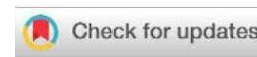


УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.306>

Микроморфологическое строение органической и минеральной части тундровых почв дельты реки Лены

© 2025 В. И. Поляков , Е. В. Абакумов 

Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра прикладной экологии, 16-ая линия ВО, д. 29, Санкт-Петербург, 199178, Россия. E-mail: slavon6985@gmail.com; e_abakumov@mail.ru

Цель исследования. Определить особенности микроморфологического строения тундровых почв дельты реки Лены и формирования в них устойчивых органоминеральных агрегатов.

Место и время проведения. Остров Самойловский и молодой остров Ивовый, дельта реки Лены, Якутия, Россия. Полевые работы проводились в летний полевой сезон 2021 года.

Методы. В работе использовались общепринятые методы микроморфологического анализа почв; определение минералов осуществлялось на поляризационном микроскопе Leica DM750P; расчет органоминеральных агрегатов производился в программном комплексе ImageJ ver. 1.54m.

Основные результаты. Выявлены основные закономерности влияния криогенеза и деятельности реки на формирование почв на ее первой террасе. На микроморфологическом уровне установлено, что почвы, подверженные влиянию реки, характеризуются наличием крупных органоминеральных агрегатов, состоящих из тонкодисперсного органического материала, кварца, слюды, а также неразложившихся растительных остатков. Формирование органоминеральных агрегатов в почвах высокой поймы Лены обусловлено активными процессами гумификации растительных остатков и слабым влиянием криогенеза. Почвы, формирующиеся вне влияния реки на первой террасе, характеризуются наличием большого количества неразложившихся растительных остатков, что указывает на слабые процессы трансформации органического вещества. В условиях деградации полигональных структур, отмечаются активные процессы криогенного массообмена, которые приводят к разрушению органоминеральной матрицы почв и высвобождению органического вещества из мерзлого состояния. Оценка физической стабилизации почвенного органического вещества показала, что деградация полигональных структур может привести к сокращению стабильного пула углерода в почвах за счет активного проявления криогенных процессов, тем самым увеличивая потенциальный лабильный пул углерода, который может быть подвержен биodeградации.

Заключение. В результате действия речных и криогенных процессов в дельте реки Лены отмечена существенная трансформация почв, которая связана с особенностями накопления органических веществ и формирования почвенной органоминеральной матрицы. Анализ состава почв на уровне их микростроения показал, что в находящихся под активным влиянием реки почвах происходит формирование органоминеральных агрегатов, несмотря на низкую степень проработанности почвенного материала. В почвах, неподверженных ежегодному затоплению, в результате действия термокарстовых процессов отмечается высвобождение почвенного органического вещества, что увеличивает риск его биodeградации. Деградация мерзлоты и полигональных структур обуславливает уязвимость криогенных почв к потере углерода в условиях изменения климата.

Ключевые слова: органоминеральные агрегаты; минеральная матрица почвы; стабилизация органического вещества; почвы дельты Лены; Якутия; Арктика.

Цитирование: Поляков В.И., Абакумов Е.В. Микроморфологическое строение органической и минеральной части тундровых почв дельты реки Лены // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. e306. DOI: [10.31251/pos.v8i1.306](https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.306)

ВВЕДЕНИЕ

Высокоширотная Арктика подвержена более активному изменению климата по отношению к низким широтам (Schuur et al., 2015; Post et al., 2019; Szymański et al., 2022). Это выражается в таянии льда, деградации многолетнемерзлых пород (ММП) (Overland, Wang, 2013), более высокой продуктивности растений, а также изменении трофических цепей (Национальный доклад ..., 2024; Sanders et al., 2022). Арктические почвы представляют собой крупнейшее хранилище углерода на планете; его формирование и высвобождение в существенной степени определяется климатом (Tarnocai et al., 2009). По различным оценкам в почвах Арктики на глубине до 3 метров находится от 1000 до 1300 Пг почвенного органического вещества (ПОВ) и 40–67 Пг азота (Hugelius et al., 2020; Mishra et al., 2021). Формирование почв в Арктике происходит под влиянием низких температур, короткого вегетационного периода, а также низкой биологической активности (Jílková et al., 2021). В

связи с этим происходит активное накопление грубых форм гумуса в почве и их дальнейшая консервация под действием низких температур (Dao et al., 2018). На сегодняшний день арктические почвы в большей степени являются секвестратором углерода, однако в результате изменения климата накопленное здесь органическое вещество может быть подвержено активной биодegradации, внося существенный вклад в изменение климата на планете (Loisel et al., 2014). Согласно одной из гипотез, почвы могут секвестрировать лишь определенный объем углерода (Six et al., 2002); данный показатель зависит от гранулометрического состава, содержания агрегатов различного размера, плотности почвы (Baldock, Skjemstad, 2000; Kleber et al., 2015). При достижении определенного уровня насыщения почвы углеродом, его дальнейшее поступление в почву вместе с растительными остатками не будет приводить к его увеличению (Six et al., 2002). В условиях увеличения продуктивности наземных экосистем Арктики существуют риски, что в уже насыщенную углеродом почву будет попадать существенное количество растительного опада, который, не накапливаясь в почве, будет подвержен минерализации с образованием климатически-активных газов (Natali et al., 2019; Plaza et al., 2019). Существует большое количество работ, посвященных изучению содержания и запасов углерода, однако до сих пор имеется небольшое количество данных в отношении качества и устойчивости ПОВ к биодegradации в Арктике (Polyakov et al., 2023a). Так, одним из методов оценки физической устойчивости (стабилизации) ПОВ является анализ содержания и размеров почвенных агрегатов (Семенов и др., 2020), которые отличаются по форме и размеру, а также содержанию ПОВ. Принято различать микроагрегаты (<250 мкм) и макроагрегаты (250-2000 мкм), а также мегаагрегаты (>2000 мкм) (Oades, Waters, 1991; Sarker et al., 2018); данные новообразования имеют различную степень устойчивости. Считается, что микроагрегаты являются более устойчивыми новообразованиями по отношению к макроагрегатам и мегаагрегатам, что обусловлено меньшей доступностью органического вещества для микроорганизмов, а также наличием различных ферментов (Семенов и др., 2020; Szymański et al., 2022). Оценка физической стабилизации ПОВ, основанная на расчете строения почвенных агрегатов, относительно широко применяется для изучения пахотных почв, что обусловлено дegradацией земель и высвобождением биогенных элементов (Singh, Benbi, 2021; Islam et al., 2022). В Арктике более распространен метод анализа молекулярной стабилизации органического вещества. Так, по данным различных авторов, было установлено, что ПОВ из-за действия криогенеза характеризуется относительно гетерогенным молекулярным составом гуминовых кислот и, соответственно, различной устойчивостью к биодegradации (Василевич и др., 2019; Лодыгин, Василевич, 2021; Polyakov et al., 2023b). Устойчивость ПОВ зависит от температуры почвы, воздуха, биогенных элементов, микробной активности, молекулярного состава и минералогического состава почв (Dai et al., 2002; Szymański, 2017). Минералогический состав почв играет важную роль в стабилизации ПОВ, поскольку вторичные минералы, оксиды железа, алюминия и марганца участвуют в формировании устойчивых органоминеральных агрегатов, которые являются труднодоступными для почвенных микроорганизмов (Szymański et al., 2022).

