**ОСОБЕННОСТИ ГУМУСООБРАЗОВАНИЯ В ПОЧВАХ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ЛЕНЫ**© 2021 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: выявить особенности формирования и степени гумификации органических остатков, а также структурно-функциональной организации гумуса в почвах дельты реки Лены.

Место и время проведения. Острова Самойловский и Сардах, дельта реки Лены, Якутия, Россия. Полевые работы проводились в летний полевой сезон 2019 года.

Объекты и методы. Объектами исследования послужили почвы дельты реки Лены: в затопляемой зоне острова Самойловский – стратозем серогумусовый (*Subaquatic Fluvisol (Arenic)*); в незатопляемой зоне острова Сардах – криозем грубогумусированный (*Histic Cryosol (Siltic)*). Использовались общепринятые понятия терминов «органическое вещество почв», «гумус», «гумусовые вещества», сочетание традиционных и новых методов исследования почв и гумуса, в том числе химико-аналитический, седиментационный, микроморфологический, а также CP/MAS ¹³C-ЯМР спектроскопия.

Основные результаты. Были выявлены основные закономерности микроморфологической организации почв, в том числе состояние в них органических остатков и гумуса. Почвы, находящиеся под влиянием поемного процесса, характеризуются наличием грубого аморфного гумуса. В микростроении исследуемых почв, которые формируются вне поемного процесса, отмечено образование пылевато-песчаных микроагрегатов. В таких микроагрегатах гумус закреплён в составе минеральных компонентов, представленных частицами кварца, различных слюд и Mn-Fe конкреций, и находится в стабильном состоянии (физическая стабилизация гумуса). Согласно ¹³C ЯМР спектроскопии в гуминовых веществах почв накапливается до 37% ароматических структурных фрагментов, что может указывать на развитие процесса конденсации при формировании макромолекул гуминовых кислот (ГК) и свидетельствовать об относительно высоком уровне стабилизации гумуса в почвах дельты реки Лены.

Заключение. В результате исследований установлено, что в поемных условиях гумус представлен грубыми аморфными формами, вне влияния поемного процесса он закрепляется в минеральных микроагрегатах. Специфика состава гуминовых кислот в районе исследований определяется сочетанием биоклиматических условий, криогенных процессов и составом прекурсоров гумификации. Наличие высокой доли ароматических структурных фрагментов в гумусовых веществах позволяет предполагать относительно стабильное состояние гумуса в почвах дельты реки Лены в период проводимых исследований, который обусловлен возможным развитием конденсации гуминовых кислот.

Ключевые слова: полярные почвы; гумус; гуминовые вещества; ¹³C ЯМР-спектроскопия; микроморфология почв; дельта реки Лены; Арктика

Цитирование: Поляков В.И., Абакумов Е.В. Особенности гумусообразования в почвах дельты реки Лены // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 4. e163. doi: [10.31251/pos.v4i4.163](https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.163)

ВВЕДЕНИЕ

Гумус почвы – это продукт, который аккумулируется в почве в ходе разложения и гумификации разнообразных органических остатков (Пономарева, Плотникова, 1980; Орлов, 1996). Он является ключевым компонентом глобального цикла углерода в атмосфере, педосфере и гидросфере (Тюрин, 1943; Кононова, 1963; Александрова, 1970; Schimel, 1995; Davis, 2001; Dutta et al., 2006). Гумус поддерживает ключевые функции почвы и обеспечивает имплементацию таких экосистемных услуг, как регулирование климата, круговорота питательных веществ и производства первичной продукции, поскольку он имеет решающее значение для стабилизации структуры почвы, регулирования режимов питания растений, а также для обеспечения проникновения воды и ее хранения в почве (Чертов 1966; Добровольский, 2003). Почвы представляют собой крупнейший поверхностный резервуар органического углерода на Земле. Из-за местных геогенных особенностей, климатических условий и землепользования почвы демонстрируют различные уровни стабилизации гумусовых веществ (Dai et al., 2002; Kutzbach et

al., 2004; Voike et al., 2013). Под стабилизацией органического вещества почв мы понимаем увеличение доли ароматических соединений в составе гуминовых веществ, которые являются по отношению к алифатическим соединениям более устойчивыми к биodeградации. По оценкам, наибольшее количество гумуса, в том числе и в виде грубодисперсного материала, аккумулировано в почвах северного полярного биома (выше 50° с.ш.) в составе многолетнемерзлых пород (ММП), в которых содержится более чем 1024 Пг (1 Пг = 10¹³ кг) органических остатков в почвенном слое до 3 м, а также 34 Пг азота (Jones et al., 2010; Zubrzycki et al., 2013; Zubrzycki et al., 2014). Зона влияния ММП в педосфере занимает площадь более 8,6 млн км², что составляет около 27% всей площади суши выше 50° с.ш. В полярных почвах гумус представлен, в основном, в виде грубодисперсных аморфных растительных остатков и из-за низких температур отличается низкой степенью трансформации и медленной деградацией (Cauwet, Sidorov, 1996; Ejarque, Abakumov, 2016). Это приводит к аккумуляции и депонированию преимущественно слабо разложенных органических остатков (Чертов, Надпорожская, 2018). Роль грубодисперсного гумуса в обеспечении стабильности гумусферы оценена лишь поверхностно.

В ходе минерализации растительных остатков и гумуса в атмосферу выделяются парниковые газы. При относительно высоких скоростях этого процесса почвы могут стать основными эмитентами парниковых газов в атмосферу и внести значительный вклад в климатический кризис на нашей планете (Knoblauch et al., 2013).

Для исследования механизмов стабилизации гумуса в почвах используются методы анализа молекулярного состава гуминовых веществ (Lodygin et al., 2014; Chukov et al., 2015; Ejarque, Abakumov, 2016). Гуминовые вещества представляют собой совокупность высоко- и низкомолекулярных соединений, образующихся в результате разложения остатков растений и животных в наземных и водных экосистемах. Биоклиматические условия, содержание и качество компонентов прекурсоров гумификации, а также локальное положение в ландшафте определяют разнообразие состава и свойств гуминовых веществ (Дергачева и др., 2012; Дергачева, 2018; Lodygin et al., 2014; Chukov et al., 2015; Ejarque, Abakumov, 2016). Для исследования гуминовых кислот (ГК) гумуса почв применяются различные методы, помимо классических анализов группового, фракционного состава, также существует много современных инструментальных методов изучения состава ГК (Lodygin et al., 2014; Ejarque, Abakumov, 2016; Yao et al., 2019). Среди информативных и часто применяемых в исследовании гумуса методов выделяются инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье, кросс-поляризация, молекулярная флуоресцентная спектроскопия и спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (Chen et al., 2002; Coccozza et al., 2003). Одним из наиболее информативных методов исследования ГК почв являются одномерные (1D) твердотельные спектры ядерного магнитного резонанса (¹³C ЯМР), которые предоставляют определенную структурную информацию о ГК, включая количественное определение различных типов химических групп (Dai et al., 2002; Lodygin et al., 2014; Chukov et al., 2015; Ejarque, Abakumov 2016; Lupachev et al., 2017). Достоинством метода 1D ЯМР спектроскопии является возможность количественного определения отдельных и структурных фрагментов в гуминовых кислотах. К настоящему времени исследования качества гумуса из почв и отложений полярных регионов показали, что органические молекулы в составе гуминовых кислот содержат большую часть химической природы прекурсоров гумификации (Dziadowiec et al., 1994; Holland, Alam 2006; Cao et al., 2014; Burdelnaya et al., 2014). Биоклиматические условия в полярных регионах определяют почвообразование и специфичность состава ГК, однако высокое разнообразие последних, низкая и неоднозначная степень их изученности в разных регионах, а также использование только классических методов изучения органического вещества не позволяют определить молекулярный состав ГК в полярных почвах с высокой степенью достоверности.

