

ЮЖНАЯ ТУНДРА ЯНО-ИНДИГИРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ: КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПУЛЫ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Шепелев А.Г.,

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Россия

Аннотация. В работе обсуждаются результаты исследований геокриологических процессов, происходящих в южной тундре Яно-Индигирской низменности со сплошным распространением многолетнемерзлых толщ и температурой пород от -9 до -11°C . Проведен анализ содержания и пулов общего органического углерода в напочвенном покрове и почве, а также последствия деградации многолетнемерзлых пород для углеродного бюджета. Наибольшие запасы углерода обнаружены в торфяном горизонте (34,935 т/га), тогда как в глеевом горизонте они минимальны (2,916 т/га). Результаты показывают, что основная часть органического углерода в тундровых экосистемах сосредоточена в верхних органических горизонтах, а его содержание заметно снижается с глубиной почвенного профиля. Рассмотрены криогенные процессы, включая морозобойное растрескивание, солифлюкцию и термокарст, которые формируют современный облик мерзлотного ландшафта.

Ключевые слова. Южная тундра, Яно-Индигирская низменность, криогенные процессы, общий органический углерод, многолетнемерзлые породы, термокарст

SOUTHERN TUNDRA OF THE YANO-INDIGIR LOWLAND: CRYOGENIC PROCESSES AND POOLS OF ORGANIC CARBON

Shepelev A.G.,

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia

Institute for Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS, Yakutsk, Russia

Abstract. The paper discusses the results of research on cryogenic processes occurring in the southern tundra of the Yana-Indigirka Lowland, characterized by continuous permafrost with rock temperatures ranging from -9 to -11°C . An analysis of the content and pools of total organic carbon in the ground cover and soil was conducted, along with an assessment of the consequences of permafrost degradation for the carbon budget. The highest carbon stocks were found in the peat horizon (34.935 t/ha), while the lowest were observed in the gley horizon (2.916 t/ha). The results indicate that the majority of organic carbon in tundra ecosystems is concentrated in the upper organic horizons, with its content significantly decreasing with depth in the soil profile. Cryogenic processes, including frost cracking, solifluction, and thermokarst, which shape the modern permafrost landscape, were also examined.

Keywords. Southern tundra, Yana-Indigirka lowland, cryogenic processes, total organic carbon, permafrost, thermokarst

Введение. В арктических экосистемах образование и аккумуляция углерода преимущественно обусловлены деятельностью бриофитных ассоциаций [1], которые продуцируют до 17% углерода Северного полушария [2]. Современные изменения климатической системы планеты приводят к трансформации ландшафтов, особенно в северных и восточных регионах Сибири. Эти изменения сопровождаются активизацией эрозионных и термокарстовых процессов, что вызывает формирование озер, заболачивание территорий, образование бугров пучения и развитие отрицательных форм рельефа, которые становятся доминирующими элементами ландшафта [3]. Глобальное потепление в Арктике [4], наряду с интенсивным техногенным освоением северных территорий, способствует интенсификации

криогенных процессов и деградации подземных льдов. Это приводит к увеличению рисков потери органического материала из верхних почвенных горизонтов и многолетнемерзлых пород (ММП). Высвобождение органического вещества стимулирует аэробное микробное разложение [5], что потенциально усиливает эмиссию парниковых газов (CO_2 и CH_4) в атмосферу. Данный процесс формирует положительную обратную связь с повышением температуры приземного слоя воздуха, усугубляя климатические изменения [6]. Кроме того, наблюдается физическая (механическая) убыль биогенных элементов, обусловленная разрушением береговой линии в результате термоабразии. Это приводит к переносу органического материала и минеральных веществ в речные и морские бассейны, что может оказывать влияние на биогеохимические циклы в водных экосистемах.

Таким образом, современные климатические и антропогенные изменения в Арктике оказывают значительное воздействие на углеродный цикл и структуру мерзлотных ландшафтов, что требует дальнейшего изучения и разработки мер по минимизации негативных последствий.

