

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 631.417.1

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-397-407>

Оригинальная статья

Анализ запасов углерода в подстилке и почве Приленского плато

**А. Г. Шепелев^{✉,1,2}, М. Р. Григорьев^{2,3}, А. М. Черепанова¹,
Т. Х. Максимов^{2,3}, А. Н. Федоров¹**

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

³ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск, Российская Федерация

✉ carbon-shag@yandex.ru

Аннотация

Проведена верификация запасов углерода в подстилке и почве в высокопродуктивных лесах Приленского плато с использованием общепринятых методов общей биологии, ландшафтоведения и мерзлотоведения. Объектами исследований послужили лиственнично-березовые и сосново-лиственничные леса, произрастающие на сплошной мерзлоте, включая долголетнюю залежь. В отличие от лесных фаций залежь утратила органический углерод из почвы в результате освоения ресурсов лесного фонда до 83 % в толще 30 см. Запасы общего органического углерода (ТОС) в лесной подстилке варьировали от 17 до 35 кг/м². Почвенные запасы ТОС в слое 0–30 см лиственнично-березового разнотравно-брусничного леса составили 19,57 кг/м², в 1 м – 26,79 и 2 м – 34,98 кг/м². На участке сосново-лиственничного брусничного леса аналогичные показатели уменьшались до 9,28, 15,41 и 18,91 кг/м² и в залежи – 3,37, 6,35 и 8,91 кг/м² соответственно. Запасы неорганического углерода в лиственнично-березовом лесу в деятельном слое составили 3,46 кг/м², сосново-лиственничном брусничном лесу – 5,81 и в залежи – 4,35 кг/м². Леса Юго-Восточной Якутии как неотъемлемая часть планетарного резервуара углерода могут лишиться функции накапливать биогенные вещества при антропогенной нагрузке. Данная работа является начальным этапом долгосрочных исследований для систематизации пулов углерода в репрезентативных мерзлотных ландшафтах Якутии и по выявлению закономерностей изменения углерода в различных природно-климатических зонах.

Ключевые слова: общий органический углерод, общий неорганический углерод, запасы углерода, высокопродуктивный лес, многолетнемерзлые породы

Финансирование. Работа выполнена при реализации государственных проектов: «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); «Криогенные процессы и формирование природных рисков освоения мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (рег. № 122011400152-7); «Исследование биогеохимических циклов и адаптивных реакций растений бореальных и арктических экосистем северо-востока России» (рег. № АААА-А21-121012190034-2), с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» (рег. № 13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Шепелев А.Г., Григорьев М.Р., Черепанова А.М., Максимов Т.Х., Федоров А.Н. Анализ запасов углерода в подстилке и почве Приленского плато. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024; 29(3):397–407. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-397-407>

Assessment of carbon reserves in the litter and soil of the Prilenskoe Plateau

Andrei G. Shepelev^{✉,1,2}, Marat R. Grigoriev^{2,3}, Alexandra M. Cherepanova¹,
Trofim Chr. Maximov^{2,3}, Alexander N. Fedorov¹

¹Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
²Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
³Federal Research Centre Yakut Scientific Centre, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉carbon-shag@yandex.ru

Abstract

The assessment of carbon stocks in the litter and soil of highly productive forests on the Prilenskoe Plateau was conducted using widely accepted methods of general biology, landscape science and geocryology. The research focused on larch-birch and pine-larch forests situated on continuous permafrost, as well as on long-term fallow lands. Notably, the fallow land, in contrast to the forested areas, exhibited a significant loss of organic carbon from the soil, amounting to up to 83 % within a 30 cm depth due to the exploitation of forest resources. The total organic carbon (TOC) reserves in the forest litter ranged from 17 to 35 kg/m². In the larch-birch forb-lingonberry forest, the TOC reserves in the soil were measured at 19.57 kg/m² for the 0–30 cm layer, 26.79 kg/m² at 1 m depth, and 34.98 kg/m² at 2 m depth. Conversely, in the pine-larch lingonberry forest, these values decreased to 9.28 kg/m², 15.41 kg/m², and 18.91 kg/m², respectively, while in the fallow land, the measurements were 3.37 kg/m², 6.35 kg/m², and 8.91 kg/m². The total inorganic carbon (TIC) reserves in the active layer of the larch-birch forest were found to be 3.46 kg/m², in the pine-larch lingonberry forest 5.81 kg/m², and in the fallow land 4.35 kg/m². The forests of South-Eastern Yakutia represent an essential component of the global carbon reservoir; however, they may lose their nutrient accumulation function under anthropogenic pressures. This study serves as the preliminary phase of a long-term research initiative aimed at systematizing carbon pools in representative permafrost landscapes of Yakutia and elucidating the patterns of carbon variation across diverse natural and climatic zones.

Keywords: total organic carbon, total inorganic carbon, carbon stocks, highly productive forest, permafrost

Funding. This study was conducted during the implementation of the state projects: “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (No. 123030300031-6); “Cryogenic Processes and Natural Risks Associated with the Development of Permafrost Landscapes in Eastern Siberia” (No. 122011400152-7); “Study of biogeochemical cycles and adaptive reactions of plants of boreal and arctic ecosystems of northeastern Russia” (Reg. No. AAAA-A21-121012190034-2) and using the equipment of the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre SB RAS” (No. 13.CSRF.21.0016).