Образование и трансформация ГК – сложный процесс, в который вовлечена группа факторов, таких как климат, состав и активность микробиологического сообщества, качество прекурсоров гумификации, pH и гидрофобность окружающей среды (Schmidt et al., 2011; Lodygin et al., 2014; Ejarque, Abakumov 2016; Lupachev et al., 2017). Это определяет актуальность использования еще одного из методов изучения особенностей формирования гумуса – оптический метод анализа микроорганизации строения почвы (Гагарина 2004; Stolt, Lindbo, 2010). Исходя из микроморфологических характеристик почвы, основанных на форме микросложения, типе ориентации, формах гумуса, можно судить об устойчивости гумуса почв к минерализации (Когут и др., 2016). Данный метод также позволяет выделить степень трансформации почв под действием

различных факторов почвообразования (Szymański et al., 2015; Конищев, Рогов, 1977). В результате низкой степени трансформации растительных остатков, в почве захораниваются их дериваты в виде отдельных растительных тканей, а также остатков растительных клеток (Stolt, Lindbo, 2010). Принято считать, что вовлеченные в микроагрегаты органические остатки в меньшей степени доступны для минерализации, что обусловлено высокими энергетическими затратами микроорганизмов и растений для трансформации органо-минеральных агрегатов (Когут и др., 2016). Таким образом, микроорганизмы и растения в первую очередь будут участвовать в трансформации свободных аморфных растительных скоплений.

Полярные почвы играют ключевую роль в формировании углеродного баланса, поскольку они содержат максимальные запасы гумуса в пределах всей педосферы (Dai et al., 2002; Zubrzycki et al., 2014). Накопление органического углерода в профиле арктических почв связано с процессами образования *in situ* из остатков корней, а также криогенеза и ретинизации гумуса. Большое содержание гумуса в почвах северных широт представляет собой возможную угрозу для климата нашей планеты (Knoblauch et al., 2013), поскольку глобальное повышение температур вызовет деградацию ММП, выход почв из области криогенеза, и увеличение поступлений в атмосферу парниковых газов. С другой стороны, это может привести к тому, что данные почвы в условиях потепления климата постепенно освободятся от влияния мерзлоты, что обусловит новые возможности для вовлечения их в сельскохозяйственное использование. Полярные почвы играют важную роль в процессах изменения климата на нашей планете, т.к. участвуют в формировании углеродного баланса в пределах педосферы, гумификации и депонировании высоко- и низкомолекулярных органических соединений в составе почв и ММП, которые являются наиболее устойчивыми к процессам минерализации и биodeградации (Орлов, 1990; Vasilevich et al., 2018).

Таким образом, цель данного исследования – выявление особенностей формирования и степени гумификации органических остатков и структуры гумуса в почвах дельты реки Лены.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: 1 – выявить особенности формирования почв на островах Самойловский и Сардах; 2 – исследовать микроморфологическое строение разновозрастных почв дельты реки Лены и выявить микроформы содержащегося в них гумуса; 3 – изучить молекулярный состав гуминовых кислот почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили почвы дельты реки Лены, диагностированные по полевому определителю почв России (2008) и WRB (2015): в затопляемой зоне острова Самойловский сформировался стратозем серогумусовый (Subaquatic Fluvisol (Arenic)); в незатопляемой зоне острова Сардах – криозем грубогумусированный (Histic Cryosol (Siltic)). Дельта реки Лены является самой крупной северной речной дельтой в мире, которая расположена в арктическом поясе и имеет площадь около 30000 км². В связи с такой огромной площадью и расположением она оказывает существенное влияние на водный режим Северного Ледовитого океана, так как из дельты поступает большое количество пресной воды в наименее соленый океан нашей планеты. Дельта образовывалась в результате деятельности реки: выноса наносов, эрозии, абразии под влиянием флуктуаций уровня моря и перемещения земной коры (Большаинов и др., 2013). Почвообразующие породы здесь представлены аллювиальными отложениями разного возраста.

Дельта реки Лены находится в зоне с арктическим континентальным климатом. Климатические характеристики приводятся по данным наблюдений с полярных метеостанций Тикси, Столб, Усть-Оленек и НИС «Остров Самойловский». Среднегодовая температура воздуха составляет – 13 °С, средняя температура января снижается до – 32 °С, средняя температура июля не превышает +12°С. Годовое количество осадков – 190 мм. Большая часть суши в районе дельты характеризуется наличием многолетнемерзлых пород на глубине около 1 метра. Глубина сезонно-талого слоя здесь неоднозначна: в конце августа на суглинистых породах она может достигать 30 см, а на породах легкого гранулометрического состава доходить до 1 метра.

Ландшафты дельты реки Лены покрыты разнообразной тундровой растительностью. Основными компонентами являются лишайники, мхи, травы (злаки и осоки), некоторые виды кустарничков (Voike et al., 2013). Преобладают злаково-осоково-моховые ценозы, в понижениях рельефа – гипново-осоковые полигональные болота. Растительный покров не сомкнут и имеет мозаичный характер («пятнистая тундра»). Моховые группировки преобладают на суглинистых, а лишайниковые – на грубоскелетных, каменистых почвах. Также, нередко вблизи озер ледового

происхождения мохово-лишайниковую растительность заменяют осоково-пушицевые группировки. По теплым южным склонам на дренированных породах легкого гранулометрического состава и в долине реки встречаются участки с травянистой растительностью (тундровые луговины и пойменные луга). Почвенные исследования проводились на островах Самойловский и Сардах (рис. 1).



Рисунок 1. Район исследования: дельта реки Лены.

Остров Самойловский расположен в центральной части дельты и занимает площадь около 5 км². Западная часть образована недавними русловыми и эоловыми процессами. Восточная часть представлена ледяными жилами и небольшими термокарстовыми озерами. Острова, состоящие из разнородных отложений, типичны для дельты Лены: это геологическое строение свидетельствует о смене обстановки осадконакопления как в латеральном векторе, так и во времени.

Остров Садах расположен в восточной части дельты реки Лены, он состоит из четвертичных и дочетвертичных пород (миоценовые конгломераты и древние пески с большим количеством окаменевшей древесины), которые имеют признаки ледникового генезиса.

Отбор почвенных образцов. На острове Самойловский был проведен отбор почв на наиболее молодых (затапливаемых) участках (Сам 2-1), которые испытывают влияние реки и подвергаются периодическому затоплению полыми водами. Участок Сам 1-1 не попадает под влияние периодического затопления и имеет возраст около 2230 ± 70 лет (Bolshiyarov et al., 2019). На острове Сардах почвы не подвержены процессам периодического затопления, их возраст составляет $> 50\ 700$ лет (Schirrmeister et al., 2003). Данные почвы являются самыми древними из исследованных.

Лабораторные исследования. Для исследования микроморфологического строения были подготовлены почвенные шлифы. Они изготавливались из сухих почвенных монолитов ненарушенной структуры. Полученные шлифы анализировали с помощью поляризационного микроскопа (Leica DM750P, Германия) в параллельных и скрещенных николях.

Твердотельные спектры гуминовых кислот фиксировались методом CP/MAS ¹³C-ЯМР спектроскопии на ЯМР-спектрометре Bruker Avance 500 в роторе из ZrO₂ 3,2 мм. Скорость вращения под магическим углом составляла 20 кГц, а частота нутации для кросс-поляризации – $u1/2p\ 1/4\ 62,5$ кГц. Задержка повторения составляла 3 секунды. Количество сканирований 6500–51000. Экстракция гуминовых кислот осуществлялась согласно общепринятой методике IHSS:

(1) Пробоподготовка – перед сушкой образца из него максимально тщательно отбирают органические остатки и пропускают через сито 1 мм;

(2) Декальцирование – навеску образца (от 100 до 500 г) заливают 0,05 н H₂SO₄ (соотношение 1:10) и оставляют на ночь;

(3) Экстракция – после фильтрации декальцината образец почвы заливают (смывая и частицы почвы с фильтра) 0,1 н раствором NaOH (соотношение почва:раствор 1:10) и оставляют на 24 часа, щелочной раствор очищают через фильтровальную бумагу (белая лента);

(4) Осаждение – гуминовые кислоты осаждают в очищенном щелочном экстракте постепенным добавлением 1 н. раствора H_2SO_4 и оставляют на ночь;

(6) Диализ – гель ГК после центрифугирования и отделения взвешенных частиц ГК от щелочного раствора, помещают в мешки (пакеты) из диализного целлофана и размещают в емкостях с дистиллированной водой на 7–10 дней;

(7) Сушка – препараты ГК из диализных пакетов переносят в чашки Петри, после чего сушат в вакуумном шкафу над емкостями с сухим $CaCl_2$ при 40–45 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности формирования почв в дельте реки Лены. Почвы острова Самойловский формируются на первой террасе дельты реки Лены и представлены стратоземами серогумусовыми (Сам 2-1) и криоземами грубогумусированными (Сам 1-1). Почвы первой террасы занимают большую часть дельты реки Лены и формируются в ходе синлитогенеза на аллювиальных отложениях голоценового возраста. Высота первой террасы по данным геодезических исследований колеблется от 1 до 12 метров над урезом реки.