В этой связи, целью нашей работы являлось определение особенностей микроморфологического строения тундровых почв дельты реки Лены и формирования в них устойчивых органоминеральных агрегатов. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: 1 – определить особенности формирования и микростроения почв, развивающихся под активным влиянием реки, и почв не подвергающихся периодическому затоплению; 2 – оценить степень физической стабилизации органического вещества изученных почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования. Объектом исследования являлись почвы первой террасы дельты реки Лены, которая является крупнейшей северной речной дельтой в мире, расположенной в арктическом регионе с площадью около 30 000 км². Она находится в зоне с арктическим континентальным климатом. Климатические характеристики приведены по наблюдениям с полярных метеостанций Тикси, Столб и Усть-Оленек (Voike et al., 2019). Среднегодовая температура воздуха составляет –13 °С, средняя температура в январе понижается до –32 °С, а средняя температура в июле составляет +6,5 °С. Годовое количество осадков – 190 мм. Большая часть территории характеризуется наличием верхней границы многолетнемерзлых пород (ММП) на глубине от 20 см до 1 м. В дельте реки Лены преобладает мохово-лишайниковая растительность: моховые сообщества доминируют на суглинистых, а лишайниковые – на грубоскелетных почвах. Фитоценоз на исследованных территориях характеризуется комплексным строением; так, на открытых территориях представлены

мохово-лишайниковые сообщества, которые сменяются осоково-лишайниковыми сообществами вблизи озер. Район исследования показан на рисунке 1.



Рисунок 1. Район исследования. Дельта реки Лены.

Исследования проводились: 1) на первой террасе дельты реки Лены (о. Самойловский), данный участок может подвергаться затоплению раз в несколько десятков лет во время весеннего половодья; 2) на высокой пойме реки (о. Ивовый), данная территория подвергается периодическому затоплению во время весеннего половодья (табл. 1). Территория первой террасы характеризуется плоским рельефом с небольшими возвышенностями и сложена песчаными аллювиальными отложениями. Участки, которые длительное время развиваются под действием термокарстовых процессов, характеризуются развитием полигонального рельефа (рис. 2). Размер полигонов составляет несколько метров в поперечном сечении.

Таблица 1

Описание исследованных почв на островах Самойловский и Ивовый

№	Горизонт	Глубина, см	Описание	Координаты, ландшафт	Название почвы
S1-7	О	0-6	Моховая подстилка.	72°22'18.2" с.ш. 126°29'18.1" в.д. Не затапливаемая выровненная поверхность, о. Самойловский	Торфяно-криозем на аллювиальных отложениях / Histic Cryosol
	T	6-27	Грубый органический материал, присутствуют горизонтально расположенные линзы минерального материала толщиной менее 1 см, присутствуют охристые пленки на поверхности минералов.		
	CR	27-35	Серый, бесструктурный, массивный, супесчаный, включение органических остатков в виде отдельных		

			пятен, а также вихревого рисунка, заполняется водой.		
Si1	AY	0-20	Серый, суглинистый, присутствуют горизонтально расположенные линзы песка, комковатая структура, массивный.	72°30'51.3" с.ш. 126°31'34.7" в.д. Выровненная поверхность молодого острова, о. Ивовый.	Серогумусовая на аллювиальных песках / Umbric Cryosol (Fluvic)
	C	20-45	Светло серый песок, горизонтально расположенные линзы суглинистого материала более темного цвета		
VAL P1	O	0-10	Моховая подстилка.	72°23'08.0" с.ш. 126°29'04.1" в.д. Валиковый полигон, о. Самойловский	Криозем грубогумусовый на аллювиальных отложениях / Histic Cryosol
	AO	10-20	Темно-коричневый, супесчаный, бесструктурный, массивный, включение неразложившихся органических остатков в виде пятен.		
	CR	20-37	Серый, бесструктурный, включения железистых конкреций в виде отдельных пятен.		
VG1	0-10	O	Моховая подстилка.	72°22'23.6" с.ш. 126°31'22.6" в.д. Вогнутый полигон, о. Самойловский	Криозем на аллювиальных отложениях / Turbic Cryosol
	10-26	CR	Серый, супесчаный, бесструктурный, массивный, включения неразложившихся растительных остатков в виде в виде отдельных пятен, а также вихревого рисунка.		
VP1	O	0-2	Моховая подстилка.	72°22'01.7" с.ш. 126°29'17.9" в.д. Выпуклый полигон, о. Самойловский	Криозем грубогумусовый на аллювиальных отложениях / Histic Cryosol
	AO	2-20	Темно-коричневый, супесчаный, бесструктурный, массивный, включение неразложившихся органических остатков в виде отдельных пятен.		
	CR	20-45	Серый, супесчаный, бесструктурный, включения неразложившихся растительных остатков в виде отдельных пятен, а также вихревого рисунка.		
ZP2	O	0-3	Моховая подстилка.	72°23'16.2" с.ш. 126°29'27.8" в.д. Зарождающийся полигон, о. Самойловский	Торфяно-криозем на аллювиальных отложениях / Histic Cryosol
	T	3-11	Грубый органический материал, включения горизонтально расположенных линз песка толщиной менее 1 см.		
	CR	11-20	Серый, бесструктурный, массивный, легкий суглинок, присутствуют охристые пленки на поверхности минералов.		
	C	20-75	Светлый песок, бесструктурный, горизонтально расположенные линзы суглинистого материала, заливается водой с 75 см.		

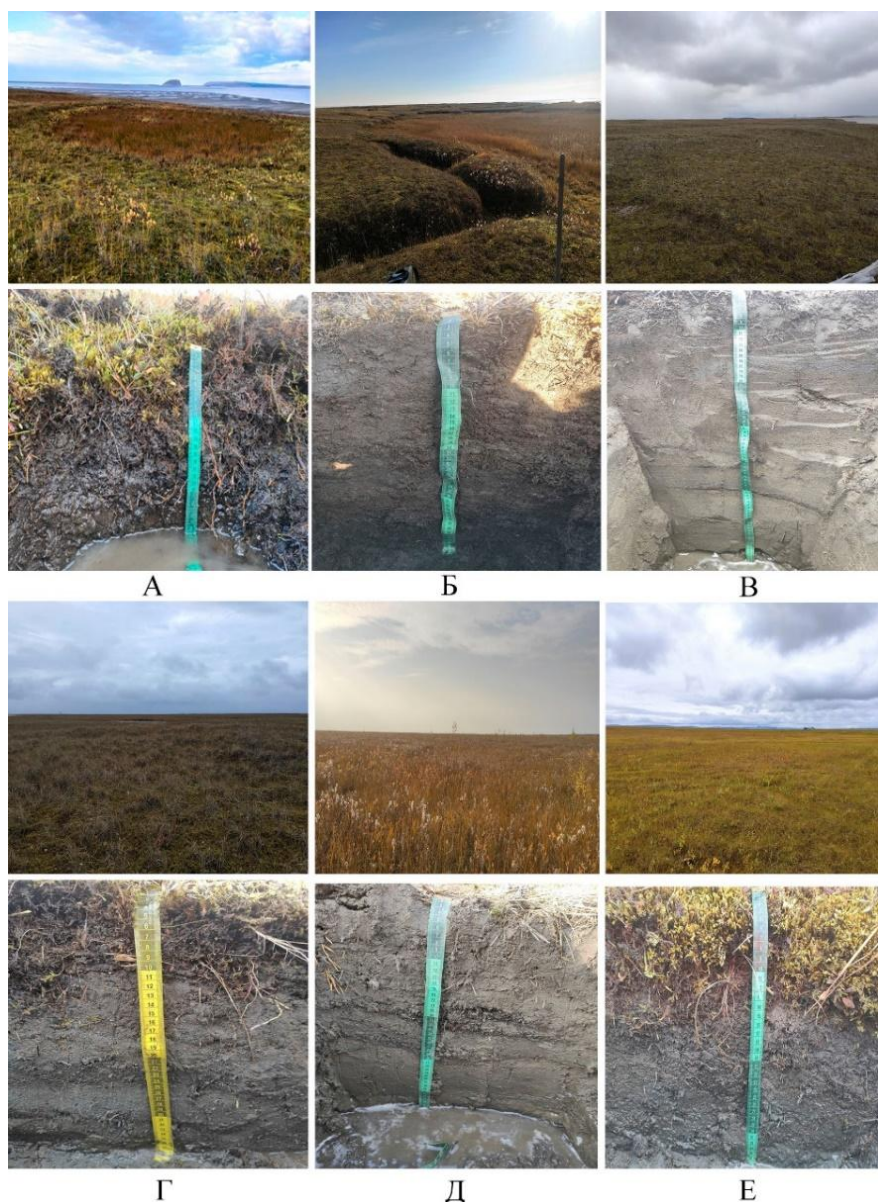


Рисунок 2. Исследованные почвы: А – криозем на аллювиальных отложениях (VG1); Б – криозем грубогумусовый на аллювиальных отложениях (VP1); В – торфяно-криозем на аллювиальных отложениях (ZP2); Г – торфяно-криозем на аллювиальных отложениях (VALP1); Д – серогумусовая на аллювиальных песках (S1); Е – торфяно-криозем на аллювиальных отложениях (S1-7). Индексы почв соответствуют индексам, представленным в таблице 1, где приведено описание исследованных почв.