For citation: Shepelev A.G., Grigoriev M.R., Cherepanova A.M., Maximov T. Chr., Fedorov A.N. Assessment of carbon reserves in the litter and soil of the Prilenskoe Plateau. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(3):397–407. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-397-407>

Введение

Педосфера является одним из крупнейших резервуаров углерода на Земле после океана, аккумулируя 2500 млрд т поглощенного углерода [1]. Площадь, занимаемая мерзлотными почвами, составляет 8,6 млн км² – около 27 % всей суши к северу от 50° с.ш. [2]. При этом запасы органического углерода в разных климатических зонах России недооцениваются из-за сложной неоднородности [3] и ландшафтного разнообразия. В глобальном масштабе запасы углерода почв

оцениваются в 1417 Гт С, на долю Российской Федерации приходится 216 Гт С, или 15 % от мировых запасов [4]. В зависимости от приуроченности к экосистеме запасы углерода располагаются по убыванию (кг ТОС/м²): тундра – 18,6 [5, 6] → лесотундра – 18,3 [7] → средняя тайга – 17,9 [8] → северная тайга – 16,5 [9]. Приведенный количественный анализ в северных регионах свидетельствует об аккумулированном углероде за тысячи лет прошедших геологических эпох, в которых происходили изменения климати-

ческой системы, растительных сообществ и животного мира. В современный период сохранность и стабильность углерода в вечной мерзлоте во многом зависит от степени деградированности многолетнемерзлых пород (ММП) и антропогенного влияния на экосистему. Наиболее опасными в высвобождении углерода из ландшафтов Якутии являются деградированные площади ледового комплекса, в которых активно развиваются термокарстовые процессы вследствие сокращения объема подземных льдов и их таяния, а также повышения температуры ММП, что является причиной утраты органического углерода из состава почвенного органического вещества.

В России общая площадь ММП составляет около 11 млн км² – 2/3 территории страны. В Якутии мерзлотные почвы распространены в равнинных ландшафтах – 42 % (1,3 млн км²) и горных областях – 58 % (1,8 млн км²) [10]. Участки исследований приурочены к палевым почвам, которые занимают 14 %, или 0,43 млн км². В региональном плане для Якутии остаются неизведанными запасы углерода, расположенные в географическом и орографическом направлении следующим образом: северо-запад (Северо-Сибирская низменность), северо-восток (Яно-Оймяконское нагорье, Алазейское и Юагаирское плоскогорья) и юг (Приленское плато и Алданское плоскогорье). Довольно подробно изучены: Центрально-Якутская низменность [11–14], дельта р. Лена [2, 15–21],

Яно-Индигирская [13, 21] и Колымская [19, 22, 23] низменности. В работах отражаются геоморфологические и геологические особенности, физико-химические свойства почв, криогенные процессы и эколого-биологические параметры среды. По Приленскому плато с приграничным Алданским плоскогорьем существует детальное исследование по классификации и генезису почв [24].

Цель работы – оценка запасов углерода в репрезентативных мерзлотных экосистемах Приленского плато и проведение сравнительного анализа различий между лесом и залежным участком в изменении углерода.

Материалы и методы

Исследования проводились на высокопродуктивной лесной научной станции «Эльгээйи» Института биологических проблем криолитозоны СО РАН, которая находится на левом берегу р. Алдан в Юго-Восточной Якутии, 60° с.ш., 133° в.д. (в 60 км южнее от п. Усть-Мая) (рис. 1).

По классификации Б.П. Алисова рассматриваемый район находится в пятом климатическом Восточносибирском поясе. Климат провинции суровый и резко-континентальный. Зима продолжительная, малоснежная и холодная. Длительность периода с температурой воздуха ниже 0 °С – 240 дней. Лето короткое, умеренно теплое и не влажное. Длительность периода с температурой воздуха выше 0 °С – 125 дней. По многолетним данным,



Рис. 1. Схема расположения участков на научной станции «Эльгээйи»

Fig. 1. Layout of sites at the Elgeeyi scientific station

среднемесячная температура воздуха января составляет (–40 ... –44 °С), июля – +16 ... 18 °С, сумма годовых осадков – 400–500 мм.

По геоботанической характеристике территории исследований представлена высокопродуктивным типичным лиственничным лесом. Лиственничник брусничный с примесью березы повислой (*Betula pendula* Roth). Сомкнутость крон 0,6–0,7. Стволы слабосбежистые. Средняя высота стволов лиственницы 20 м. Средняя высота березы повислой – 10 м, при среднем диаметре стволов 7 см. Подрост лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.) высотой от 10 см до 3,5 м. Единично встречаются молодые деревья сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., высотой – 3,5 м). Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 70–80 %. Мохово-лишайниковый покров развит слабо (5–10 %) [25].