Почвы на острове Сардах развиваются в условиях третьей террасы. Она включает в себя около 23% территории дельты, сложена песчаными фракциями с присутствием льда, характеризуется большим числом термокарстовых озер и практически отсутствием полигональной тундры. Территория отличается криогенными формами рельефа и включает в себя аласы (отрицательные формы рельефа) и булгуньяхи (пинго, или гидролокалитеты, положительные формы рельефа). Исследованная почва на острове Сардах представлена криоземом грубогумусированным. Описание почвенных разрезов представлено в таблице 1.

Таблица 1

Описание исследованных почв в дельте реки Лены

№ почвы	Координаты	Горизонт	Глубина, см	Описание	Граница ММП, см	Название почвы
Сам 1-1	72°22'35,3" N 126°30'20,5" E	Оао	0-20	Органогенный грубогумусированный	40	Криозем грубогумусированный
		CR \perp	20-40	Криогенный, серый, бесструктурный, суглинистый, влажный		
Сам 2-1	72°22'41,6" N 126°31'05,1" E	A γ aq	0-25	Серогумусовый, темно-серый, комковатый, супесчаный	56	Стратозем серогумусовый
		R γ aq	25-50	Стратифицированный, светлый, супесчаный, влажный, бесструктурный		
		D \perp	50-56	Песчаный, темный, мокрый, включения древесины		
Сар 1	72°34'15,5" N 127°13'11,5" E	Оао	0-10	Органогенный грубогумусированный	27	Криозем грубогумусированный
		CR	10-15	Криогенный, серый, бесструктурный, суглинистый, влажный		
		C \perp	15-27	Серо-бурый, бесструктурный, включения органических остатков, плотнее предыдущего		

Отличительной особенностью почв высоких широт является наличие многолетнемерзлых пород, которые часто встречаются в виде слоя ММП. Массивный грунтовый лед действует как непроницаемый слой, который обуславливает застой воды, особенно в летние месяцы, вызывая снижение содержания кислорода в почве, приводя к изменениям в окислительно-восстановительных условиях. Кроме того, криогенные почвы могут проявлять признаки заболачивания и оглеения, вызванных переувлажнением территории в результате таяния ММП. В таких условиях происходит депонирование органических остатков в составе ММП.

Микроморфологическое строение почв разновозрастных островов дельты реки Лены. Первая терраса дельты реки Лены характеризуется молодой формацией ландшафтов в условиях аллювиального накопления вещества. На рисунке 2 представлены почвенные шлифы образцов Сам 2-1 и Сам 1-1. Стрелками указаны грубые формы гумуса и Fe-Mg конкреций.

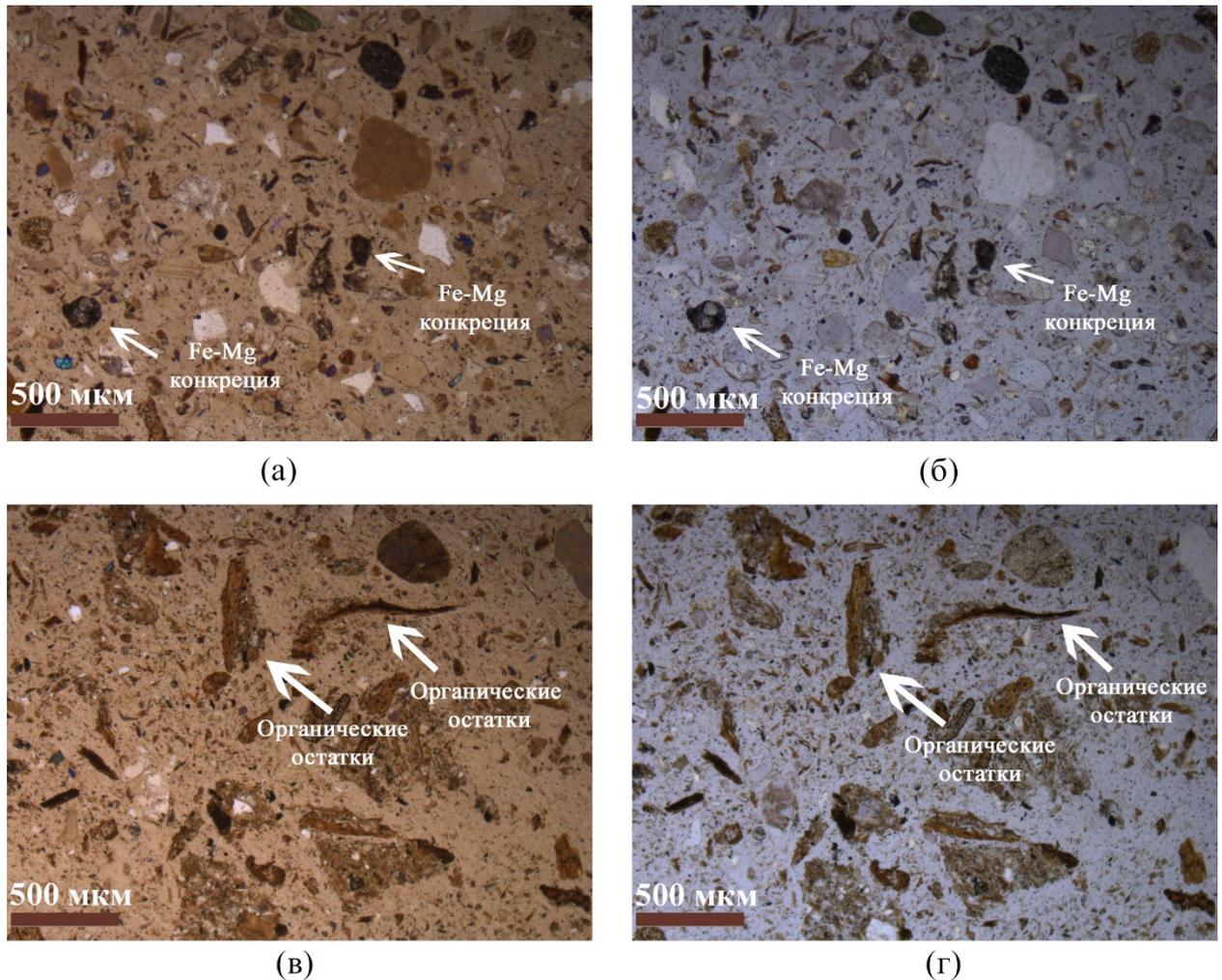


Рисунок 2. Микростроение почвенных шлифов с острова Самойловский: а-б – Сам 2-1; в-г – Сам 1-1. Стрелками указаны грубые формы гумуса и Fe-Mg конкреций. а, в – нескрещенные николи; б, г – скрещенные николи.

Микростроение почвенной массы образцов из почв о. Самойловский представлено плохо сортированным песком с кольцевым типом оптической ориентации почвенной плазмы (что указывает на влияние реки), а также вертикально ориентированными слюдами (мусковит/биотит). Отмечено присутствие Fe-Mn конкреций. Минералогический состав имеет низкую степень трансформации, содержание новообразований – единичное. Низкое содержание первичных минералов в почвах первой террасы связано с низкой степенью трансформации исходного материала. В современных периодически затапливаемых почвах, присутствует грубый гумус, он накапливается в результате действия реки (рис. 2 а-б), представлен фрагментированными растительными остатками. На участках, которые находятся вне области затопления (рис. 2 в-г), присутствуют фрагменты грубого гумуса. Первая терраса дельты реки Лены представлена

легкими по гранулометрическому составу отложениями (затапливаемые участки); они лучше прогреваются, здесь в меньшей степени застаивается влага, что создает предпосылки для активной микробиологической активности и процессов гумификации. Данные грубогумусовые фрагменты могут быть легко вовлечены в биологический цикл углерода. Запасы гумуса в почвах затапливаемых участков достигают 17 кг/м^2 , тогда как в почвах, не подверженных ежегодному затоплению, содержание гумуса в почвах составляет около 5 кг/м^2 . При этом, содержание гумуса в криоземах выше (до 49 г/кг), чем в стратоземах, где оно достигает 18 г/кг .

Остров Сардах сформирован из плейстоценовых материнских пород, верхняя часть острова состоит из древних песков относительного возраста более 50 700 лет (Schirmeister et al., 2003). Почвенные шлифы исследуемых почв о. Сардах представлены на рисунке 3.