Стратегия отбора образцов почв. Отбор почв осуществлялся из верхних органоминеральных горизонтов, где происходят наиболее активные процессы гумификации органического вещества. Выбор почв на острове Самойловский осуществлялся на различных стадиях формирования полигональной тундры, а именно: на зарождающихся полигонах, которые характеризуются отсутствием валиков по бокам полигона и плоской поверхностью; вогнутых полигонах, которые отличаются наличием валиков по бокам полигона и выраженным днищем, заполненным водой; валиковых полигонах с широким валиковым пространством вокруг полигональных ванн; выпуклых полигонах, представляющих собой конечную стадию деградации полигональных структур и характеризующихся отсутствием понижения в центре полигона (Kartozia, 2019).

Почвенный температурный режим. Среднегодовая температура активного слоя почв составляет $-8,4^{\circ}\text{C}$, данный слой наиболее подвержен процессам промерзания-оттаивания. Так, в течение года температура активного слоя может изменяться в пределах от $+20^{\circ}\text{C}$ до -35°C . Промерзание почвы начинается в сентябре, а оттаивание – в середине мая.

Лабораторные методы. Шлифы для микроморфологического анализа были получены из почвенных микромоноклитов, отобранных в полевых условиях. Образцы высушивали и пропитывали эпоксидной смолой. Полученные шлифы анализировали на поляризационном микроскопе (Leica DM750P, Германия) с программным обеспечением LAS 4.9 в параллельных и скрещенных николях. Площадь шлифов составляет 500 мм². Содержание агрегатов в шлифах анализировали с помощью программного обеспечения ImageJ 1.54g (National Institutes of Health, США). Для создания цифровой копии полноразмерного шлифа, съемка производилась при увеличении 2.5х в параллельных николях, для каждого шлифа было подготовлено около 50 снимков, которые в дальнейшем были объединены. При помощи программы Photoshop CS 6 (Adobe Inc., США) снимки объединялись, а изображение сглаживалось путем подбора контрастности и удаления артефактов, получаемых при съемке (неравномерное распределение света по краям снимков). В программном обеспечении ImageJ 1.54g был установлен масштаб, изображение было переведено в бинарную форму, что необходимо для точного расчета агрегатов, убраны шумы, в виде мелких объектов, а также заполнены полости внутри агрегатов, занятые минералами. После этого был произведен расчет всех агрегатов в почвенных шлифах, которые были разделены на микроагрегаты и макроагрегаты. Терминология, используемая в данной работе, была опубликована М.И. Герасимовой с соавторами (2011) и G. Stoops (2020), подробно описавших микроструктуру почвы.

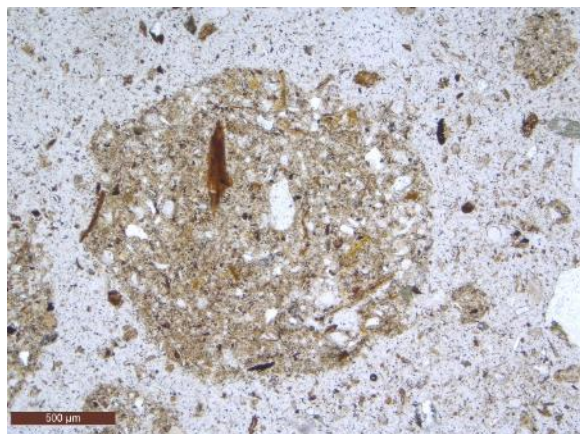
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние криогенеза на формирование почв различных геоморфологических элементов дельты реки Лены. Развитие почв и пространственную организацию почвенного покрова в дельтах рек в значительной степени определяют процессы накопления аллювия, формирования дельтового рельефа, а также деградация криогенных форм рельефа. В дельте реки Лены принято выделять три геоморфологические террасы, которые развивались в период от позднего плейстоцена до наших дней. Формирование наиболее молодых почв (Si1) связано с активным накоплением гумуса в верхних гумусоаккумулятивных горизонтах, периодическим затоплением и привносом биогенных элементов рекой в почву. Здесь формируются травяно-кустарниковые растительные сообщества с преобладанием осоки и ивы. В данных почвах не отмечается активное проявление криогенных процессов, таких как криогенный массообмен, морозное пучение, растрескивание, что обусловлено отепляющим воздействием реки. Верхняя граница мерзлоты наблюдается с 50 см. На территориях, вышедших из зоны активного речного влияния, отмечается трансформация почв под действием криогенеза, а также сукцессия растительных сообществ в сторону зональных вариантов. В результате сукцессии отмечается смена растительных сообществ на мохово-лишайниковые. Низкая биологическая активность приводит к формированию торфяных горизонтов, которые подстилаются криогенными горизонтами CR. Образование мохово-лишайникового покрова и торфяного горизонта в почвах приводит к формированию специфического температурного режима почв, при котором происходит поднятие верхней границы мерзлоты до 20–30 см. В почвах отмечается развитие криогенных процессов, выраженных в криогенном массообмене. Длительное воздействие криогенеза приводит к формированию полигональной тундры, которая в настоящее время подвергается деградации из-за отепляющего влияния реки. Река Лена оказывает существенное влияние на деградацию ММП, что выражается в береговой термоабразии, а также развитии термокарстовых процессов. В ходе влияния термокарстовых процессов происходит деградация полигональной тундры и трансформация мерзлотных почв, которая отражается как в морфологических, так и микроморфологических изменениях.

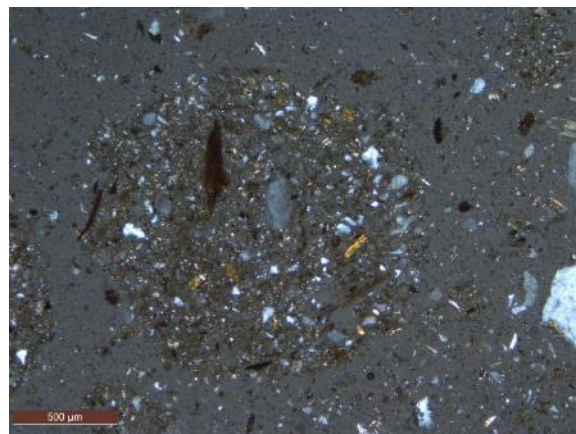
Микроморфологическая структура исследованных почв. Активное влияние реки приводит к накоплению существенного количества аллювиального материала, который вовлекается в процесс почвообразования. Шлиф почвы, формирующейся в зоне активного затопления на высокой пойме, представлен на рисунке 3.

В результате анализа шлифов было отмечено, что микростроение почвенной массы, формирующейся в зоне затопления, характеризуется наличием зерен кварца, слюды, неразложившихся органических остатков, органоминеральных агрегатов, состоящих из кварца, слюды, органических веществ и глинистой плазмы. Зерна кварца имеют признаки окатанности, что обусловлено активным влиянием реки. Органоминеральные агрегаты имеют округло-блоковую и комковатую форму с инкорпорированными растительными остатками различной степени трансформации. Различная степень трансформации обусловлена как привносом свежих растительных остатков рекой, с растительным опадом, так и трансформацией растительных остатков в результате

процессов гумификации. В почвенных шлифах не отмечается наличие железоорганических пленок на поверхности минералов. Наличие крупных зерен кварца указывает на периодический привнос свежих аллювиальных отложений.