В геоморфологическом плане участки относятся к юго-восточной окраине Средней Сибири – Амгино-Алданской полого-увалистой провинции. Характерная черта рельефа Приленского плато – почти плоские ступенчатые междуречья и глубокое эрозионное расчленение. Поверхность имеет увалисто-лощинный мезорельеф, изобилует старицами и протоками, встречаются булгунняхи (бугры пучения на сухом или заболоченном днище озерной котловины, возникшие в результате неравномерного сегрегационного льдовыделения и формирования ММП [26]). Местность участка полого-увалистая с небольшими яминами (10–15 см). Из криогенных процессов широкое распространение имеют морозобойное растрескивание, пучение грунта и термокарст. Участки расположены в зоне распространения сплошной мерзлоты. ММП в типичных зональных условиях достигают мощности 30–50, иногда до 100 м [27]. Температура у подошвы слоя ее годовых колебаний изменяется от –1 до –3 °С.

Объекты исследования представлены двумя типами леса: лиственнично-березовым разнотравно-брусничным (60,015678° с. ш., 133,823511° в. д.) и сосново-лиственничным брусничным (60,009081° с. ш., 133,821126° в. д.); а также нарушенным участком (залежь – 20 лет), заросшим луговой растительностью (60,009641° с. ш., 133,827369° в. д.). Большая часть обследованных участков занята однообразными среднетаежными кустарничковыми и травянисто-кустарничковыми лиственничными лесами на палевых почвах.

Образцы почвы отбирались из свежевскопаных полнопрофильных почвенных разрезов. Мор-

фологическое описание профиля и отбор плотности почвы в естественном состоянии проводились по генетическим горизонтам почвы. Для определения содержания углерода образцы отбирали каждые 10 см до деятельного слоя почвы и верхней кровли многолетнемерзлых пород в трех определениях. Всего изъято 180 образцов из минеральных горизонтов и 15 образцов подстилки и опада. Анализ углерода и плотность сложения почвы выполняли в трех определениях. Образцы для плотности изымали стальными цилиндрами объемом 100 см³. Запасы углерода рассчитывали для каждой 10 см отобранной почвы, и затем общие запасы всей толщи с почвенного разреза суммировались с полученными показателями. Расчет запасов углерода проводили по формуле

$$S = \frac{X \times p \times H}{10},$$

где S – запасы углерода в почве, кг/м²; X – содержание углерода в почве, %; p – плотность сложения почвы, г/см³; H – мощность горизонта, см; 10 – коэффициент перерасчета запасов углерода в кг/м².

Для определения в минеральных горизонтах доли мелкозема <2 мм образцы просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм. Его доля во всех минеральных слоях составила 100 % без примесей горных пород, поэтому в формуле расчета запасов углерода этот показатель не учитывался. Отбор проб лесной подстилки на пробных площадках проводился при помощи рамки 25 × 25 см в 5-кратной повторности в межкрупном пространстве. Определение содержания углерода (общий органический углерод – ТОС и общий неорганический углерод – ТИС) в почве и растительности проводилось на сертифицированном анализаторе углерода LECO RC612.

Статистическая обработка полученных данных выполнялась в программе Microsoft Excel для Windows 10. Данные в статье представлены в виде средних арифметических со стандартной ошибкой средних значений (SD).

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлено описание разрезов почв на изучаемом полигоне. На почвенных разрезах встречаются интенсивно прокрашенные в черный цвет погребенные гумусовые горизонты, образовавшиеся в результате морозобойного растрескивания грунта и заполнения трещин органическими остатками. Содержание углерода

**Морфологическое описание почвенных разрезов,
заложенных на полигоне Эльгэи в Приленском плато**

Table 1

Morphological description of soil sections at the Elgeei Site within the Prilenskoe Plateau

Горизонт	Описание	
Лиственнично-березовый разнотравно-брусничный лес		
L	Опад	Мощность, 1 см
FH	0–9 см	Лесная подстилка из ветоши, хвои и березовых листьев темно-коричневого цвета, граница неровная
AU	9–11 см	Гумусовый горизонт темно-коричневого цвета, граница ясная
BPL	11–40 см	Супесь желто-коричневого цвета с оттенками палевого цвета, редкие корни, единичные включения древесного угля, граница плавная заметная
B	40–110 см	Суглинок легкий светло-коричневого цвета с включениями древесного угля и заплывами растворенного гумуса черного цвета. На глубине 110 см массивное скопление древесного угля. Граница сезонно-талого слоя на глубине 110 см, слабозаметная. Залегает на сильнольдистой мерзлоте
└BCca	110–200 см и ниже	Суглинок легкий с линзами льда, текстура линзовидная прерывистая
Тип почвы		Палевая темногомусовая типичная (Pales typical) – Naplic Cambisols
Сосново-лиственничный брусничный лес		
L	Опад	Мощность 2 см
FH	0–6 см	Лесная подстилка из ветоши, хвои и кустарничковых растений
AU	6–22 см	Гумусовый горизонт темно-серого цвета, языковатая граница, заметная. Сильно пронизан корнями
BPL	22–30(36) см	Супесь светло-коричневого цвета, включения древесного угля и корней, граница волнистая, заметная
B	30(36)–150 см	Супесь светло-серого цвета с тонкими корневыми волосками. Гетерогенный горизонт: на разных глубинах горный песок оранжевого цвета, расположенный хаотично. Разрозненные включения древесного угля. Граница заметная, неровная. На глубине 37 см погребенный гумусовый горизонт мощностью от 7 до 21 см, темно-серого цвета, граница волнистая
└C	150–210 см	Песок оранжевого цвета, однотонный и мерзлый. Сезонно-талый слой до 170 см, линзы льда отсутствуют. На глубине 160 см локальные заплывы растворенного древесного угля. Граница ясная. Залегает на сухоморозной мерзлоте
Тип почвы		Палевая темногомусовая типичная (Pales typical) – Naplic Cambisols
Залежь (20 лет)		
L	Опад	Мощность 0,5 см
Ad	0–7	Плотные корни, граница слабозаметная, неровная
P	7–27 см	Гумусовый горизонт темно-серого цвета, граница ровная, заметная
BPL	27–58 см	Суглинок средний, палевый, граница слабозаметная, переход постепенный, корни практически отсутствуют. Плотность сложения – средняя
BCA	58–195 см	Суглинок средний желтовато-коричневого цвета, обилие корней, граница ровная, заметная. Заплывы гумуса и скопления органического вещества на глубинах 59 и 64 см. На глубине 130–150 см педогенные карбонатные новообразования в виде псевдомицелия
C	195–220 см	Песок оранжевого цвета, однородный
Тип почвы		Агропалевая – Agropale