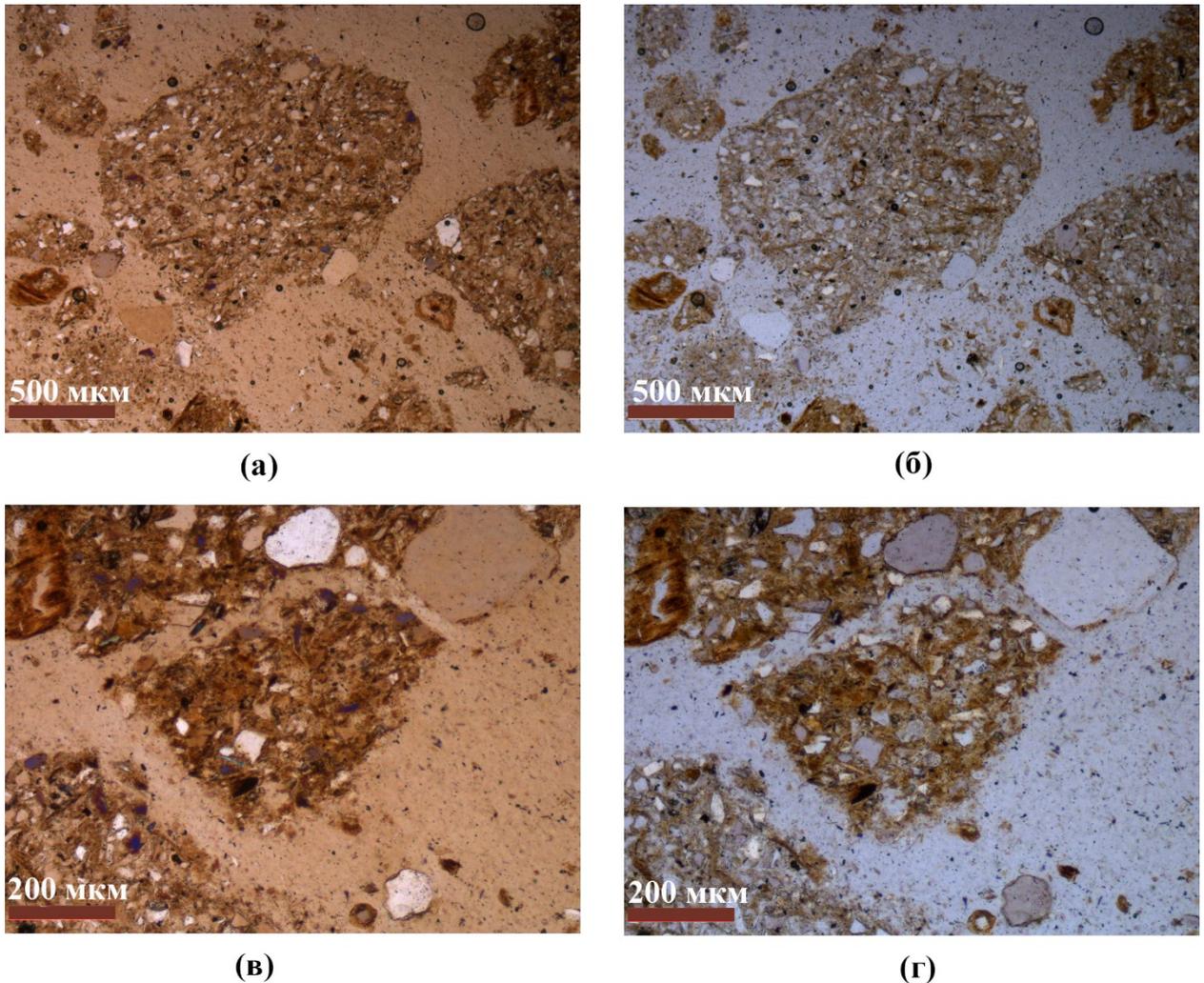


Рисунок 3. Микростроение почвенных шлифов с острова Сардах: а-б – 4-кратное увеличение; в-г – 10-кратное увеличение. а, в – нескрещенные николи; б, г – скрещенные николи.

В изученных шлифах почв острова Сардах наблюдается наличие пылевато-песчаных микроагрегатов. Это связано с физическим выветриванием первичных минералов и дальнейшей адгезией разрушенных частиц с образованием Fe-Mn конкреций. Минералы почв острова Сардах наиболее трансформированы среди изученных. При длительном воздействии процессов промерзания/оттаивания ММП и почвенного выветривания в почвах дельты реки Лены происходит формирование биогенных агрегатов. В таких органо-минеральных микроагрегатах гумус закреплён в составе минеральных компонентов, состоящих из частиц кварца, слюд и Mn-Fe конкреций и находится в стабильном состоянии (физическая стабилизация гумуса) (Когут и др., 2016).

Таким образом, среди изученных разновозрастных почв наиболее разнообразной по составу является почва на о. Сардах, что связано с более длительным почвообразовательным процессом по

сравнению с почвами на острове Самойловский (Pogosyan et al., 2021). Основные типы минералов в них – слюды (мусковит, биотит), гидрослюды (иллит, вермикулит, глауконит) и алюмосиликаты (полевоы шпат). Молодые ландшафты на острове Самойловский представлены плохо сортированными окатанными песками с низким содержанием агрегатов и высоким содержанием грубого аморфного гумуса.

¹³C-ЯМР спектроскопия гуминовых кислот, выделенных из почв дельты реки Лены. Методом CP/MAS ¹³C ЯМР-спектроскопии идентифицированы многочисленные фрагменты макромолекул: карбоксил (–COOR), карбонил (–C=O, (–C–OR) спиртов, сложных эфиров, углеводов, фенольные (Ar–OH), хиноновые (Ar=O) и ароматические (Ar–), а также (CH₃–, CH₂–, CH–) алифатические группы, что указывает на большую сложность строения ГК и полифункциональные свойства, обуславливающие их активное участие в почвенных процессах (Lodygin et al., 2014).

Из полученных данных можно выделить три основные группы структурных фрагментов, которые накапливаются в почвах дельты: C, H – алкилы ((CH₂)_n/CH/C и CH₃), ароматические соединения (C=C/C=N, C=O) и группа OCH (OCH/OCh). Ароматическая группа рассчитана из суммирования площадей химических сдвигов от 110 до 185 ppm, алифатические фрагменты – по сумме площадей в областях от 0 до 110 ppm и от 180 до 200 ppm. Для расчетов AL h,r + AR h,r (общее количество неокисленных атомов углерода) сигналы суммировались по областям 0–46 и 110–160 ppm (частей на миллион), C,H–AL/O,N–AL- сигналы от C,H- алкилов суммировались в диапазоне 0–47 ppm. O,N- алкил в областях 46–60 и 60–110 ppm. Выявлено наличие всех пиков разновидностей углерода, которые необходимы для идентификации исследуемых веществ как ГК (Yao et al., 2019). Содержание структурных фрагментов представлено в таблице 2.

Таблица 2

Содержание структурных фрагментов в исследованных образцах

№ почвы	Химические сдвиги, % от ¹³ C, в диапазонах, ppm						AR*	AL*	AR/AL	Al h,r+ Ar h,r*	C,H–Al/O,N–Al*
	0–47	47–60	60–110	110–160	160–185	185–200					
Сам 1-6	48	11	4	25	11	1	36	64	0,55	74	3,24
Сам 2-1	50	8	3	23	14	1	37	63	0,59	74	4,47
Сap 1	35	10	17	22	15	1	37	63	0,59	57	1,32

Примечание. *AR – сумма ароматических фрагментов; AL – сумма алифатических фрагментов; AL h,r + AR h,r, % – степень гидрофобности; C,H–AL/O,N–AL – степень гумификации.

В изученных гуминовых препаратах преобладают алифатические структурные фрагменты ГК (63–64%), что свидетельствует о дефиците лигнина и лигнин-подобных соединений в составе прекурсоров гумификации. Преобладание алифатических структур характерно для гуминовых веществ, образующихся в восстановительных условиях, в том числе для водных гуминовых веществ, а также в почвах, прекурсорами гумификации которых является типичная тундровая растительность (мхи и лишайники) с преобладанием углеводов (до 80%). Биомасса микробов и водорослей состоит из белков и мембранных липидов, а иногда и из углеводов, это создает все предпосылки для превалирования алифатических структурных фрагментов в изученных почвах. В то же время, по сравнению с другими секторами Арктики (полуостров Ямал, ряд северных островов России в Баренцевом, Карском морях и архипелаге Шпицберген) в почвах накапливается значительное количество ароматических фрагментов (36–37%). Такое соотношение характерно для почв таежной зоны. Значительное количество ароматических фрагментов накапливается в дельте в аллювиальных почвах первой террасы реки (ежегодно затопляемой). Это, видимо, связано с формированием сосудистых растений на затопляемых участках дельты реки Лены. В химический состав сосудистых растений входят такие компоненты, как танины, флавоноиды и лигнин (арены), гумификация которых связана с образованием ароматических структурных фрагментов (Орлов, 1990).

