. Lozhkin A., Minyuk P., Korzun J. et al. Implications for conifer glacial refugia and postglacial climatic variation in western Beringia from lake sediments of the Upper Indigirka basin. *Boreas*. 2018;47:938-953. DOI: 10.1111/bor.12316

References

1. Desyatkin R.V., Lesovaya S.N., Okoneshnikova M.V., et al. Cryozems and pale weakly differentiated soils of tundra and taiga of Yakutia: properties, mineralogical composition and classification. *Eurasian Soil Sci.* 2021;12:1423–1436 (in Russian). DOI: 10.31857/S0032180X21120042
2. Ivanova A.Z., Desyatkin R.V. Bulk composition of the main soil types in the Alazeya River basin. *Arctic and Subarctic Natural Resources.* 2016;21(1):110–114 (in Russian).
3. Okoneshnikova M.V. Humus state of permafrost pale solodic soils of Central Yakutia with different particle size distribution. *Vestnik of the North-Eastern Federal University.* 2019;4:34–45 (in Russian). DOI: 10.25587/SVFU.2019.72.35046.
4. Nizamutdinov T.I., Abakumov E.V., Khalitov R.M., et al. Microstructure and mineral composition of long cultivated permafrost affected soils from the Yamal experimental agricultural station (Salekhard, Yamal Nenets Autonomous Okrug). *Eurasian Soil Sci.* 2025;58(12):1–13. DOI: 10.1134/S106422932560232X.
5. Gentsch N., Mikutta R., Shibistova O., et al. Properties and bioavailability of particulate and mineral associated organic matter in Arctic permafrost soils, Lower Kolyma Region, Russia. *Eur J Soil Sci.* 2015;66:722–734. DOI: 10.1111/ejss.12269.
6. Montaña López F., Landis J.D., Wilkins S.D., et al. Organo mineral interactions in active layer and permafrost soils along aging Arctic landscapes. *Catena.* 2025;272:110377. DOI: 10.1016/j.catena.2026.110377.
7. Monhonval A., Opfergelt S., Verrecchia E.P., et al. Thermokarst processes increase the supply of stabilizing surfaces and elements (Fe, Mn, Al, and Ca) for mineral–organic carbon interactions. *Permafrost and Periglacial Processes.* 2022;33(4):398–413. DOI: 10.1002/ppp.2162.
8. Szymański W., Drewnik M., Stolarczyk M., et al. Occurrence and stability of organic intercalation in clay minerals from permafrost affected soils in the High Arctic – case study from Spitsbergen (Svalbard). *Geoderma.* 2022;408:115591. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115591.
9. Zhu J.-H., Martens J., Kuzyakov Y., et al. Mineral–enzyme interactions drive soil organic carbon accumulation and stabilization in permafrost. *Environ Sci Technol.* 2025;59(51):27824–27835. DOI: 10.1021/acs.est.5c08036.
10. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles.* 2009;23(2):GB2023. DOI: 10.1029/2008GB003327.
11. Okoneshnikova M.V., Lessovaya S.N., Desyatkin R.V. Soils of larch forests at the Spasskaya Pad' and Elgeeyi research stations (Central Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources.* 2018;25(3):71–79 (in Russian). DOI: 10.31242/2618-9712-2018-25-3-71-79
12. Desyatkin R.V., Lessovaya S.N., Okoneshnikova M.V., et al. Genesis, properties, and mineralogical features of soils of the Lena Plateau, Yakutia. *Eurasian Soil Sci.* 2026;59(3). DOI: 10.1134/S1064229325601647.
13. Classification and diagnostics of soils of Russia. Smolensk: Oikumena; 2004:342 (in Russian).
14. Bronnikova M.A., Gerasimova M.I., Konoplyanikova Yu.V., et al. Cryoarid soils as a genetic type in the classification of soils of Russia: geography, morphology, diagnostics. *Eurasian Soil Sci.* 2022;3:263–280 (in Russian). DOI: 10.31857/S0032180X22030030.
15. Meisel O.H., Rijkers R., Dean J.F. et al. Geochemical, sedimentological and microbial diversity in two thermokarst lakes of far Eastern Siberia. *Biogeochemistry.* 2023;165:239–263. DOI: 10.1007/s10533-023-01076-1.
16. Vasilieva T.I. Features of the formation of properties and composition of permafrost soils in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources.* 2016;21(1):100–106 (in Russian).
17. Vasil'chuk Y.K., Ginzburg A.P. Lateral and radial differentiation of cryogenic soil chemical composition in the Vilyuy River Valley, Central Yakutia. *Moscow Univ Soil Sci Bull.* 2024;79(1):S34–S48. DOI: 10.3103/S0147687424700339.
18. Vasilchuk Yu.K., Ginzburg A.P. Lateral and radial differentiation of the chemical composition of cryogenic soils in the Vilyuy River valley, Central Yakutia. *Arctic and Antarctic.* 2023;1:68–87 (in Russian). DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40034.
19. Desyatkin A., Okoneshnikova M., Fedorov P., et al. The impact of catastrophic forest fires of 2021 on the light soils in Central Yakutia. *Land.* 2024;13(8):1130. DOI: 10.3390/land13081130.
20. Lozhkin A., Minyuk P., Korzun J., et al. Implications for conifer glacial refugia and postglacial climatic variation in western Beringia from lake sediments of the Upper Indigirka basin. *Boreas.* 2018;47:938–953. DOI: 10.1111/bor.12316

Сведения об авторах

ШЕПЕЛЕВ Андрей Геннадиевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории криогенных ландшафтов Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ORCID: 0000-0002-8836-2123, ResearcherID: M-7299-2016, Scopus Author ID: 56146927300, SPIN: 9766-4679. E-mail: carbon-shag@yandex.ru

ЧЕРЕПАНОВА Александра Михайловна – младший научный сотрудник лаборатории общей гео-криологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ORCID: 0000-0002-4638-4770, ResearcherID: HKV-8412-2023, Scopus Author ID: 57189389513, SPIN: 4427-2311. E-mail: alexandra_587@mail.ru

МАКСИМОВ Трофим Христофорович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, и.о. заместителя генерального директора по науке и международным проектам ЯНЦ СО РАН, ORCID: 0000-0001-7003-5653, ResearcherID: J-8964-2016, SPIN: 9160-8274. E-mail: tcmx@mail.ru

Author Information

Andrei G. SHEPELEV – Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Cryogenic Landscapes, P. I. Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-8836-2123, ResearcherID: M-7299-2016, Scopus Author ID: 56146927300, SPIN: 9766-4679. E-mail: carbon-shag@yandex.ru

Alexandra M. CHEREPANOVA – Junior Researcher, Laboratory of General Geocryology, P. I. Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-4638-4770, ResearcherID: HKV-8412-2023, Scopus Author ID: 57189389513, SPIN: 4427-2311. E-mail: alexandra_587@mail.ru

Trofim C. MAXIMOV – Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, Acting Deputy General Director for Science and International Projects, Yakutsk Scientific Center, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-7003-5653, ResearcherID: J-8964-2016, SPIN: 9160-8274. E-mail: tcmx@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

All authors contributed equally to the preparation of the publication.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Submitted 07.08.2026

Поступила после рецензирования / Revised 21.08.2026

Принята к публикации / Accepted 21.09.2026