невысокое: в лиственнично-березовом лесу содержится ТОС – 3,98 % и общего углерода (ТС) – 4,81 %; в сосново-лиственничном лесу – 1,43 и 2,29 % соответственно. Это содержание углерода намного меньше, чем в криотурбированных

горизонтах арктических почв дельты р. Лена, где оно доходит до 30 % и и где может аккумулироваться до 450 Пг углерода в первых 3 м [28]. Почвы участков диагностируются в профиле по наличию бледной палевой окраски в горизонте

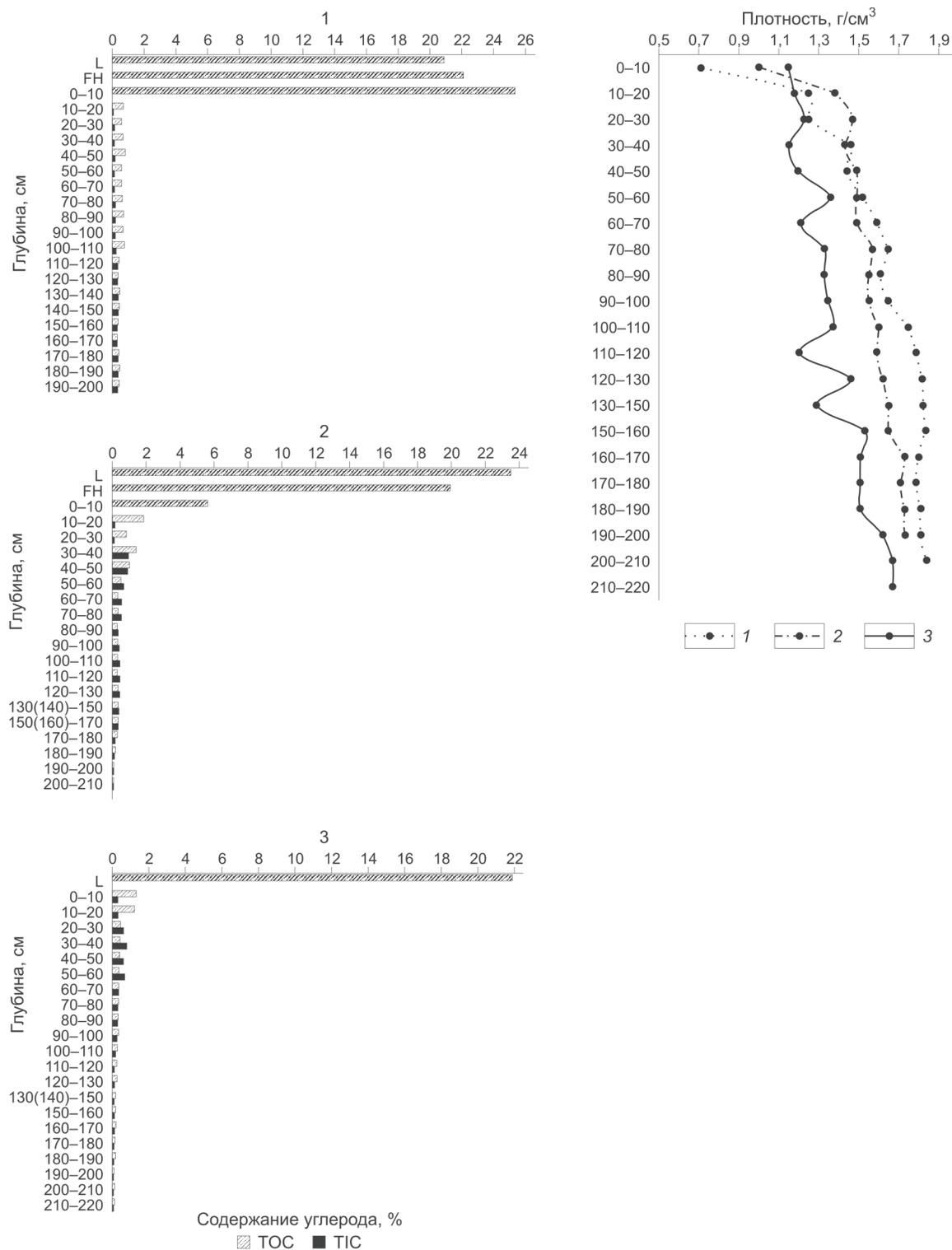


Рис. 2. Содержание органического и неорганического углерода, плотность почвы в различных типах лесного биогеоценоза. 1 – лиственнично-березовый разнотравно-брусничный лес; 2 – сосново-лиственничный брусничный лес; 3 – залежь (20 лет)