В ГК, изолированных из почв дельты реки Лены накапливается до 37% ароматических соединений, что может свидетельствовать о процессах стабилизации гумуса в изученных почвах. Однако алифатические фрагменты остаются доминирующими. Уменьшение доли ароматических фрагментов, в первую очередь, связано с низкой микробиологической активностью и прекурсорами гумификации.

В результате изучения состава структурных фрагментов исследуемых почв можно сделать вывод о вкладе растительных сообществ в состав ГК. Так, в образцах, сформированных под сосудистыми растениями с содержанием лигнина около 30%, наблюдается усиление сигналов в интервале 110-160 ppm (Орлов, 1990). Ароматические и карбоксильные фрагменты в структуре ГК образуются в ходе трансформации лигнина, что повышает относительную устойчивость ГК к биodeградации (Семенов и др., 2009). Наибольшее соотношение AR/AL (0,59) наблюдалось в почвах, отобранных с поемной территории и в пробах почв с острова Сардах. Было высказано предположение, что влажные гидрологические условия способствуют образованию растворимых прекурсоров гумификации, а сухие способствуют молекулярной конденсации (Vasilevich et al., 2018). Более того, конденсация макромолекул, по-видимому, связана с климатическими особенностями этого региона. Район дельты Лены сильно отличается от континентальной части Сибири: здесь гораздо более мягкий климат из-за близости моря, а летом теплые воды Лены с температурой до +18 °С также способствуют нагреванию воздуха и, соответственно, почв. Таким образом, влияние реки на этот регион достаточно велико, что способствует развитию почв и образованию ГК с относительно высокой долей ароматических и карбоксильных групп, более устойчивых к биodeградации по сравнению с другими арктическими регионами (п-ов Ямал, а также острова, расположенные в морях, прилегающих к Северному Ледовитому океану).

Для стандартизации количественных характеристик ГК были использованы следующие параметры: отношение углерода ароматических структур к алифатическим, степень гумификации органического вещества почв (С-алкил/О-алкил) и интегральный показатель гидрофобности ГК (AL h,r + AR h,r) (рис. 4).

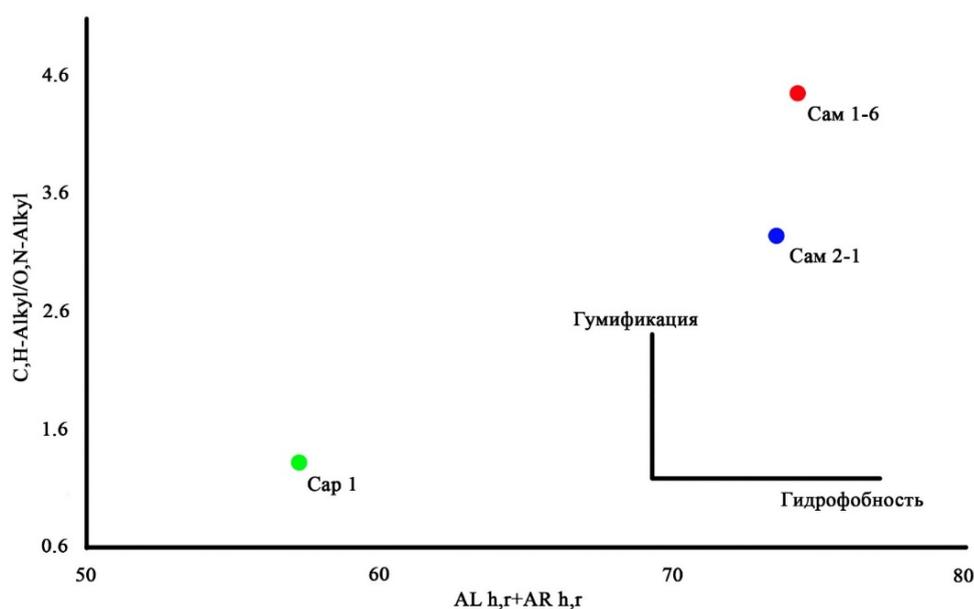


Рисунок 4. Диаграмма интегральных показателей молекулярного состава ГК. AL h,r + AR h,r, % – степень гидрофобности; C,H-AL/O,N-AL – степень гумификации.

На основании полученных данных можно сделать вывод о накоплении алифатических соединений ((CH₂)_n/CH/C и CH₃) и ароматических соединений (C-C/C-H, C-O) в исследованных почвах. В почвах дельты реки Лены, материнским материалом которой являются аллювиальные пески, отмечена низкая криогенная активность. В условиях хорошего дренажа и аэрации почвы происходит быстрый теплообмен с атмосферой, что влияет на уровень микробиологической активности почвы и, тем самым, увеличивает скорость гумификации.

Таким образом, при относительно активных микробиологических процессах в почвах накапливается значительная доля ароматических фрагментов.

На рисунке 4 показано, что наиболее гумифицированные и гидрофобные структуры формируются в молодых ландшафтах дельты реки Лены. Это, в первую очередь, связано с прекурсорами гумификации и термодинамическим эволюционным отбором высокомолекулярных соединений, которые накапливаются на границе ММП (Vasilevich et al., 2018). Увеличение доли ароматических фрагментов ГК приводит к стабилизации органического вещества в почвах дельты реки Лены. Конденсация высокомолекулярных соединений, которые включают ароматические ненасыщенные структуры, фиксируемые между 110–185 ppm, указывает на относительно высокую степень гидрофобности органического вещества почвы и его низкую активность для процессов гидролиза.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время существует ряд работ, посвященных изучению таежных и тундровых почв с помощью спектроскопии ^{13}C (CP/MAS) ЯМР (Dai et al., 2002; Lodygin et al., 2014; Ejarque, Abakumov, 2016; Lupachev et al., 2017). Наши данные подтверждаются ранее проведенными почвенными исследованиями в зоне распространения многолетнемерзлых пород (Beznosikov, Lodygin 2010; Vasilevich et al., 2018). Преобладание алифатических фрагментов ГК связано со специфическим составом растительного покрова, микробиологическим составом почвы и климатическими условиями (Орлов, 1990; Lupachev et al., 2017). По составу ГК изученные почвы более схожи с почвами таежной зоны, здесь ароматичность изученных ГК подзолов увеличивается до 44%, а европейской Арктики России – до 50% (Lodygin et al., 2014; Pengerud et al., 2017). Для тундровой и таежной зон характерно преобладание мохово-лишайниковой растительности, являющейся источником углеводов (моно и олигосахариды, целлюлоза) и различных липидов. Таким образом, биоклиматические условия, криогенные процессы и прекурсоры гумификации определяют состав ГК в районе исследований. Преобладание мохово-лишайниковой растительности способствует образованию длинных алифатических цепочек в макромолекулах ГК. Формирование растительных сообществ с доминированием сосудистых растений и чередование влажных и засушливых сезонов способствует конденсации ароматических и карбоксильных фрагментов ГК, что может указывать на устойчивость органического материала к биодеградации (Höfle et al., 2013; Beznosikov, Lodygin 2010; Lodygin et al., 2014).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почвы дельты реки Лены характеризуются высоким запасом гумуса в составе торфяных и гумусово-аккумулятивных горизонтов, а также в органическом веществе ММП. В дельтовых комплексах действуют сразу несколько почвообразовательных факторов: поемный, глеевый и криогенный (зональный), под действием которых развиваются стратифицированные почвы с признаками криогенеза и стагнафикации. В условиях холодного климата происходит накопление органических соединений гумуса, которые под действием почвенного криогенеза (путем вовлечения в криогенный массообмен и инкорпорации в мерзлотные слои) способны депонироваться в составе многолетнемерзлых пород. В ходе деградации ММП и береговой абразии органоминеральный материал может внести существенный вклад в биогеохимический баланс гидросферных компонентов северного биома.