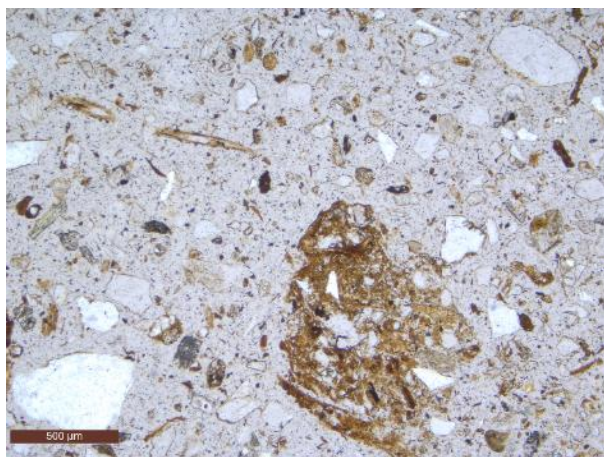
А



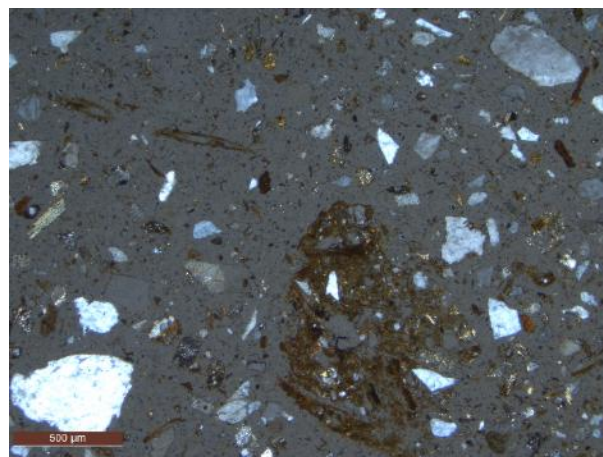
Б

Рисунок 3. Микроморфологическое строение горизонта АУ серогумусовой почвы на аллювиальных песках (Si1) в параллельных (А) и скрещенных (Б) николях. На рисунке изображен коагуляционный агрегат округлой формы.

Почвы, вышедшие из зоны активного речного влияния на первой террасе, характеризуются более длительным развитием по отношению к почвам, формирующимся на высокой пойме. Шлифы почв, формирующихся вне зоны затопления, представлены на рисунках 4–5. Почвы характеризуются более длительными процессами почвообразования и влияния криогенеза.



А



Б

Рисунок 4. Микроморфологическое строение горизонта CR торфяно-криозема на аллювиальных отложениях (S 1-7) в параллельных (А) и скрещенных (Б) николях. На рисунке представлен грубый гумус, зерна кварца, а также слюда.

В изученном шлифе торфяно-криозема (S1-7) отмечается относительно высокое содержание зерен кварца различного размера, что обусловлено влиянием реки. Микростроение почвенной массы представлено зернами кварца, а также агрегатами с округло-блоковой формой. Агрегаты состоят из хорошо разложившегося органического вещества с инкорпорированными в него зернами кварца и существенного количества аморфного тонкодисперсного органического вещества. Относительно высокое содержание крупных зерен кварца может быть объяснено привносом материала под действием криогенного массообмена из материнской породы, а также под влиянием реки.

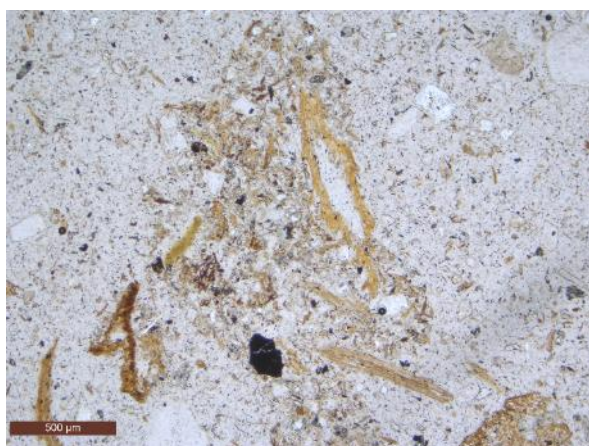
В результате анализа микростроения почвенной массы на различных стадиях формирования полигонов было выявлено, что на ранних стадиях формирования полигонов отмечается слабая проработанность материала; она выражается в присутствии неразложившихся растительных остатков, слюд, а также большого количества зерен кварца, на поверхности которых отмечено наличие трещин, возникающих в результате процессов промерзания и оттаивания. В ходе деградации полигональных структур отмечается формирование агрегатов, состоящих из большого количества зерен кварца, различной степени выветривания, а также ПОВ, состоящего как из неразложившихся растительных остатков, так и тонкодисперсного органического вещества.