Fig. 2. Organic and inorganic carbon content and soil density in various types of forest biogeocenosis. 1 – larch-birch forb-lingonberry forest; 2 – pine-larch lingonberry forest; 3 – fallow land (20 years)

ВРЛ и имеют относительно небольшую мощность профиля. На поверхности агрегатов и минеральных зерен присутствуют тонкие тусклые железистые пленки, которые определяют невыразительную окраску горизонта. Почвы характеризуются нейтральной или слабощелочной реакцией и низким содержанием железа [29].

На ключевых участках ММП залегают на разных глубинах. Мощность деятельного слоя почвы колеблется от 110 до 170 см и ниже, причем она зависит от ряда признаков: рельефа, экспозиции склонов, почвообразующей материнской породы, типа почвы [13], растительности, фактора затененности и условий образования подземного льда. На открытом пространстве залежного участка ММП находятся ниже 250 см. Линзы льда обнаружены в лиственнично-березовом разнотравно-брусничном лесу, характеризуются шлировой криогенной текстурой. На псаммитовых отложениях в сосново-лиственничном брусничном лесу отсутствие льда и сегрегационного льдовыделения связано с отжатием влаги от фронта промерзания. Вследствие процесса промерзания песка ледяные шпирь не развиваются. В разрезе прослеживается сухоморозная мерзлота без включений кристаллов льда.

В плейстоцене и голоцене на поверхности почв развитие напочвенного растительного покрова как наиболее подвижной части органического вещества предопределило будущее накопление и запасы органического углерода в почвенной толще и ММП. На рис. 2 показаны изменения содержания органического и неорганического углерода в зависимости от приуроченности к типу леса. В количественном выражении наибольшее содержание ТОС зарегистрировано для горизонтов опада и подстилки. В опаде содержится от 20,94 до 23,48, в подстилке – от 19,94 до 22,12, а в гумусовом горизонте – от 5,63 до 25,37 %.

В материнской породе (легкий суглинок) и ММП (суглинок) содержание общего углерода в основном не превышает 1 %. Вариабельность углерода в этих толщах часто находится в пределах 0,66–0,85 %. Исключение составляет деятельный слой (110 см), разделяющий горные породы на верхнюю «теплую» почвенную толщу, подверженную сезонному таянию и промерзанию, и выступающий в роли барьера, защищающего вечную мерзлоту. В нем содержание ТОС составляет 0,68 %. На границе деятельного слоя и ММП при описании почвенного профиля зафиксированы значительные включения древесного угля

со средним содержанием ТОС 3,98 % и неорганической формы – 0,83 %, мигрировавшего с водными растворами.

Содержание ТОС в опаде и подстилке сосново-лиственничного леса незначительно отличалось по сравнению с лиственнично-березовым лесом. В опаде углерод варьирует от 20,85 до 26,02, в подстилке – от 19,60 до 20,26 %. Содержание углерода в погребенном гумусе на глубине 37 см составляет 1,43 %. В материнской породе (супесь) колебания ТОС находятся в пределах 0,14–0,35 %, а в деятельном слое – до 0,96 %. В многолетнемерзлых породах (песок) содержание уменьшается до максимально критических значений 0,05 %.

На залежном участке содержание ТОС в опаде составляет 20,51–24,53 %, тогда как в гумусовом горизонте отмечено всего лишь 1,28 %. В палео-метаморфическом горизонте показатели ТОС не превышают 0,38 %, в материнской породе ТОС варьирует в широких пределах от 0,14 до 0,33 %, минимальные значения отмечены для глубин 190–220 см – 0,09 %.

Почвы северных широт являются ключевым компонентом глобального углеродного цикла, а регион с вечной мерзлотой покрывает 22 % Северного полушария и содержит почти вдвое больше углерода, чем атмосфера [30]. В наших исследованиях запасы почвенного углерода различались в зависимости от типа леса и землепользования (табл. 2). Запасы органического углерода в слое 0–30 см достигают максимальных значений в лиственнично-березовом разнотравно-брусничном лесу, самые низкие значения зарегистрированы для долголетней залежи. Сосново-лиственничный брусничный лес занимает промежуточное положение. В лиственнично-березовом разнотравно-брусничном лесу в 2 раза и почти 5 раз больше запасов ТОС по сравнению с сосново-лиственничным типом леса и залежью соответственно. На этом примере можно убедиться, что за 20 лет неиспользование залежи не способствовало восстановлению углеродного фонда в почве. Очищение земли от леса, уничтожение лесной подстилки, усиление процессов минерализации и обработка почвы с целью возделывания сельскохозяйственных культур привели к потере органического углерода на долгий срок. За этот период также не произошло восстановления подроста молодого леса на залежи. Столь небольшие запасы органического углерода на залежном участке могут объясняться низким ис-