В ходе интерпретации полученных данных, согласно ^{13}C ЯМР спектроскопии, было выявлено, что в гуминовых кислотах почв дельты реки Лены накапливается до 37% ароматических структурных фрагментов. Преобладание мохово-лишайниковых сообществ, состоящих из материалов почти с полным отсутствием фенил-пропановых и лигнинсодержащих компонентов, приводит к накоплению алифатических фрагментов в составе ГК, которые доминируют в почвах дельты реки Лены. Наибольшая степень гумификации органических веществ выявлены в почвах с острова Самойловский, которые являются относительно молодыми по сравнению с другими участками дельты реки Лены. Относительно высокая степень гумификации органического вещества почв на не затапливаемых участках различных островов дельты реки Лены может быть результатом долгосрочных процессов конденсации и полимеризации в макромолекулах ГК. Для почв с преобладанием на них сосудистых растений характерно повышенное содержание карбоксильных фрагментов в составе ГК, что может свидетельствовать о зрелости гумуса в почвах на затапливаемых территориях.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ 19-05-50107.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александрова Л.Н. Процессы гумусообразования в почве // *Зап. Ленингр. с.-х. ин-та*. 1970. Т. 142. С. 26–82.
2. Большианов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. *Происхождение и развитие дельты реки Лены*. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.
3. Гагарина Э.И. *Литологический фактор почвообразования (на примере Северо-Запада Русской равнины)*. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2004. 260 с.
4. Дергачева М.И., Некрасова О.А., Оконешникова М.В., Васильева Д.И., Гаврилов Д.А., Очур К.О., Ондар Е.Э. Соотношение элементов в гуминовых кислотах как источник информации о природной среде формирования почв // *Сибирский экологический журнал*. 2012. № 5. С. 643–647.
5. Дергачева М.И. *Система гумусовых веществ как основа диагностики палеопочв и реконструкции палеоприродной среды*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 292 с.
6. Добровольский Г.В. *Структурно-функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере*. М.: Наука, 2003. 364 с.
7. Козут Б.М., Яшин М.А., Семенов В.М., Авдеева Т.Н., Маркина Л.Г., Лукин С.М., Тарасов С.И. Распределение трансформированного органического вещества в структурных отдельностях дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Почвоведение*. 2016. № 1. С. 52–64.
8. Кононова М.М. *Органическое вещество почвы. Его природа, свойства и методы изучения*. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.
9. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. *Органическое вещество почв Российской Федерации*. М.: Наука, 1996. 254 с.
10. Орлов Д.С. *Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации*. М.: Изд-во МГУ, 1990. 325 с.
11. *Полевой определитель почв России*. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
12. Пономарева В. В., Плотникова Т. А. *Гумус и почвообразование*. Л.: Наука, 1980. 222 с.
13. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Тулина А.С. Стабилизация органического вещества в почве // *Агрехимия*. 2009. № 10. С. 77–96.
14. Тюрин И.В. К характеристике типов гумуса лесных почв // *Почвоведение*. 1943. № 1–2. С. 34–46.
15. Чертов О.Г. Характеристика типов гумусового профиля лесных почв Ленинградской области // *Почвоведение*. 1966. № 3. С. 26–37.
16. Чертов О.Г., Надпорожская М.А. Формы гумуса лесных почв: концепции и классификации // *Почвоведение*. 2018. № 10. С. 1202–1214.
17. Beznosikov V.A., Ladygin E.D. High-molecular organic substances in soils // *Transactions of the Komi Scientific Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences*. 2010. Vol. 1. P. 24–30.
18. Boike J., Kattenstroth B., Abramova K., Bornemann N., Chetverova A., Fedorova I., Fröb K., Grigoriev M., Grüber M., Kutzbach L., Langer M., Minke M., Muster S., Piel K., Pfeiffer E.-M., Stoof G., Westermann S., Wischniewski K., Wille C., Hubberten H.-W. Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011) // *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10. P. 2105–2128.
19. Bolshiyarov D., Grigoriev M., Maksimov G., Straus J., Schneider W., Pushina Z., Molodkov A., Kuksa, K., Petrov A. *Primary Results Of The 66-Meters Borehole Drilling At Samoylov Island In The Lena River Delta*. In book: *Proceedings of Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. (Saint-Petersburg, 17-18 December, 2019). Bolshiyarov D. (ed.). Saint-Petersburg: AARI, 2019. P. 24–31.
20. Burdelnaya N., Bushnev D., Mokeev M., Dobrodumov A. Experimental study of kerogen maturation by solid-state ¹³C NMR spectroscopy // *Fuel*. 2014. Vol. 118. P. 308–315.
21. Cauwet G., Sidorov I. The biogeochemistry of Lena River: organic carbon and nutrients distribution // *Marine Chemistry*. 1996. Vol. 53. P. 211–227.
22. Chen J., Gu B., Leboeuf E., Pan H. and Dai S. Spectroscopic characterization of the structural and functional properties of natural organic matter fractions // *Chemosphere*. 2002. Vol. 48. P. 59–68.
23. Chukov S.N., Abakumov E.V., Tomashunas V.M. Characterization of humic acids from Antarctic soils by nuclear magnetic resonance // *Eurasian Soil Science*. 2015. Vol. 48 (11). P. 1207–1211.
24. Coccozza C., D'orazio V., Miano T.M. And Shotyk W. Characterization of solid and aqueous phases of a peat bog profile using molecular fluorescence spectroscopy, ESR and FT-IR, and comparison with physical properties // *Organic Geochemistry*. 2003. Vol. 34. P. 49–60.
25. 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 (4). P. 407–419.
26. Davis T.N. *Permafrost: A Guide to Frozen Ground in Transition*. U.S.A.: University of Alaska Press, 2001. 351 p.

27. Dutta K., Schuur E.A.G., Neff J.C., Zimov S.A. Potential carbon release from permafrost soils of Northeastern Siberia // *Global Change Biology*. 2006. Vol. 12(12). P. 2336–2351.
28. Dziadowiec H., Gonet S., Plichta W. Properties of humic acids of Arctic tundra soils in Spitsbergen // *Polish Polar Research*. 1994. № 15 (1–2). P. 71–81.
29. Ejarque E., Abakumov E. Stability and biodegradability of organic matter from arctic soils of Western Siberia: Insights from ^{13}C -NMR spectroscopy and elemental analysis // *Solid Earth*. 2016. Vol. 7(1). P. 153–165.
30. Holland G.P. and Alam T.M. Multi-dimensional ^1H - ^{13}C HETCOR and FSLG-HETCOR NMR study of sphingomyelin bilayers containing cholesterol in the gel and liquid crystalline states // *Journal of Magnetic Resonance*. 2006. Vol. 181(2). P. 316–326.
31. Höfle S., Rethemeyer J., Mueller C.W., and John S. Organic matter composition and stabilization in a polygonal tundra soil of the Lena Delta // *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10. P. 3145–3158.
32. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO, 2015. 203 p.
33. Jones A., Stolbovoy V., Tarnocai C., Broll G., Spaargaren O., Montanarella L. *Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region*. European Commission. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010. 144 p.
34. Knoblauch C., Beer C., Sosnin A., Wagner D., Pfeiffer E.-M. Predicting long-term carbon mineralization and trace gas production from thawing permafrost of North-East Siberia // *Global Change Biology*. 2013. Vol. 19 (4). P. 1160–1172.
35. Kutzbach L., Wagner D., Pfeiffer E.-M. Effect of microrelief and vegetation on methane emission from wet polygonal tundra. Lena Delta, Northern Siberia // *Biogeochemistry*. 2004. Vol. 69. P. 341–362.
36. Lodygin E.D., Beznosikov V.A., Vasilevich R.S. Molecular composition of humic substances in tundra soils (^{13}C -NMR spectroscopic study) // *Eurasian Soil Science*. Vol. 47. P. 400–406.
37. Lupachev A., Abakumov E. And 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 (Switzerland)*. 2017. Vol. 7. 24 p.
38. Pengerud A., Dignac M.-F., Certini G., Strand L.T., Forte C., Rasse D.P. Soil organic matter molecular composition and state of decomposition in three locations of the European Arctic // *Biogeochemistry*. 2017. Vol. 135 (3). P. 277–292.
39. Pogosyan L., Sedov S., Yurtaev A., Rusakov A., Lessovaia S., Sheinkman V., Pechkin A. Polygenesis of loamy soils in North-West Siberia in the context of environmental history of the Eurasian Arctic region during the Late Quaternary // *Quaternary International*. 2021. In press.
40. Schimel D.S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle // *Global Change Biology*. Vol. 1 (1). P. 77–91.
41. Schirrmeister L., Grosse G., Schwamborn G., Andreev A.A., Meyer H., Kunitsky V.V., Kuznetsova T.V., Dorozhkina M.V., Pavlova E.Y., Bobrov A.A., Oezen D. Late Quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): A multidisciplinary approach // *Polar Geography*. 2003. Vol. 27 (4). P. 277–319.
42. Schmidt M., Torn M., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. 2011. Vol. 478. P. 49–56.
43. Stolt M.H., Lindbo D.L. Soil Organic Matter. In *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*, Stoops G., Marcelino V., Mees F. (eds.). Elsevier: Amsterdam, 2010. P. 369–396.
44. Vasilevich R., Lodygin E., Beznosikov V., Abakumov E. Molecular composition of raw peat and humic substances from permafrost peat soils of European North-East Russia as climate change markers // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 615. P. 1229–1238.
45. Yao S.-H., Zhang Y.-L., Han Y., Han X.-Z., Mao J.-D., Zhang B. Labile and recalcitrant components of organic matter of a Mollisol changed with land use and plant litter management: An advanced ^{13}C -NMR study // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 660. № 1–10.
46. Zubrzycki S., Kutzbach L., Pfeiffer E.-M. Permafrost-affected soils and their carbon pools with a focus on the Russian Arctic // *Solid Earth*. 2014. Vol. 5. P. 595–609.
47. Zubrzycki, S., Kutzbach, L., Grosse, G., Desyatkin, A., and Pfeiffer, E.-M. Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta // *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10. P. 3507–3524.