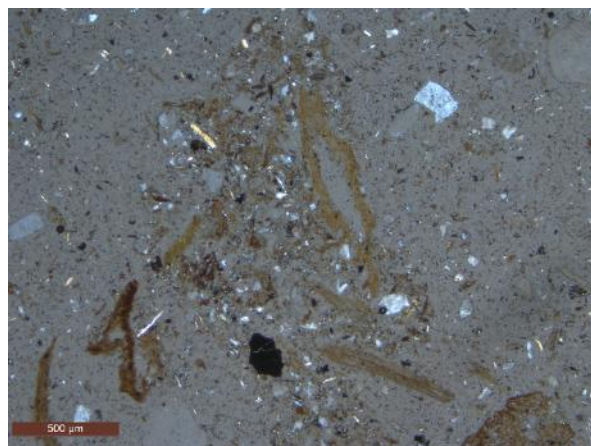
А



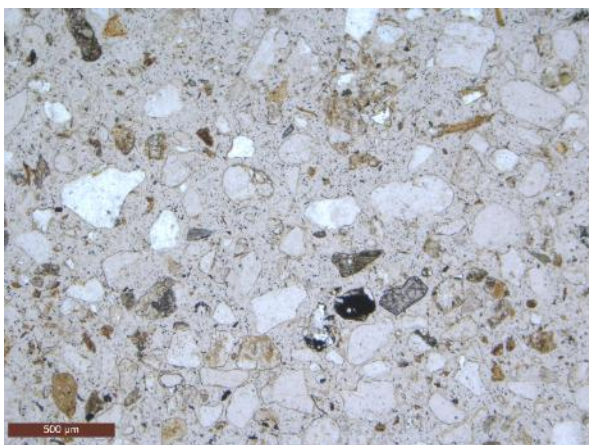
Б



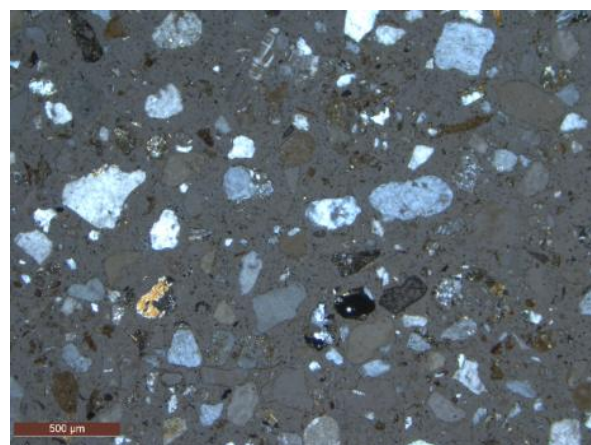
В



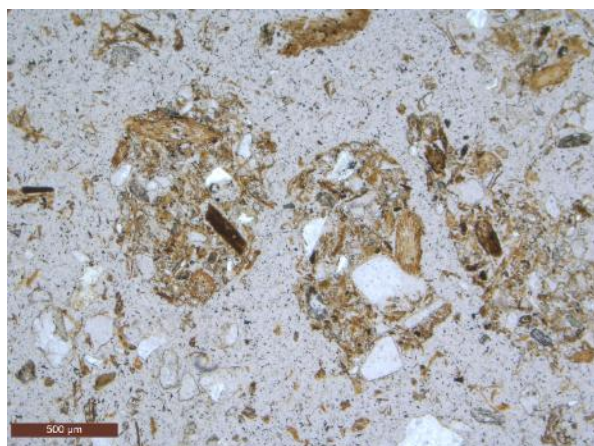
Г



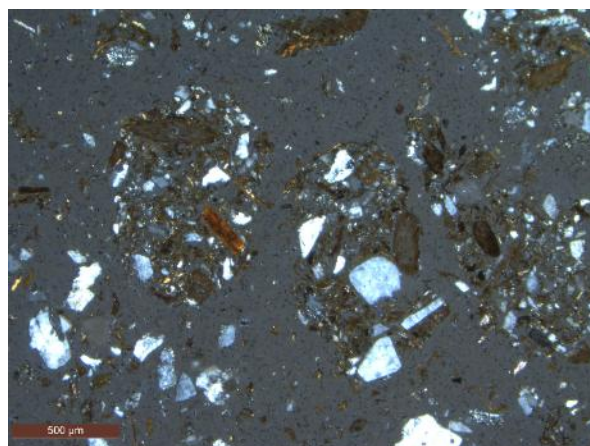
Д



Е



Ж



3

Рисунок 5. Микроморфологическое строение ZP2 CR (А–Б), VG1 CR (В–Г), VALP1 АО (Д–Е), VP1 АО (Ж–З) в параллельных (А, В, Д, Ж) и скрещенных (Б, Г, Е, З) николях. На рисунках А–Б представлены зерна кварца и слюда. На рисунках В–Г показан коагуляционный агрегат неправильной формы, состоящий из органического вещества различной степени трансформации, зерен кварца, а также слюды. На рисунках Д–Е наблюдается хорошо трансформированное органическое вещество, зерна кварца, полевошпат, а также слюда. На рисунках Ж–З продемонстрировано большое количество коагуляционных агрегатов округлой формы, а также зерна кварца и слюда.

Высокая пойма и первая терраса реки являются наиболее молодыми частями дельты реки Лены, где основные процессы, влияющие на развитие почв, характеризуются гумусонакоплением и накоплением аллохтонного материала. Здесь формируются гумусоаккумулятивные горизонты (АО, АУ), а с увеличением времени нахождения вне условий затопления развиваются криогенные горизонты CR. С увеличением возраста почв отмечается более активное влияние криогенных процессов, снижение роли биологического выветривания и возрастание физического (криоэлювиогенез), в результате которого происходит разрушение минеральной части почв под действием процессов промерзания и оттаивания.

Оценка физической стабилизации почвенного органического вещества исследованных почв. Результаты расчета параметров микростроения почв представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры микростроения органоминеральных агрегатов

Образец почв			ZP2	VG1	VP1	Si1
Пространство (%), занятое органическим веществом в шлифах почв			1,6	5,6	12,3	10,8
Микроагрегаты, <250 μm	Площадь, μm^2	min	2,14	2,75	7,84	67,1
		max	14489	155899	28373	36922
		Среднее	1154	871,6	2240	3237
	F _x среднее		45,9	39,4	64,9	75,8
	R _{dn}		0,6	0,5	0,6	0,6
	n		1982	9382	3717	5811
Макроагрегаты, 250-2000 μm	Площадь, mm^2	min	0,006	0,002	0,005	0,008
		max	0,02	0,12	0,28	1,56
		Среднее	0,07	0,02	0,04	0,04
	F _x среднее		311,7	350,1	440,9	397,1
	R _{dn}		0,3	0,3	0,5	0,49
	n		5	118	397	672

Примечание.

F_x – диаметр Ферре, μm ; R_{dn} – индекс округлости (0–1).

Наибольшее содержание органического вещества было обнаружено в образце криозема грубогумусового (VP1), что обусловлено активными темпами накопления грубых форм гумуса в почве. При этом в варианте зарождающегося полигона (ZP2) отмечено наименьшее содержание органического вещества в микростроении, что указывает на слабые процессы перераспределения органического вещества по профилю, накопление органического вещества происходит преимущественно в торфяном горизонте. В результате процессов трансформации полигонов (пучение, растрескивание) происходит перераспределение по профилю почв органического вещества, которое может быть подвержено биodeградации.

Анализ содержания микроагрегатов показал, что наибольшее их количество отмечено в образце почв из вогнутого полигона (VG1), который находится на ранней стадии деградации. Это может указывать как на разрушение макроагрегатов, так и на процесс гумификации растительных остатков, что приводит к стабилизации органического вещества. Высокий уровень содержания микроагрегатов также отмечен в почве затапливаемых территорий (Si1), что обусловлено активными процессами трансформации органического вещества. Это подтверждается тем, что в образце почв с затапливаемых территорий отмечено наибольшее содержание макроагрегатов, которые формируются в условиях активной гумификации. Отмечено увеличение содержания макроагрегатов в исследованных шлифах в результате деградации полигональных структур, указывающее на уменьшение стабильного пула углерода в почвах подверженных деградации.

Согласно полученным данным, во всех изученных почвах и отложениях преобладают микроагрегаты ($<250\ \mu\text{m}$). Доминирование данной фракции указывает на характерный этап физической стабилизации и увеличения времени нахождения органического вещества в составе агрегатов (Semenov et al., 2020). Относительно большое содержание макроагрегатов может быть результатом взаимодействия грубых форм гумуса с минеральной матрицей почв; данные агрегаты активно колонизируются микроорганизмами и могут быть подвержены биodeградации (Six, Paustian, 2014). Исследования показывают, что взаимодействие ПОВ с минералами и формирование почвенных агрегатов является важным механизмом, замедляющим трансформацию органического вещества (Six et al., 2002). Однако активность данного процесса варьирует в зависимости от типа почвы, влажности и температуры (Jilková et al., 2021). Криотурбация, характерная для арктических почв, оказывает двойственное влияние на трансформацию органических веществ (Gubin, 2016), способствуя как перемешиванию ПОВ, так и разрушению агрегатов (Lupachev et al., 2017). Понимание этих сложных взаимодействий необходимо для прогнозирования динамики ПОВ и разработки стратегии смягчения выбросов углерода из арктических почв в условиях меняющегося климата (Bruhwiler et al., 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования было выявлено, что влияние реки и криогенеза приводит к существенной трансформации почв и ландшафтов в дельте реки Лены. Это выражается в темпах трансформации органоминеральной матрицы почв, формировании органоминеральных агрегатов, а также степени проявления почвенного криогенеза. Анализ микростроения почв показал, что почвы, находящиеся под активным влиянием реки, характеризуются формированием агрегатов, состоящих из органического материала с различной степенью разложения, зерен кварца, слюды и полевого шпата. Наличие крупных зерен кварца и слюды указывает на относительно низкую степень проработанности материала, а также на аллювиальный привнос данных минералов; однако активные процессы гумификации и поступление в почву продуктов разложения органического вещества приводят к формированию органоминеральных агрегатов. Почвы, вышедшие из-под активного влияния реки, характеризуются гетерогенным строением, которое зависит от активности криогенеза и степени деградации ММП. Высвобождение органоминерального материала из мерзлого состояния может существенным образом влиять на трансформацию ландшафта и приводить к потере ПОВ. Оценка параметров микростроения органоминеральных агрегатов показала, что деградация ММП и развитие термокарстовых процессов может приводить к снижению стабильного пула углерода и высвобождению из мерзлого состояния ПОВ, которое может быть подвержено биodeградации.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке СПбГУ (проект № 123042000071-8).