Таблица 2
Запасы почвенного углерода
в различных типах биогеоценоза

Table 2
Soil carbon reserves in various types of biogeocenosis

Глубина, см	ТОС	ТІС	ТС
	кг/м ²		
Лиственнично-березовый разнотравно-брусничный лес			
Подстилка	35,20	–	–
0–30	19,57	0,25	19,82
0–100	26,79	1,99	28,78
0–200	34,98	8,15	43,13
SD	1,69	0,05	1,33
Сосново-лиственничный брусничный лес			
Подстилка	17,00	–	–
0–30	9,28	0,31	9,59
0–100	15,41	6,67	22,09
0–210	18,91	10,46	29,37
SD	0,74	0,10	0,36
Залежь (20 лет)			
0–30	3,37	–	3,37
0–100	6,35	3,82	10,17
0–220	8,91	4,88	13,79
SD	0,08	0,08	0,12

Примечание. SD – стандартная ошибка средних значений.
Note. SD – standard error of the mean.

ходным содержанием углерода при том, что минеральные горизонты состоят из суглинки, обладающего более тяжелым гранулометрическим составом.

Противоположную связь показывает естественный лиственнично-березовый разнотравно-брусничный лес, его потенциал способствует поступлению в почву растительных остатков, что является природным стабилизатором углерода в составе почвенного органического вещества.

Суммарные запасы общего органического углерода без учета подстилки в 1 м под лиственнично-березовым лесом составляют 26,79 кг/м², сосново-лиственничным лесом – 15,41 кг/м² и в залежи – 6,35 кг/м². С учетом 2-метровой толщи почвы и ММП запасы ТОС на лесных участках повышаются на 23 и 19 % и залежи до 29 % соответственно. Это свидетельствует о том, что минеральные горизонты почвы стоит рассматривать равнозначными по отношению к поверхностным органогенным и органоминеральным горизонтам почвы. На залежном участке горизонты подстил-

ки отсутствуют, даже опад растений на поверхности почвы имеет слабую мощность в пределах 0,5 см. Вклад ТОС подстилки в лесных ценозах составляет от 17 до 35 кг/м², а их пул выше на 45 % по сравнению с запасами в слое 0–30 см. Наибольшее количественное выражение характерно для лиственнично-березового разнотравно-брусничного леса.

Таким образом, пул углерода лесных подстилок является своеобразным метаболитом леса, в разной степени трансформирующим органические растительные вещества до продуктов минерализации и образования гумусовых соединений в почве. При этом минеральный почвенный пул органического углерода равноценен напочвенному покрову. Это позволяет предположить, что углерод, высвободившийся из почвы в атмосферу, может перевести свою долю в углерод растений [20]. Определяющими факторами, оказывающими существенное влияние на величины запасов углерода в условиях высокопродуктивного леса Юго-Восточной Якутии, являются состав произрастающих растений, тип леса и вещественный состав почвы. Примесь лиственных пород оказывает положительное влияние на запасы углерода в почве по сравнению с чистыми по составу хвойными насаждениями. Причем на это не влияют геоморфологические особенности территории и рельеф местности, поскольку участки были подобраны единообразно по этим параметрам. Даже близкое залегание многолетнемерзлых пород и их вариации не сказались на количестве углерода, заключенного в толще почвы.

Заключение

Под высокопродуктивными лесами Юго-Восточной Якутии запасы органического углерода в метровом слое почвы максимальны в лиственнично-березовом лесу – 27 кг/м². В сосново-лиственничном лесу запасы сокращаются почти в 2 раза до 15 кг/м², а на залежи составляют только до 6 кг/м². В двухметровом деятельном слое запасы органического углерода повышаются на 23, 19 и 29 % соответственно, что следует учитывать при оценке региональных пулов почвенного углерода. Основная часть углерода в высокопродуктивных лесах сосредоточена в подстилке и первом метре почвы.

Неорганический углерод не зависит от типа биогеоценоза и породы, наименьшие его запасы зарегистрированы в метровом слое для лиственнично-березового леса – 1,99 кг/м², а на залежи

и сосново-лиственничном лесу составляют 3,82 и 6,67 кг/м² соответственно. Характерно, что под лиственнично-березовым лесом содержание неорганического углерода низкое в верхних и средних горизонтах почвы, а в нижнем слое резко возрастает, и запас этой формы увеличивается на 76 %. В сосново-лиственничном лесу и залежи наблюдается обратный порядок распределения запасов неорганического углерода в горизонтах почвы: высокое содержание в верхней и средней толщах, низкое – в нижних.

В условиях меняющегося климата важно знать количество депонированного органического углерода в почве и вечной мерзлоте Якутии с учетом различных географических зон. Существующие оценки хранения углерода в криолитозоне по большей части базируются на модельных расчетах, что лишь относительно выражает истинные запасы. Поэтому перед нами ставится постепенная и целенаправленная задача охватить все репрезентативные ландшафты Якутии по оценке фактического содержания углерода.