Материалы и методы. Исследования проводили в южных субарктических тундрах северо-востока Якутии в бассейне нижнего течения р. Индигирки у её левого притока р. Бёрёлёх. Объектами исследований являлись мерзлотные ландшафты для определения в них содержания и расчета пулов общего органического углерода. В географическом отношении участки относятся к Северо-Восточной Сибири, к группе тундровых провинций сплошного распространения многолетнемерзлых пород и к Нижнеиндигирской озерно-термокарстовой провинции [7].

Изучаемые интразональные почвы расположены в полярном (Евразийская полярная) географическом поясе и относятся к подзоне тундровых глеевых (глеезёмов) почв и подбуров субарктической тундры Восточно-Сибирской тундровой провинции, к Яно-Индигирско-Колымскому округу полигонально-трещинных комплексов тундровых глеевых торфянистых, тундровых глеевых торфянисто-перегнойных и перегнойно-глеевых с почвами пятен и мерзлотных трещин, полигонально-валиковых комплексов торфянисто-глеевых болотных, тундровых глеевых торфянистых и почв мерзлотных трещин, преимущественно суглинистых, местами с частой сменой гранулометрического состава с преобладанием песков и супесей на озёрно-аллювиальных и лёссово-ледовых отложениях [8]. Для почвенного покрова типичной тундры Яно-Индигирской низменности характерно: распространение почв кислого типа; отсутствие солевых и карбонатных аккумуляций; широкое развитие процесса пятнообразования в плакорных ландшафтах; меньшая степень оглеенности почв на повышенных элементах мезо- и микрорельефа по сравнению с другими фациями тундровой зоны и выраженность оглеенности в виде надмерзотно-глеевых горизонтов [9].

Определение содержания общего органического углерода (ТОС) проводили на анализаторе Leco RC-612 методом сухого сжигания в окислительной среде. Запасы углерода рассчитывали для каждого отобранного слоя породы, а общие запасы ТОС всей толщи разреза суммировались с полученными показателями. Расчет запасов ТОС проводили по формуле:

$$S = HpX,$$

где S – запасы углерода в почве, кг/м^2 ; H – слой почвы, см; p – плотность почвы, г/см^3 ; X – содержание углерода в почве, %. Для определения в минеральных горизонтах доли мелкозема <2 мм образцы просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм. Доля во всех минеральных слоях составила 100% без примесей горных пород, поэтому в формуле расчета запасов ТОС этот показатель не учитывался.

Съемку участков проводили с беспилотного летательного аппарата DJI Mavic 3.

Результаты и их обсуждение. Яно-Колымский регион относится к северной геокриологической зоне со сплошным распространением многолетнемерзлых толщ и среднегодовой температурой пород от -9 до -11°C . В отложениях супесчано-суглинистого типа, развитых на поверхности ледового комплекса (ЛК), в южной тундре глубина оттаивания составляет 0,3 м, максимальное – 0,6 м в зависимости от температуры воздуха и грунтов. В оторфованных супесях, суглинках, торфе и моховом очёсе аласов тундровой зоны на низких

заболоченных днищах глубина оттаивания составляет от 0,15 до 0,4 м, а на более высоких и сухих участках от 0,2 до 0,45 м.

Толщи четвертичных отложений сформированы из песчано-глинистого и алевритового состава. Планетарное изменение климата привели к развитию гипоарктических ландшафтов в плейстоцене и началу многолетнего промерзания пород. На начальном этапе развития мерзлоты в плиоцене-нижнем плейстоцене сформировалась континентальная толща алевритов с прослоями песков и торфа, которая включала несколько ярусов с псевдоморфозами по полигонально-жильным льдам, отражающими сложную историю ее геокриологического развития. Средне- и верхнеплейстоценовые толщи рыхлых отложений на значительной площади региона являются рельефообразующими и выступают на поверхность древней озерно-аллювиальной равнины в континентальной части [10]. В основном отложения однообразного состава (пылеватые и оторфованные супеси, суглинки и тонкозернистые пески). ЛК, сформировавшийся в наиболее суровые эпохи верхнего плейстоцена, приобрел максимальную (до 80–100%) для всей криолитозоны льдистость. Мощность отложений ЛК достигает 80 м, а общая мощность криолитозоны в типичных зональных условиях может простираться от 200 до 700 м. В разрезах ЛК средне- и верхнечетвертичных озерно-аллювиальных отложений встречаются вложенные в них аласные комплексы осадков (таберальные, озерные, болотные и собственно аласные) [11]. Аласные равнины (эрозионно-термокарстовые котловины) сформировались на поверхности древней озерно-аллювиальной равнины, их днища обычно осложнены полигонально-валиковым микрорельефом. На отдельных участках низменностей аласы по площади распространения могут превалировать над всеми другими геоморфологическими уровнями. При этом днища аласов могут иметь различные, как абсолютные, так и относительные (относительно аккумулятивных водоразделов) высоты [10].