ЛИТЕРАТУРА

- Василевич Р.С., Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д. Молекулярная структура гумусовых веществ мерзлотных бугристых торфяников лесотундры // Почвоведение. 2019. № 3. С. 317–329. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19010167>
- Герасимова М.И., Ковда И.В., Лебедева М.П., Турсина Т.В. Микроморфологические термины как отражение современного состояния исследований микростроения почв // Почвоведение. 2011. № 7. С. 804–817.
- Лодыгин Е.Д., Василевич Р.С. Молекулярно-массовое распределение гумусовых кислот таёжных почв // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 4. С. е160. <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.160>
- Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: арктическая зона, мерзлотные почвы – будущему России (сельское и лесное хозяйство)» / под редакцией Р.С.-Х. Эдельгериева и А.Л. Иванова. Том 4. Москва: ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», 2024. 672 с.
- Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Паутова Н.Б., Хромычкина Д.П., Ковалев И.В., Ковалева Н.О. Взаимосвязь размера агрегатов, содержания дисперсного органического вещества и разложения растительных остатков в почве // Почвоведение. 2020. № 4. С. 430–443. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20040139>
- Baldock J.A., Skjemstad J.O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack // Organic geochemistry. 2000. Vol. 31. No. 7–8. P. 697–710. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00049-8)
- Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M., Bolshiyanov D., Langer M., Lange S., Bornemann N., Morgenstern A., Schreiber P., Wille C., Chadburn S., Gouttevin I., Burke E., Kutzbach L. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active-layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River delta, northern Siberia: An opportunity to validate remote-sensing data and land surface, snow, and permafrost models // Earth System Science Data. 2019. Vol. 11. P. 261–299. <https://doi.org/10.5194/essd-11-261-2019>
- Bruhwiler L., Parmentier F.J.W., Crill P., Leonard M., Palmer P. I. The Arctic Carbon Cycle and Its Response to Changing Climate // Curr Clim Change Rep. 2021. Vol. 7. P. 14–34. <https://doi.org/10.1007/s40641-020-00169-5>
- Dai X.Y., Ping C.L., Michaelson G.J. Characterizing soil organic matter in Arctic tundra soils by different analytical approaches // Organic Geochemistry. 2002. Vol. 33. No. 4. P. 407–419. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00012-8)
- Dao T.T., Gentsch N., Mikutta R., Sauheitl L., Shibistova O., Wild B., Schneckner J., Bárta J., Čapek P., Gittel A., Lashchinskiy N., Urich T., Šantrůčková H., Richter A., Guggenberger G. Fate of carbohydrates and lignin in north-east Siberian permafrost soils // Soil Biology and Biochemistry. 2018. Vol. 116. P. 311–322. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.032>
- Gubin S.V. Role of cryogenic processes in the organization of soils at macro-, meso- and micro-levels // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2016. №. 86. P. 53–63. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-53-63>
- Hugelius G., Loisel J., Chadburn S., Jackson R.B., Jones M., MacDonald G., Marushchak M., Olefeldt D., Packalen M., Siewert M.B., Treat C., Turetsky M., Voigt C., Yu Z. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. Vol. 117. No. 34. P. 20438–20446. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916387117>
- Islam M.R., Singh B., Dijkstra F.A. Stabilisation of soil organic matter: interactions between clay and microbes // Biogeochemistry. 2022. Vol. 160. P. 145–158. <https://doi.org/10.1007/s10533-022-00956-2>
- Jílková V., Devetter M., Bryndová M., Hájek T., Kotas P., Luláková P., Meador T., Navrátilová D., Saccone P., Macek P. Carbon sequestration related to soil physical and chemical properties in the high Arctic // Global Biogeochemical Cycles. 2021. Vol. 35. No. 9. ID. e2020GB006877. <https://doi.org/10.1029/2020GB006877>
- Kartozia A. Assessment of the Ice Wedge Polygon Current State by Means of UAV Imagery Analysis (Samoylov Island, the Lena Delta) // Remote Sensing. 2019. Vol. 11(13). ID. 1627. <https://doi.org/10.3390/rs11131627>
- Kleber M., Eusterhues K., Keiluweit M., Mikutta C., Mikutta R., Nico P.S. Mineral-organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments // Advances in Agronomy. 2015. Vol. 130. P. 1–140. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.005>

- Loisel J., Yu Z., Beilman D., Camill P., Alm J., Amesbury M.J., Anderson D., Andersson S., Bochicchio C., Barber K., Belyea L.R., Bunbury J., Chambers F.M., Charman D.J., De Vleeschouwer F. A database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation // *Holocene*. 2014. Vol. 24. No. 9. P. 1028–1042. <https://doi.org/10.1177/0959683614538073>
- Lupachev A., Abakumov E., Gubin S. The Influence of Cryogenic Mass Exchange on the Composition and Stabilization Rate of Soil Organic Matter in Cryosols of the Kolyma Lowland (North Yakutia, Russia) // *Geosciences*. 2017. Vol. 7. No. 2. P. 24. <https://doi.org/10.3390/geosciences7020024>
- Mishra U., Hugelius G., Shelef E., Yang Y., Strauss J., Lupachev A., Harden J.W., Jastrow J.D., Ping C.-L., Riley W.J., Schuur E.A.G., Matamala R., Siewert M., Nave L.E., Koven C.D., Fuchs M., Palmtag J., Kuhry P., Treat C.C., Zubrzycki S., Hoffman F.M., Elberling B., Camill P., Veremeeva A., Orr A. Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks // *Science advances*. 2021. Vol. 7. No. 9. ID. eaaz5236. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5236>
- Natali S.M., Watts J.D., Rogers B.M., Potter S., Ludwig S.M., Selbmann A.-K., Sullivan P.F., Abbott B.W., Arndt K.A., Birch L., Björkman M.P., Bloom A.A., Celis G., Christensen T.R., Christiansen C.T., Commene R., Cooper E.J., Crill P., Czimczik C., Davydov S., Du J., Egan J.E., Elberling B.O., Euskirchen E.S., Friborg T., Genet H., Göckede M., Goodrich J.P., Grogan P., Helbig M., Jafarov E.E., Jastrow J.D., Kalhori A.A.M., Kim Y., Malhotra A. Large loss of CO₂ in winter observed across the northern permafrost region // *Nature Climate Change*. 2019. Vol. 9. P. 852–857. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0592-8>
- Oades J.M., Waters A.G. Aggregate hierarchy in soils // *Australian Journal of Soil Research*. 1991. Vol. 29. No. 6. P. 815–828. <https://doi.org/10.1071/SR9910815>
- Overland J.E., Wang M. When will the summer Arctic be nearly sea ice free? // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40. No. 10. P. 2097–2101. <https://doi.org/10.1002/grl.50316>
- Plaza C., Pegoraro E., Bracho R., Celis G., Crummer K.G., Hutchings J.A., Hicks Pries C.E., Mauritz M., Natali S.M., Salmon V.G., Schädel C., Webb E.E., Schuur E.A.G. Direct observation of permafrost degradation and rapid soil carbon loss in tundra // *Nature Geoscience*. 2019. Vol. 12. No. 8. P. 627–631. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0387-6>
- Polyakov V., Abakumov E., Lodygin E., Vasilevich R. Molecular Weight Distribution of Humic Acids Isolated from Buried Soils and Yedoma Sediments // *Agronomy*. 2023a. Vol. 13. No. 6. ID 1483. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061483>
- Polyakov V., Lupachev A., Gubin S., Abakumov E. Soil Organic Matter of Tidal Marsh Permafrost-Affected Soils of Kolyma Lowland // *Agronomy*. 2023b. Vol. 13. No. 1. ID. 48. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010048>
- Post E., Alley R.B., Christensen T.R., Macias-Fauria M., Forbes B.C., Gooseff M.N., Iler A., Kerby J.T., Laidre K.L., Mann M.E., Olofsson J., Stroeve J.C., Ulmer F., Virginia R.A., Wang M. The polar regions in a 2°C warmer world // *Science Advances*. 2019. Vol. 5. No. 12. ID. eaaw9883 <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9883>
- Sanders T., Fiencke C., Fuchs M., Haugk C., Juhls B., Mollenhauer G., Ogneva O., Overduin P., Palmtag J., Povazhniy V., Strauss J., Tuerena R., Zell N., Dähnke K. Seasonal nitrogen fluxes of the Lena River Delta // *Ambio*. 2022. Vol. 51. P. 423–438. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01665-0>
- Sarker J.R., Singh B.P., Cowie A.L., Fang Y., Collins D., Dougherty W.J., Singh B.K. Carbon and nutrient mineralisation dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues // *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. Vol. 116. P. 22–38. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.030>
- Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natali S.M., Olefeldt D., Romanovsky V.E., Schaefer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. Vol. 520 (7546). P. 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Singh P., Benbi D.K. Physical and chemical stabilization of soil organic matter in cropland ecosystems under rice–wheat, maize–wheat and cotton–wheat cropping systems in northwestern India // *Carbon Management*. 2021. Vol. 12. No. 6. P. 603–621. <https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1992505>
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils // *Plant and Soil*. 2002. Vol. 241. P. 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Six J., Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool // *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. Vol. 68. P. A4–A9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.014>
- Stoops G. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2020. 248 p.