Поступила в редакцию 28.12.2021

Принята 29.12.2021

Опубликована 30.12.2021

Сведения об авторах:

Поляков Вячеслав Игоревич – инженер, Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра прикладной экологии (Санкт-Петербург, Россия); slavon6985@gmail.com

Абакумов Евгений Васильевич – доктор биологических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра прикладной экологии (Санкт-Петербург, Россия); e_abakumov@mail.ru

Авторы прочитали и одобрил окончательный вариант рукописи.



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

HUMUS FORMATION IN SOILS OF THE LENA RIVER DELTA

© 2021 V. I. Polyakov , E. V. Abakumov 

Saint-Petersburg State University, Department of Applied Ecology, Saint-Petersburg, Russia.

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

The aim of the study. Nowadays close attention is paid to polar soils due to the expected landscape transformation rate under the predicted climate crisis. Intensive degradation of permafrost and the release of nutrients from their frozen state can lead to an increase in the emission of greenhouse gases into the atmosphere, as well as the loss of landscapes. The aim of the study was to investigate the peculiarities of organic residues formation and humification degree as well as humus structure and functioning in soil the Lena River Delta.

Location and time of the study. The study was conducted on the Samoylov and Sardakh Islands in the Lena River Delta (Yakutia, Russia). Field studies were performed during the summer of 2019.

Objects and methodology. Soils of the Lena River Delta from the Samoylov Island (flooded area) and Sardakh (non-flooded zone), i.e. Subaquatic Fluvisol (Arenic) and Histic Cryosol (Siltic) were the objects of the study, respectively. To examine the features of humification chemical-analytical, sedimentation, micromorphological methods were used, as well as CP/MAS ¹³C-NMR spectroscopy.

Main results. The data obtained indicate a high diversity of soils and soil formation conditions in the Lena River Delta. Under non-flooded conditions Histic Cryosol (Siltic) were formed in the flooded parts of the Samoylov Island, Subaquatic Fluvisol (Arenic) were formed. These soils play an important role in the global carbon cycle, accumulation, transformation and deposition of condensed high- and low molecular mass organic compounds in the composition of soils and permafrost. The main soil micromorphology features were identified. In the young landscapes the soil microstructure was represented by poorly sorted sand with a circular type of optical orientation of the soil plasma (which indicated the influence of the river), as well as vertically oriented micas (muscovite/biotite). Soils influenced by the floodplain process were characterized by the presence of coarse amorphous humus. Due to the long-term effect of the freezing/thawing processes on the permafrost-affected soils the biogenic aggregates were formed. In such organo-mineral microaggregates humus is fixed in the composition of mineral components consisting of particles of quartz, micas and Mn-Fe nodules and is in a stable state (physical stabilization of humus). To analyze the molecular composition the ¹³C NMR spectroscopy method was used. According to ¹³C NMR spectroscopy data, up to 37% of aromatic structural fragments accumulated in soils, which indicates the process of condensation of molecules in humic acids, thus showing a relatively high level of humus stabilization in the soils of the Lena River delta. From the data obtained, three main groups of chemical structural fragments that accumulate in the delta soils can be distinguished, such as C,H - alkyls ((CH₂)_n/CH/C and CH₃), aromatic compounds (C-C/C-H, C-O) and the OCH group (OCH/OCq). In the studied humic preparations aliphatic structural fragments of HAs (63–64%) predominated, which indicated a deficiency of lignin and lignin-like compounds in the composition of humification precursors. The predominance of aliphatic structures is typical of humic substances formed under reduction conditions, including the aqueous humic substances, as well as in soils, the precursors of humification of which are typical tundra vegetation (mosses and lichens) with a predominance of carbohydrates (up to 80%). A significant amount of aromatic fragments accumulated in the delta in the alluvial soils of the first terrace of the river (flooded zone). This is apparently due to the formation of vascular plants in the flooded areas of the Lena River Delta. The chemical composition of vascular plants includes components such as tannins, flavonoids and lignin (arenas). Thus in the samples formed under vascular plants with a lignin content of about 30%, an increase in signals in the range of 110-160 ppm were observed. Aromatic and carboxyl fragments in the structure of HA were formed during the transformation of lignin, which leads to the resistance of HAs to biodegradation.

Conclusion. Under the floodplain condition humus is represented by coarse amorphous forms, whereas without the influence of flooding humus is fixed in mineral microaggregates. Specific humic acids

composition in the studied regions is determined by bioclimatic conditions, cryogenic processes and the composition of humification precursors. High abundance of aromatic structures in humus substances suggests relatively stable humus status (most likely due to the putative condensation of humic acids) in the Lena River Delta during the study period.

Key words: polar soil; ^{13}C (CP/MAS) NMR spectroscopy; soil micromorphology; Lena River Delta; Arctic

How to cite: Polyakov V.I., Abakumov E.V. Humus formation in soils of the Lena River Delta // *The Journal of Soils and Environment*. 2020. 4(4). e163. doi: [10.31251/pos.v4i4.163](https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.163) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