Список литературы / References

1. Wang J., Wilson R.S., Aristilde L. Electrostatic coupling and water bridging in adsorption hierarchy of biomolecules at water–clay interfaces. *Proc. Natl. Acad. Sci USA*. 2024;121(7):e2316569121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2316569121>
2. Zubrzycki S., Kutzbach L., Grosse G., et al. Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta. *Biogeosciences*. 10(6):3507–3524, <https://doi.org/10.5194/bg-10-3507-2013>
3. Zubrzycki S., Kutzbach L., Pfeiffer E.-M. Permafrost-affected soils and their carbon pools with a focus on the Russian Arctic. *Solid Earth*. 2014;5(2):595–609. <https://doi.org/10.5194/se-5-595-2014>
4. Chestnykh O.V., Grabovskiy V.I., Zamolodchikov D.G. Estimate of the soil carbon stock of forested regions in Russia using databases of soil properties. *Contemporary Problems of Ecology*. 2022;15:731–740. <https://doi.org/10.1134/S1995425522070071>
5. Schuur E.A.G., Abbott B.W., Commane R., et al. Permafrost and climate change: carbon cycle feedbacks from the warming Arctic. *The Annual Review of Environment and Resources*. 2022;47:343–371. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-011847>
6. Siewert M.B., Hanisch S., Weiss N. Comparing carbon storage of Siberian tundra and taiga permafrost ecosystems at very high spatial resolution. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 120(10):1973–1994. <https://doi.org/10.1002/2015JG002999>
7. Schepaschenko D.G., Mukhortova L.V., Shvidenko A.Z., et al. The pool of organic carbon in the soils of Russia. *Eurasian Soil Science*. 2013;46(2):107–116. <https://doi.org/10.1134/S1064229313020129>
8. Шепелев А.Г., Старостин Е.В., Федоров А.Н., Максимов Т.Х. Предварительный анализ запасов органического углерода и азота в породах ледового комплекса Центральной Якутии. *Наука и образование*. 2016;82(2):35–42.
9. Shepelev A.G., Starostin E.V., Fedorov A.N., Maksimov T.Kh. Preliminary analysis of organic carbon and nitrogen reserves in the rocks of the ice complex of Central Yakutia. *Nauka i obrazovanie*. 2016;(2):35–42. (In Russ.)
10. Десяткин Р.В., Оконешникова М.В., Десяткин А.Р. *Почвы Якутии*. Якутск: Бичик; 2009. 64 с.
11. Desyatkin R.V., Okoneshnikova M.V., Desyatkin A.R. *Soils of Yakutia*. Yakutsk: Bichik; 2009. 64 p. (In Russ.)
12. Iwasaki S., Hatano R., Desyatkin A.R., et al. Carbon stock estimation and changes associated with thermokarst activity, forest disturbance, and land use changes in Eastern Siberia. *Geoderma Regional*. 2018;14:e00171. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00171>
13. Lopez C.M.L., Hatano R., Guggenberger G., et al. Forest Fires Effects on Carbon Stocks and Soil chemistry in Central Yakutia, Eastern Siberia. *Journal of Eurasian Research*. 2012;15(1):9–17.
14. Shestakova A.A., Fedorov A.N., Torgovkin Y.I., et al. Mapping the main characteristics of permafrost on the basis of a permafrost-landscape map of Yakutia using GIS. *Land*. 2021;10(5):462. <https://doi.org/10.3390/land10050462>
15. Windirsch T., Grosse G., Ulrich M., et al. Organic carbon characteristics in ice-rich permafrost in alar and Yedoma deposits, central Yakutia, Siberia. *Biogeosciences*. 2020;17(14):3797–3814. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3797-2020>
16. Boike J., Kattenstroth B., Abramova K., et al. Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011). *Biogeosciences*. 2013;10(3):2105–2128. <https://doi.org/10.5194/bg-10-2105-2013>
17. Boike J., Nitzbon J., Anders K., et al. 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;11(1): 261–299. <https://doi.org/10.5194/essd-11-261-2019>
18. Faucher S., Jørgensen C.J., Blok D., et al. Short and long-term controls on active layer and permafrost carbon turnover across the Arctic. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2018;123(2):372–390. <https://doi.org/10.1002/2017JG004069>