Szymański S. Chemistry and spectroscopic properties of surface horizons of Arctic soils under different types of tundra vegetation – a case study from the Fuglebergsletta coastal plain (SW Spitsbergen) // *Catena*. 2017. Vol. 156. P. 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.024>

Szymański W., Drewnik M., Stolarczyk M., Musielok L., Gus-Stolarczyk M., Skiba M. Occurrence and stability of organic intercalation in clay minerals from permafrost-affected soils in the High Arctic – A case study from Spitsbergen (Svalbard) // *Geoderma*. 2022. Vol. 408. ID. 115591. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115591>

Tarnocai C.J., Canadell G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles*. 2009. Vol. 23. No. 2. P. 1–11. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>

Поступила в редакцию 21.03.2025

Принята 14.05.2025

Опубликована 17.05.2025

Сведения об авторах:

Поляков Вячеслав Игоревич – младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра прикладной экологии (Санкт-Петербург, Россия); slavon6985@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6171-3221>

Абакумов Евгений Васильевич – доктор биологических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра прикладной экологии (Санкт-Петербург, Россия); e_abakumov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5248-9018>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Micromorphological features of organic and mineral parts of tundra soils in the Lena river delta

© 2025 V. I. Polyakov , E. V. Abakumov 

Saint Petersburg State University, Department of Applied Ecology, 29 16th Line V.O., Saint Petersburg, Russia

E-mail: slavon6985@gmail.com; e_abakumov@mail.ru

The aim of the study was to define the unique micromorphological properties and mechanisms responsible for the development of stable organomineral pedofeatures in the soils of the Lena River Delta.

Location and time of the study. The study area is located on Samoylovsky Island and a newly formed, Ivovyi island in the Lena River Delta, Yakutia, Russia. Fieldwork was conducted during the summer field season of 2021.

Methods. Standard micromorphological methods were employed for soil analysis. Determination of minerals took place on polarisation microscope Leica DM750P, calculation of organomineral particles took place in software complex ImageJ ver. 1.54m.

Results. This study identified key patterns in the influence of cryogenesis and river activity on soil formation within the first terrace of the Lena River delta. On micromorphological level it was revealed that soils under river influence are characterized by large organomineral aggregates composed of thin organic matter, quartz, mica, and undecomposed plant residues. The formation of these organomineral aggregates is attributed to active humification of plant residues and a limited influence of cryogenesis. Soils out of the active floodplain exhibit a prevalence of undecomposed plant residues, indicating slow rates of organic matter transformation. Under the conditions of degradation of polygonal structures, active processes of cryogenic mass exchange and cracking are observed, which lead to the destruction of the organomineral matrix of soils and release of organic matter from the frozen state. According to the assessment of physical stabilisation of SOM, it was found that the degradation of polygonal structures can lead to a reduction in the stable carbon pool in soils due to the active occurrence of cryogenic processes, thus increasing the potential labile carbon pool, which can be subject to biodegradation.

Conclusions. As a result of the river action and cryogenic processes in the Lena River delta there is a significant transformation of soils, which is associated with the features of organic matter accumulation and formation of organomineral matrix of soils. The analysis of soil microstructure composition has shown that in soils under the active influence of the river the formation of organomineral pedofeatures takes place, despite the low degree of elaboration of the material. In soils out of annual flooding, thermokarst processes result in the release of soil organic matter, which increases the risk of biodegradation. Permafrost degradation demonstrates the vulnerability of cryogenic soils to carbon loss under climate change.

Keywords: organomineral aggregates; soil mineral matrix; organic matter stabilisation; soils of the Lena Delta; Yakutia; Arctic.

How to cite: Polyakov V.I., Abakumov E.V. Micromorphological features of organic and mineral parts of tundra soils in the Lena river delta. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(1). e306. DOI: [10.31251/pos.v8i1.306](https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.306) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The study was financially supported by St. Petersburg State University (project No. 123042000071-8).

REFERENCES

- Vasilevich R.S., Beznosikov V.A., Lodygin E.D. Molecular structure of humus substances in permafrost peat mounds in forest-tundra. *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 3. P. 283–295. <https://doi.org/10.1134/S1064229319010150>
- Gerasimova M.I., Kovda I.V., Lebedeva M.P., Tursina T.V. Micromorphological terms: The state of the art in soil microfabric research. *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol. 44. No. 7. P. 739–752. <https://doi.org/10.1134/S1064229311070052>
- Lodygin E.D., Vasilevich R.S. Molecular-mass distribution of humus acids of taiga soils. *The Journal of Soils and Environment*. 2021. Vol. 4. № 4. P. e160. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.160>
- National report "Global climate and soil cover of Russia: Arctic zone, permafrost soils – to the future of Russia (agriculture and forestry)" / edited by R.S.-Kh. Edelgeriev and A.L. Ivanov. Vol. 4. Moscow: Soil Institute named by V.V. Dokuchaev, 2024. 672 p. (in Russian).
- Semenov V.M., Lebedeva T.N., Pautova N.B., Khromyckina D.P., Kovalev I.V., Kovaleva N.O. Relationships between the Size of Aggregates, Particulate Organic Matter Content, and Decomposition of Plant Residues in Soil. *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53. No. 4. P. 454–466. <https://doi.org/10.1134/S1064229320040134>
- Baldock J.A., Skjemstad J.O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic geochemistry*. 2000. Vol. 31. No. 7–8. P. 697–710. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00049-8)
- Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M., Bolshiyarov D., Langer M., Lange S., Bornemann N., Morgenstern A., Schreiber P., Wille C., Chadburn S., Gouttevin I., Burke E., Kutzbach L. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active-layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River delta, northern Siberia: An opportunity to validate remote-sensing data and land surface, snow, and permafrost models. *Earth System Science Data*. 2019. Vol. 11. P. 261–299. <https://doi.org/10.5194/essd-11-261-2019>
- Bruhwiller L., Parmentier F.J.W., Crill P., Leonard M., Palmer P. I. The Arctic Carbon Cycle and Its Response to Changing Climate. *Curr Clim Change Rep*. 2021. Vol. 7. P. 14–34. <https://doi.org/10.1007/s40641-020-00169-5>
- Dai X.Y., Ping C.L., Michaelson G.J. Characterizing soil organic matter in Arctic tundra soils by different analytical approaches. *Organic Geochemistry*. 2002. Vol. 33. No. 4. P. 407–419. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00012-8)
- Dao T.T., Gentsch N., Mikutta R., Sauheitl L., Shibistova O., Wild B., Schnecker J., Bárta J., Čapek P., Gittel A., Lashchinskiy N., Urich T., Šantrůčková H., Richter A., Guggenberger G. Fate of carbohydrates and lignin in north-east Siberian permafrost soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. Vol. 116. P. 311–322. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.032>
- Gubin S.V. Role of cryogenic processes in the organization of soils at macro-, meso- and micro-levels. *Dokuchaev Soil Bulletin (Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva)*. 2016. No. 86. P. 53–63. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-53-63>
- Hugelius G., Loisel J., Chadburn S., Jackson R.B., Jones M., MacDonald G., Marushchak M., Olefeldt D., Packalen M., Siewert M.B., Treat C., Turetsky M., Voigt C., Yu Z. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117. No. 34. P. 20438–20446. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916387117>
- Islam M.R., Singh B., Dijkstra F.A. Stabilisation of soil organic matter: interactions between clay and microbes. *Biogeochemistry*. 2022. Vol. 160. P. 145–158. <https://doi.org/10.1007/s10533-022-00956-2>