В тундровых ландшафтах выделяются криогенные процессы, связанные с высокой льдистостью многолетнемерзлых толщ ЛК и едомных возвышенностей, которые проявляются в виде полигонального морозобойного растрескивания грунтов, сопровождающихся ростом повторно-жильных льдов (рис. 1А). В результате этого процесса происходит механическое перемещение органического материала, что способствует его перераспределению в верхних слоях почвы. Органический углерод, аккумулированный в торфяных горизонтах, может быть перемещен в более глубокие слои почвы, где он становится менее доступным для микробного разложения. Это способствует консервации углерода в многолетнемерзлых толщах, что особенно важно в условиях глобального потепления, когда деградация мерзлоты может привести к высвобождению значительных количеств углерода в атмосферу. В летний период наблюдается регулярное сползание (солифлюкция) почвенно-растительного слоя на склонах гряд. Солифлюкционные формы микрорельефа (языки, небольшие террасы и фронтальные уступы) прослеживаются только на отдельных участках склонов гряд. Площади их развития обычно совпадают с выходами к дневной поверхности пачек горных пород аргиллитового состава, наиболее быстро поддающихся выветриванию до состояния супесчано-суглинистых разностей (рис. 1Б). С одной стороны, эта форма способствует аккумуляции углерода в депрессиях рельефа, таких как термокарстовые озера или аласы. В этих условиях органический углерод может быть захоронен под слоем минеральных отложений, что замедляет его разложение и способствует долгосрочной консервации. Однако в условиях деградации многолетнемерзлых пород (ММП) солифлюкция инициирует эрозию почвенного покрова, что приводит к потере органического материала и его выносу в речные стоки, переводя углерод в водорастворимую форму. Помимо прочего прослеживается повсеместное распространение термокарста – процесс проседания грунта в результате таяния подземных льдов с образованием термокарстовых озер и котловин. Вследствие этого происходит разложение органического материала, что сопровождается выделением газов (CO_2 и CH_4) в атмосферу. В некоторых случаях термокарстовые процессы могут способствовать захоронению органического углерода под слоем воды или минеральных отложений, что замедляет разложение. Таким образом, термокарст может, как усиливать эмиссию углерода, так и способствовать его консервации, в зависимости от конкретных условий ландшафта. Важным аспектом физической потери

углерода является разрушение береговой линии р. Бёрёлёх под воздействием термоабразии дисперсных грунтов (рис. 1В), когда значительная растительная (органическая) и почвенная массы вымываются потоком теплой воды и прибоя. Полигонально-валиковый рельеф является характерной особенностью южной тундры Яно-Индигирской низменности. Он представляет собой систему многоугольников, которые формируются в результате криогенных процессов, обусловленных морозобойным растрескиванием грунта. Многоугольники разделены валиками, образованными за счет накопления повторно-жильных льдов в трещинах. Данный тип рельефа типичен для районов с ММП, где происходят сезонные циклы замерзания и оттаивания грунта. Гидролакколиты, или бугры пучения, также являются результатом криогенных процессов. Они возникают вследствие замерзания воды в грунте и последующего поднятия поверхности земли (рис. 1Г). Указанный комплекс происходящих криогенных и экзогенных процессов фиксирует деградацию многолетнемерзлых пород, но и оказывает значительное влияние на распределение и динамику ТОС в почве и ландшафте. Углеродный цикл в тундровых экосистемах тесно связан с изменением климата, что усугубляет вынос углерода за пределы экосистемы.