18. Jenrich M., Angelopoulos M., Grosse G., et al. Thermokarst lagoons: A core-based assessment of depositional characteristics and an estimate of carbon pools on the Bykovsky Peninsula. *Frontiers in Earth Science*. 2021;9:637899. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.637899>
19. Loranty M.M., Natali S.M., Berner L.T., et al. Siberian tundra ecosystem vegetation and carbon stocks four decades after wildfire. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2014;119(11):2144–2154. <https://doi.org/10.1002/2014jg002730>
20. Palmtag J., Obu J., Kuhry P., et al. A high spatial resolution soil carbon and nitrogen dataset for the northern permafrost region based on circumpolar land cover upscaling. *Earth System Science Data*. 2022;14(9):4095–4110. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4095-2022>
21. Schiedung M., Bellè S.-L., Malhotra A., Abiven S. Organic carbon stocks, quality and prediction in permafrost-affected forest soils in North Canada. *Catena*. 2022; 213:106194. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106194>
22. Шмелев Д.Г., Краев Г.Н., Веремеева А.А., Ривкина Е.М. Содержание углерода в мерзлых отложениях Северо-Востока Якутии. *Криосфера Земли*. 2013;17(3): 50–59.
- Shmelev D.G., Kraev G.N., Veremeeva A.A., Rivkina E.M. Carbon pool of permafrost in North-Eastern Yakutia. *Kriosfera Zemli [Earth's cryosphere]*. 2013;17:50–59. (In Russ.)
23. Gentsch N., Mikutta R., Alves R.J.E., et al. Storage and transformation of organic matter fractions in cryoturbated permafrost soils across the Siberian Arctic. *Biogeosciences*. 2015;12(14):4525–4542. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4525-2015>
24. Оконешникова М.В., Лессовая С.Н., Десяткин Р.В. Почвы листовенных лесов стационаров «Спасская падь» и «Элгэйи» (Центральная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2018; 25(3):71–79. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-25-3-71-79>
- Okoneshnikova M.V., Lessovaya S.N., Desyatkin R.V. Soils of larch forests in “Spasskaya Pad” and “Elgeeyi” stations (Central Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2018;25(3):71–79. (In Russ.)
25. Федоров А.Н. *Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования*. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1991. 140 с.
- Fedorov A.N. *Permafrost landscapes of Yakutia: identification methods and mapping issues*. Yakutsk: In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR; 1991. 140 p. (In Russ.)
26. Баулин В.В., Дубиков Г.И., Аксенов В.И. и др. *Геокриологический словарь*. М.: ГЕОС, 2003. 140 с.
- Baulin V.V., Dubikov G.I., Aksenov V.I., et al. *Geocryological Dictionary*. Moscow: GEOS; 2003. 140 p. (In Russ.)
27. Fedorov A.N., Vasilyev N.F., Torgovkin Y.I., et al. Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) on a scale 1:1.500.000. *Geosciences (Switzerland)*. 2018;8:465. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120465>
28. Beer C., Knoblauch Ch., Hoyt A.M., et al. Vertical pattern of organic matter decomposability in cryoturbated permafrost-affected soils. *Environmental Research Letters*. 2022;(17):104023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9198>
29. Desyatkin R.V., Lessovaia S. N., Okoneshnikova M.V., Ivanova A.Z. Cryosols from tundra and taiga zones of Yakutia: properties, clay mineralogy, and problems of classification. *Eurasian Soil Science*. 2021;54(12): 1783–1794. <https://doi.org/10.1134/S1064229321120048>
30. Fedorov A.N. *Permafrost landscape research in the Northeast of Eurasia*. *Earth*. 2022;3(1):460–478. <https://doi.org/10.3390/earth3010028>

Об авторах

ШЕПЕЛЕВ Андрей Геннадиевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8836-2123>, ResearcherID: M-7299-2016, Scopus Author ID: 56146927300, SPIN: 9766-4679, e-mail: carbon-shag@yandex.ru

ГРИГОРЬЕВ Марат Робертович, лаборант, <https://orcid.org/0000-0002-3658-658X>, ResearcherID: AAB-1132-2022, SPIN: 5263-3683, e-mail: eidosmarat@mail.ru

ЧЕРЕПАНОВА Александра Михайловна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4638-4770>, ResearcherID: НКV-8412-2023, Scopus Author ID: 57189389513, SPIN: 4427-2311, e-mail: alexandra_587@mail.ru

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

ФЕДОРОВ Александр Николаевич, доктор географических наук, главный научный сотрудник, заместитель директора по науке, <https://orcid.org/0000-0002-4016-2149>, ResearcherID: K-2478-2016, Scopus Author ID: 22957332600, SPIN: 6083-1651, e-mail: anfedorov@mpi.ysn.ru

Вклад авторов

Шепелев А.Г. – разработка концепции, методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика и редактирование рукописи; **Григорьев М.Р.** – проведение исследования и статистического анализа; **Черепанова А.М.** – проведение статистического анализа и редактирование рукописи; **Макс-**

мов Т.Х. – разработка концепции, методология, верификация данных и редактирование рукописи; **Федоров А.Н.** – методология, верификация данных и редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

SHEPELEV, Andrei Gennadievich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8836-2123>, ResearcherID: M-7299-2016, Scopus Author ID: 56146927300, SPIN: 9766-4679, e-mail: carbon-shag@yandex.ru

GRIGORIEV, Marat Robertovich, Laboratory Assistant, <https://orcid.org/0000-0002-3658-658X>, ResearcherID: AAB-1132-2022, SPIN: 5263-3683, e-mail: eidosmarat@mail.ru

CHEREPANOVA, Alexandra Mikhaylovna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4638-4770>, ResearcherID: HKV-8412-2023, Scopus Author ID: 57189389513, SPIN: 4427-2311, e-mail: alexandra_587@mail.ru

MAXIMOV, Trofim Christoforovich, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, Acting Deputy General Director for Science and International Projects, <https://orcid.org/0000-0001-7003-5653>, ResearcherID: J-8964-2016, SPIN: 9160-8274, e-mail: tcmx@mail.ru

FEDOROV, Alexander Nikolaevich, Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher, Deputy Director for Science, <https://orcid.org/0000-0002-4016-2149>, ResearcherID: K-2478-2016, Scopus Author ID: 22957332600, SPIN: 6083-1651, e-mail: anfedorov@mpi.ysn.ru

Authors' contribution

Shepelev A.G. – conceptualization, methodology, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Grigoriev M.R.** – investigation, formal analysis; **Cherepanova A.M.** – formal analysis, writing – review & editing; **Maximov T.Ch.** – conceptualization, methodology, validation, writing – original draft; **Fedorov A.N.** – methodology, validation, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 01.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 26.06.2024

Принята к публикации / Accepted 11.07.2024