- Jílková V., Devetter M., Bryndová M., Hájek T., Kotas P., Luláková P., Meador T., Navrátilová D., Saccone P., Macek P. Carbon sequestration related to soil physical and chemical properties in the high Arctic. *Global Biogeochemical Cycles*. 2021. Vol. 35. No. 9. ID. e2020GB006877. <https://doi.org/10.1029/2020GB006877>
- Kartozziia A. Assessment of the Ice Wedge Polygon Current State by Means of UAV Imagery Analysis (Samoylov Island, the Lena Delta). *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11(13). ID. 1627. <https://doi.org/10.3390/rs11131627>
- Kleber M., Eusterhues K., Keiluweit M., Mikutta C., Mikutta R., Nico P.S. Mineral-organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments. *Advances in Agronomy*. 2015. Vol. 130. P. 1–140. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.005>
- Loisel J., Yu Z., Beilman D., Camill P., Alm J., Amesbury M.J., Anderson D., Andersson S., Bochicchio C., Barber K., Belyea L.R., Bunbury J., Chambers F.M., Charman D.J., De Vleeschouwer F. A database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation. *Holocene*. 2014. Vol. 24. No. 9. P. 1028–1042. <https://doi.org/10.1177/0959683614538073>
- Lupachev A., Abakumov E., Gubin S. The Influence of Cryogenic Mass Exchange on the Composition and Stabilization Rate of Soil Organic Matter in Cryosols of the Kolyma Lowland (North Yakutia, Russia). *Geosciences*. 2017. Vol. 7. No. 2. P. 24. <https://doi.org/10.3390/geosciences7020024>
- Mishra U., Hugelius G., Shelef E., Yang Y., Strauss J., Lupachev A., Harden J.W., Jastrow J.D., Ping C.-L., Riley W.J., Schuur E.A.G., Matamala R., Siewert M., Nave L.E., Koven C.D., Fuchs M., Palmtag J., Kuhry P., Treat C.C., Zubrzycki S., Hoffman F.M., Elberling B., Camill P., Veremeeva A., Orr A. Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks. *Science advances*. 2021. Vol. 7. No. 9. ID. eaaz5236. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5236>
- Natali S.M., Watts J.D., Rogers B.M., Potter S., Ludwig S.M., Selbmann A.-K., Sullivan P.F., Abbott B.W., Arndt K.A., Birch L., Björkman M.P., Bloom A.A., Celis G., Christensen T.R., Christiansen C.T., Commene R., Cooper E.J., Crill P., Czimczik C., Davydov S., Du J., Egan J.E., Elberling B.O., Euskirchen E.S., Friborg T., Genet H., Göckede M., Goodrich J.P., Grogan P., Helbig M., Jafarov E.E., Jastrow J.D., Kalhori A.A.M., Kim Y., Malhotra A. Large loss of CO₂ in winter observed across the northern permafrost region. *Nature Climate Change*. 2019. Vol. 9. P. 852–857. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0592-8>
- Oades J.M., Waters A.G. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research*. 1991. Vol. 29. No. 6. P. 815–828. <https://doi.org/10.1071/SR9910815>
- Overland J.E., Wang M. When will the summer Arctic be nearly sea ice free? *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40. No. 10. P. 2097–2101. <https://doi.org/10.1002/grl.50316>
- Plaza C., Pegoraro E., Bracho R., Celis G., Crummer K.G., Hutchings J.A., Hicks Pries C.E., Mauritz M., Natali S.M., Salmon V.G., Schädel C., Webb E.E., Schuur E.A.G. Direct observation of permafrost degradation and rapid soil carbon loss in tundra. *Nature Geoscience*. 2019. Vol. 12. No. 8. P. 627–631. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0387-6>
- Polyakov V., Abakumov E., Lodygin E., Vasilevich R. Molecular Weight Distribution of Humic Acids Isolated from Buried Soils and Yedoma Sediments. *Agronomy*. 2023a. Vol. 13. No. 6. ID 1483. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061483>
- Polyakov V., Lupachev A., Gubin S., Abakumov E. Soil Organic Matter of Tidal Marsh Permafrost-Affected Soils of Kolyma Lowland. *Agronomy*. 2023b. Vol. 13. No. 1. ID. 48. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010048>
- Post E., Alley R.B., Christensen T.R., Macias-Fauria M., Forbes B.C., Gooseff M.N., Iler A., Kerby J.T., Laidre K.L., Mann M.E., Olofsson J., Stroeve J.C., Ulmer F., Virginia R.A., Wang M. The polar regions in a 2°C warmer world. *Science Advances*. 2019. Vol. 5. No. 12. ID. eaaw9883 <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9883>
- Sanders T., Fiencke C., Fuchs M., Haugk C., Juhls B., Mollenhauer G., Ogneva O., Overduin P., Palmtag J., Povazhniy V., Strauss J., Tuerena R., Zell N., Dähnke K. Seasonal nitrogen fluxes of the Lena River Delta. *Ambio*. 2022. Vol. 51. P. 423–438. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01665-0>
- Sarker J.R., Singh B.P., Cowie A.L., Fang Y., Collins D., Dougherty W.J., Singh B.K. Carbon and nutrient mineralisation dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues. *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. Vol. 116. P. 22–38. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.030>
- Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natali S.M., Olefeldt D., Romanovsky V.E., Schaefer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*. 2015. Vol. 520 (7546). P. 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Singh P., Benbi D.K. Physical and chemical stabilization of soil organic matter in cropland ecosystems under rice–wheat, maize–wheat and cotton–wheat cropping systems in northwestern India. *Carbon Management*. 2021. Vol. 12. No. 6. P. 603–621. <https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1992505>

- Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*. 2002. Vol. 241. P. 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Six J., Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. Vol. 68. P. A4–A9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.014>
- Stoops G. *Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*. NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2020. 248 p.
- Szymański S. Chemistry and spectroscopic properties of surface horizons of Arctic soils under different types of tundra vegetation – a case study from the Fuglebergsletta coastal plain (SW Spitsbergen). *Catena*. 2017. Vol. 156. P. 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.024>
- Szymański W., Drewnik M., Stolarczyk M., Musielok L., Gus-Stolarczyk M., Skiba M. Occurrence and stability of organic intercalation in clay minerals from permafrost-affected soils in the High Arctic – A case study from Spitsbergen (Svalbard). *Geoderma*. 2022. Vol. 408. ID. 115591. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115591>
- Tarnocai C.J., Canadell G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*. 2009. Vol. 23. No. 2. P. 1–11. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>

Received 21 March 2025

Accepted 14 May 2025

Published 17 May 2025

About the authors:

Vyacheslav I. Polyakov – junior research, Department of Applied Ecology, Saint Petersburg State University (St. Petersburg, Russia); slavon6985@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6171-3221>

Evgeny V. Abakumov – Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Applied Ecology, Saint Petersburg State University (St. Petersburg, Russia); e_abakumov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5248-9018>

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)