А. Морозобойное растрескивание – образование полигонов прямоугольной формы и различных размеров.



Б. Солифлюкция – сползание почвенно-растительного слоя по льдистому основанию при вытаивании едомного ледового комплекса.



В. Участок разрушения береговой линии р. Бёрёлёх (Елонь) сопровождается развитием термокарстовых озер (слева на снимке).



Г. Полигонально-валиковый рельеф южной тундры. На заднем плане – гидролакколит.

Рисунок 1. Типичные криогенные процессы, происходящие в южной тундре Яно-Индигирской низменности, представляющие современный облик ландшафта.

В таблице 1 представлены обобщенные результаты исследований почвенного покрова и запасов ТОС в южной тундре Яно-Индигирской низменности. Климат территории обуславливает медленное протаивание почвы в течение теплого периода, что не может не сказаться на мощности сезонно-талого слоя, являющегося своеобразным деятельным слоем с точки зрения протекающих в нем биохимических и физико-химических процессов, и одним из факторов, определяющих генерацию экосистемного органического углерода. В подстилке и торфяном горизонте биогеоценозов (среднее из 5 биогеоценозов) зафиксированы максимальные запасы Сорг. Общие запасы Сорг составляют – 50,21 т/га. На подстильно-торфяной горизонт приходится 47,29 т/га, а в горизонте G₁ всего – 2,92 т/га. Содержание Сорг распределено по

горизонтам в следующем порядке: О – 39,28; Т – 29,01 и G₁ – 1,62%. Столь низкое содержание углерода в горизонте почвы (G₁) указывает на выветривание минералов и относительно зрелую стадию почвообразования, и едва заметные признаки ожелезнения. Это характерно для всех биогеоценозов вне зависимости от типа растительности. Отметим, что вариативность содержания углерода заметно проявлялась в органо-аккумулятивных горизонтах (О и Т) от 12,7 до 46,8%. Притом, что степень разложения торфа (по фон Посту) была одинаковой в биогеоценозах на уровне Н5 – торф частично гумифицирован или со значительным содержанием перегноя. Растительные структуры все еще заметны, но отчасти довольно неясны. При сдавливании некоторое количество торфа проходит между пальцами вместе с очень мутной водой. Остаток в руке очень кашеобразен. Подобного разброса значений не наблюдалось в минеральном горизонте G₁ (min – 1,31% и max – 2,36%). Следовательно, структура органического вещества неоднородна из-за разнообразия видового состава растительных сообществ в данном регионе.

Таблица 1

Средние запасы общего органического углерода в напочвенном и почвенном покрове

Тип БГЦ	Тип почв	Горизонт почвы	Плотность, г/см ³	Сорг, %	Но _{бш} , %	C/N	Запасы Сорг, т/га
Тундра редкокустарниковая кустарничково- лишайниково- зеленомошная кочкарная	Перегнойно-торфяно-глеезёмы	О	0,274 ± 0,003	39,284 ± 1,561	0,989 ± 0,125	46,061 ± 2,445	12,358 ± 2,581
		Т	0,898 ± 0,023	29,009 ± 8,620	1,692 ± 0,123	18,008 ± 6,145	34,935 ± 5,821
		G ₁	1,406 ± 0,009	1,618 ± 0,178	0,088 ± 0,005	21,513 ± 2,366	2,916 ± 0,720

При дифференциации запасов ТОС по слоям высокие значения получены для органогенных горизонтов напочвенного покрова около 37 т/га (табл. 2).