- Alexandrova L.N. Processes of humus formation in the soil, *Bill. Leningrad*, 1970. Vol. 142, p. 26–82. (in Russian)
- Bolshiyakov D.Y., Makarov A.S., Schneider V., Shtof G. *Origin and development of the Lena River Delta*. SPb: AARI, 2013, 268 p. (in Russian)
- Gagarina E.I. *Lithological factor of soil formation (on the example of the North-West of the Russian Plain)*. SPb: Publishing house of St. Petersburg University, 2004, 260 p. (in Russian)
- Dergacheva M.I., Nekrasova O.A., Okonshnikova M.V., Vasileva D.I., Gavrilov D.A., Ochur K.O., Ondar E.E. Ratio of elements in humic acids as a source of information on the environment of soil formation, *Contemp Probl Ecol.*, 2012, Vol. 5, p. 497–504. (in Russian)
- Dergacheva M.I. *The system of humic substances as a basis for diagnostics of paleosols and reconstruction of the paleo-natural environment*. Novosibirsk: Publishing house of the SB RAS, 2018, 292 p. (in Russian)
- Dobrovolsky G.V. *Structural and functional role of soils and soil biota in the biosphere*. Moscow: Nauka, 2003, 364 p. (in Russian)
- Kogut B.M., Yashin M.A., Semenov V.M., Avdeeva T.N., Markina L.G., Lukin S.M., and Tarasov S.I. Distribution of transformed organic matter in structural units of loamy sandy soddy podzolic soil, *Eurasian Soil Sci.*, 2019, Vol. 49, p. 45–55. (in Russian)
- Kononova M.M. *Soil organic matter. Its nature, properties and methods of study*. Moscow: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1963, 314 p. (in Russian)
- Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I. *Organic matter of soils of the Russian Federation*. Moscow: Nauka, 1996, 254 p. (in Russian)
- Orlov D.S. *Humic acids of soils and the general theory of humification*. Moscow: Moscow State University Publishing House, 1990, 325 p. (in Russian)
- Field Guide for Correlation of Russian Soils*. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2008. (in Russian)
- Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. *Humus and soil formation*. L.: Nauka, 1980, 222 p. (in Russian)
- Semenov V.M., Ivannikov L.A., Tulina A.S. Stabilization of organic matter in the soil, *Agrochimia*, 2009, Vol. 10, p. 77–96. (in Russian)
- Tyurin I.V. On the characterization of the types of humus in forest soils, *Pochvovedenie*, 1943, Vol. 1–2, p. 34–46. (in Russian)
- Chertov O.G. Characteristics of the types of humus profile of forest soils in the Leningrad region, *Pochvovedenie*, 1966, Vol. 3, p. 26–37. (in Russian)
- Chertov O.G., Nadporozhskaya M.A. Forms of humus in forest soils: concepts and classifications, *Pochvovedenie*, 2018, Vol. 10, p. 1202–1214. (in Russian)
- Beznosikov V.A., Lodygin E.D. High-molecular organic substances in soils, *Transactions of the Komi Scientific Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences*, 2010, Vol. 1. p. 24–30.
- Boike J., Kattenstroth B., Abramova K., Bornemann N., Chetverova A., Fedorova I., Fröb K., Grigoriev M., Grüber M., Kutzbach L., Langer M., Minke M., Muster S., Piel K., Pfeiffer E.-M., Stoof G., Westermann S., Wischnewski K., Wille C., Hubberten H.-W. Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011), *Biogeosciences*, 2013, Vol. 10, p. 2105–2128.
- Bolshiyakov D., Grigoriev M., Maksimov G., Straus J., Schneider W., Pushina Z., Molodkov A., Kuksa, K., Petrov A. *Primary Results Of The 66-Meters Borehole Drilling At Samoylov Island In The Lena River Delta*. In book: Proceedings of Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. (Saint-Petersburg, 17–18 December, 2019). Bolshiyakov D. (ed.). Saint-Petersburg: AARI, 2019. p. 24–31.
- Burdelnaya N., Bushnev D., Mokeev M., Dobrodumov A. Experimental study of kerogen maturation by solid-state ^{13}C NMR spectroscopy, *Fuel*, 2014, Vol. 118, p. 308–315.
- Cauwet G., Sidorov I. The biogeochemistry of Lena River: organic carbon and nutrients distribution, *Marine Chemistry*, 1996, Vol. 53, p. 211–227.
- Chen J., Gu B., Leboeuf E., Pan H. and Dai S. Spectroscopic characterization of the structural and functional properties of natural organic matter fractions, *Chemosphere*, 2002, Vol. 48, p. 59–68.
- Chukov S.N., Abakumov E.V., Tomashunas V.M. Characterization of humic acids from Antarctic soils by nuclear magnetic resonance, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48(11), p. 1207–1211.

24. Coccozza C., D'orazio V., Miano T.M., Shotykh W. Characterization of solid and aqueous phases of a peat bog profile using molecular fluorescence spectroscopy, ESR and FT-IR, and comparison with physical properties, *Organic Geochemistry*, 2003, Vol. 34, p. 49–60.
25. 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(4), p. 407–419.
26. Davis T.N. *Permafrost: A Guide to Frozen Ground in Transition*. U.S.A., University of Alaska Press, 2001, 351 p.
27. Dutta K., Schuur E.A.G., Neff J.C., Zimov S.A. Potential carbon release from permafrost soils of Northeastern Siberia, *Global Change Biology*, 2006, Vol. 12 (12), p. 2336–2351.
28. Dziadowiec H., Gonet S., Plichta W. Properties of humic acids of Arctic tundra soils in Spitsbergen, *Polish Polar Research*, 1994, Vol. 15 (1–2), p. 71–81.
29. Ejarque E., Abakumov E. Stability and biodegradability of organic matter from arctic soils of Western Siberia: Insights from ^{13}C -NMR spectroscopy and elemental analysis, *Solid Earth*, 2016, Vol. 7 (1), p. 153–165.
30. Holland G.P. and Alam T.M. Multi-dimensional ^1H - ^{13}C HETCOR and FSLG-HETCOR NMR study of sphingomyelin bilayers containing cholesterol in the gel and liquid crystalline states, *Journal of Magnetic Resonance*, 2006, Vol. 181 (2), p. 316–326.
31. Höfle S., Rethemeyer J., Mueller C.W., and John S. Organic matter composition and stabilization in a polygonal tundra soil of the Lena Delta, *Biogeosciences*, 2013, Vol. 10, p. 3145–3158.
32. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. Rome, FAO, 2015, 203 p.
33. Jones A., Stolbovoy V., Tarnocai C., Broll G., Spaargaren O., Montanarella L. *Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region*. European Commission. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2010, 144 p.
34. Knoblauch C., Beer C., Sosnin A., Wagner D., Pfeiffer E.-M. Predicting long-term carbon mineralization and trace gas production from thawing permafrost of North-East Siberia, *Global Change Biology*, 2013, Vol. 19(4), p. 1160–1172.
35. Kutzbach L., Wagner D., Pfeiffer E.-M. Effect of microrelief and vegetation on methane emission from wet polygonal tundra Lena Delta, Northern Siberia, *Biogeochemistry*, 2004, Vol. 69, p. 341–362.
36. Lodygin E.D., Beznosikov V.A., Vasilevich R.S. Molecular composition of humic substances in tundra soils (^{13}C -NMR spectroscopic study), *Eurasian Soil Science*, Vol. 47, p. 400–406.
37. Lupachev A., Abakumov E. And 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 (Switzerland)*, 2017, Vol. 7, 24 p.
38. Pengerud A., Dignac M.-F., Certini G., Strand L.T., Forte C., Rasse D.P. Soil organic matter molecular composition and state of decomposition in three locations of the European Arctic, *Biogeochemistry*, 2017, Vol. 135 (3), p. 277–292.
39. Pogosyan L., Sedov S., Yurtaev A., Rusakov A., Lessovaia S., Sheinkman V., Pechkin A. Polygenesis of loamy soils in North-West Siberia in the context of environmental history of the Eurasian Arctic region during the Late Quaternary, *Quaternary International*, 2021. In press.
40. Schimel D.S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle, *Global Change Biology*, 1995, Vol. 1 (1), p. 77–91.
41. Schirmermeister L., Grosse G., Schwamborn G., Andreev A.A., Meyer H., Kunitsky V.V., Kuznetsova T.V., Dorozhkina M.V., Pavlova E.Y., Bobrov A.A. Late Quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): A multidisciplinary approach, *Polar Geography*, 2003, Vol. 27(4), p. 277–319.
42. Schmidt M., Torn M., Abiven S. Schmidt M., Torn M., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property, *Nature*, 2011, Vol. 478, p. 49–56.
43. Stolt M.H., Lindbo D.L. Soil Organic Matter. In *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*, Stoops, G., Marcelino, V., Mees, F., Eds. Elsevier: Amsterdam, 2010, p. 369–396.
44. Vasilevich R., Lodygin E., Beznosikov V., Abakumov E. Molecular composition of raw peat and humic substances from permafrost peat soils of European North-East Russia as climate change markers, *Science of the Total Environment*, 2018, Vol. 615, p. 1229–1238.
45. Yao S.-H., Zhang Y.-L., Han Y., Han X.-Z., Mao J.-D., Zhang B. Labile and recalcitrant components of organic matter of a Mollisol changed with land use and plant litter management: An advanced ^{13}C -NMR study, *Science of the Total Environment*, 2019, Vol. 660, № 1–10.
46. Zubrzycki S., Kutzbach L., and Pfeiffer E.-M. Permafrost-affected soils and their carbon pools with a focus on the Russian Arctic, *Solid Earth*, 2014, Vol. 5, p. 595–609.
47. Zubrzycki, S., Kutzbach, L., Grosse, G., Desyatkin, A., and Pfeiffer, E.-M. Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta, *Biogeosciences*, 2013, Vol. 10, p. 3507–3524.

Received 28 December 2021
Accepted 29 December 2021
Published 30 December 2021

About the authors:

Polyakov Vyacheslav Igorevich – Engineer, Department of Applied Ecology, Faculty of Biology, Saint Petersburg State University (St. Petersburg, Russia); slavon6985@gmail.com

Abakumov Evgeniy Vasilyevich – Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Applied Ecology, Saint Petersburg State University (St. Petersburg, Russia); e_abakumov@mail.ru

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/)