Таблица 2

Пулы общего органического углерода в южной тундре (среднее из 5 биогеоценозов)

Тип БГЦ	Запасы Сорг в подстилке/торфяном горизонте, т/га	Запасы Сорг в минеральном слое почвы 0-10 см, т/га	Запасы Сорг в минеральном слое почвы 0-30 см, т/га
Тундра редкокустарниковая кустарничково-лишайниково-зеленомошная кочкарная	36,87±5,09	2,61±0,38	3,64±0,80

В минеральном слое 0–10 см законсервировано существенно меньше Сорг (на 90–93%) в результате низкого исходного содержания. В условиях южной тундры анаэробные условия повышают аккумуляцию органического углерода в напочвенном покрове. При этом накопленный растительный и органический материал ограничивает прохождение тепла вглубь минерального почвенного слоя, тем самым, снижая протаивание сезонно-талого слоя. Неравномерное распределение запасов общего органического углерода заметно проявляется в напочвенных горизонтах, что связано с плотностью органического материала, степенью мохообразования и разложения, видовым составом растений и содержанием в них Сорг. Причем разное количество запасенного углерода в органо-аккумулятивных горизонтах существенно не влияет на пул Сорг минеральных горизонтов. Вследствие этого в минеральную часть почвы поступает минимальное количество углерода, способного аккумулироваться в отложениях

верхнего ледового комплекса. Преобладающая часть продукции органического вещества сохраняется на поверхности в виде очёса и торфяного горизонта, которые подвергается разложению, а скорость минерализации в природных условиях остается низкой.

Выводы.

Исследования в южной тундре Яно-Индигирской низменности выявили значительное накопление ТОС, несмотря на деградацию многолетнемерзлых пород. В основном криогенные процессы способствуют убыли углерода, но и являются своеобразным покровным чехлом, сохраняющим часть потерянного углерода под осадочными отложениями, что имеет важное значение для понимания функционирования мерзлотных геосистем и оценки углеродного бюджета в Северном полушарии.

1. В анаэробных условиях южной тундры подстильно-торфяной слой играет ключевую роль в формировании верхнего почвенного пула ТОС, что подчеркивает его важность для углеродного цикла в мерзлотных ландшафтах.

2. Запасы ТОС распределены неравномерно по профилю почвы, что связано с разнообразием растительных сообществ и низкой степенью разложения органического материала. В минеральных горизонтах содержание Сорг значительно ниже по сравнению с подстилкой и торфом вследствие его низкого исходного содержания.

Работа выполнена при финансовой поддержке бюджетного проекта «Криогенные процессы и формирование природных рисков освоения мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (рег. № 122011400152-7) и важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

Литература

- 1 Feng X., Vonk J.E., van Dongen B.E. et al. Differential mobilization of terrestrial carbon pools in Eurasian Arctic river basins // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2013. V. 110 (35). P. 14168-14173.
- 2 Lavoie M., Mack M.C., Schuur E.A.G. Effects of elevated nitrogen and temperature on carbon and nitrogen dynamics in Alaskan arctic and boreal soils // *J. of Geophysical Research Atmospheres*. 2011. V. 116. G03013.
- 3 Fountain A.G., Campbell J.L., Schuur E.A.G. et al. The disappearing cryosphere: impacts and ecosystem responses to rapid cryosphere loss // *Biosciences*. 2012. V. 62. P. 405-415.
- 4 Bjorkman A.D., Myers-Smith I.H., Elmendorf S.C. et al. Plant functional trait change across a warming tundra biome // *Nature*. 2018. V. 562. P. 57-62.
- 5 Gentsch N., Mikutta R., Shibistova O. et al. Properties and bioavailability of particulate and mineral-associated organic matter in Arctic permafrost soils, Lower Kolyma Region, Russia // *Eur. J. Soil Sci.* 2015. V. 66. P. 722-734.
- 6 Sun T., Ocko I.B., Hamburg S.P. The value of early methane mitigation in preserving Arctic summer sea ice // *Environ. Res. Lett.* 2022. V. 17 (4). P. 044001.
- 7 Федоров А.Н. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1991. 140 с.
- 8 Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:8 000 000. Пояснительный текст и легенда к карте: Учебное пособие / Отв. ред. И. С. Урусевская. М.: МАКС Пресс, 2020. 100 с
9. Караваева Н.А. Тундровые почвы Северной Якутии. М.: Наука, 1969. 205 с.
- 10 Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Н.Н. Романовский, В.Н. Волкова, В.Н. Зайцев и др.; под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 514 с.
- 11 История развития многолетнемерзлых пород Евразии. М.: Наука, 1981. 197 с.