

Запасы углерода в почвах лесов Красноярского края: анализ роли типа почвы и древесной породы

© 2023. А. Ф. Осипов¹, к. б. н., с. н. с., В. В. Старцев¹, к. б. н., м. н. с.,
А. С. Прокушкин², к. б. н., зав. лабораторией,
А. А. Дымов^{1,3}, д. б. н., в. н. с., профессор,
¹Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
²Институт леса им. В. Н. Сукачёва –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок № 50,
³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, ул. Колмогорова, д. 1,
e-mail: osipov@ib.komisc.ru

Почвы являются крупнейшим резервуаром органического углерода наземных экосистем. Однако существующие оценки запасов органического углерода почвы ($C_{\text{орг}}$) характеризуются большими разбросами, что требует совершенствования методов расчётов $C_{\text{орг}}$, к которым можно отнести вычисление среднего запаса $C_{\text{орг}}$ для отдельных типов почв под разной растительностью. Цель настоящей работы – оценить средние запасы $C_{\text{орг}}$ в зависимости от типа почвы и преобладающей древесной породы для лесных экосистем Красноярского края. Расчёты были проведены для слоёв 0–30, 0–50 и 0–100 см минеральной части почвы и не включали углерод в лесной подстилке. Оценки усреднённых запасов выполнены по данным собственных исследований и описаниям почв, приведённым в литературе для лесов Красноярского края. Более высокая (24 ± 6 кг/м²) концентрация углерода наблюдалась в серых почвах, наименьшая – в подзолах ($6,2 \pm 0,7$ кг/м²). Установлено, что принадлежность к определённому типу почвы оказывала статистически достоверное влияние на запасы углерода во всех анализируемых слоях. Большая часть $C_{\text{орг}}$ концентрируется в слое 0–50 см, в котором сосредоточена основная масса корней растений. Тип преобладающей древесной породы не является статистически значимым фактором, определяющим $C_{\text{орг}}$. Рассчитанные нами величины $C_{\text{орг}}$ можно рассматривать как основу для создания базы данных по оценке запасов почвенного органического углерода в лесах Красноярского края.

Ключевые слова: углерод почвы, бореальные леса, Красноярский край.

Carbon stocks in forest soils of the Krasnoyarsk Region: analysis of soil and tree species role

© 2023. A. F. Osipov¹ ORCID: 0000-0003-0618-9660, V. V. Startsev¹ ORCID: 0000-0002-6425-6502,
A. S. Prokushkin² ORCID: 0000-0001-8721-2142, A. A. Dymov^{1,3} ORCID: 0000-0002-1284-082X

¹Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Federal Research
Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”,
Akademgorodok No. 50, Krasnoyarsk, Russia, 660036,

³Lomonosov Moscow State University,
1, Kolmogorova St., Moscow, Russia, 119991,
e-mail: osipov@ib.komisc.ru

Soils are the largest reservoir of organic carbon in terrestrial ecosystems. However, current estimates of pools of soil organic carbon (SOC) are characterized by the wide variations of obtained values. So, there is a requirement for upgrading of SOC calculation techniques. One of the ways is an evaluation of mean SOC for separate soil group or type of vegetation. The aim of this work is to determine mean SOC dependence on soil group and dominant tree species for forest

ecosystems of Krasnoyarsk Region. Calculations were carried out for next layers of mineral soil: 0–30 cm (reference layer FAO), 0–50 cm (root zone) and 0–100 cm (concentrates the most SOC of soil profile) that didn't include carbon stocks in forest litter. Estimates of the mean SOC were made according to our own research data obtained near ZOTTO (Zotino Tall Tower Observatory) and the results of soil descriptions given in the literature for the forests of the Krasnoyarsk Region. Higher concentration of carbon ($24 \pm 6 \text{ kg/m}^2$) was observed in Phaeozems but Albic Podzols contained the lowest stock of SOC ($6.2 \pm 0.7 \text{ kg/m}^2$). It was found that belonging to a certain soil group had a statistically significant effect on carbon stocks in all analyzed layers. Most of the SOC is concentrated in the 0–50 cm layer, which contains the bulk of plant roots. The type of dominant tree species is not a statistically significant factor in determining SOC. The values we have calculated can be considered as the basis for creating a database for subsequent estimates of SOC in the forests of the Krasnoyarsk Region.

Keywords: soil carbon, boreal forests, Krasnoyarsk Region.

Накопление в атмосфере парниковых газов, ведущих к изменению климата, обуславливает необходимость оценки углеродного цикла лесных экосистем планеты для разработки мероприятий по снижению негативных эффектов углеродсодержащих газов [1]. Леса бореального пояса являются значимым резервуаром органического углерода планеты, большая часть которого (около 70%) содержится в их почвах [2]. Поэтому уточнение запасов органического углерода почвы ($C_{\text{орг}}$) важно для разработки стратегий устойчивого развития и прогноза изменения климата [3].

Красноярский край – один из крупнейших регионов России, где лесистость составляет 45% [4]. Преобладающими породами деревьев являются лиственница (*Larix* sp.) (44%) и сосна (*Pinus sylvestris* L.) (14%). Темнохвойные леса, сформированные елью (*Picea obovata* Ledeb.), пихтой (*Abies sibirica* Ledeb.) и кедром (*Pinus sibirica* Du Tour) занимают около 23%, березняки и осинники – 19%.

В настоящее время сведения о запасах $C_{\text{орг}}$ для отдельных экосистем региона приведены в ряде работ [5–7], в которых отмечен значительный разброс величин $C_{\text{орг}}$ в зависимости от условий формирования экосистемы. Можно предположить, что одним из путей снижения разброса величин при оценках $C_{\text{орг}}$ для региона в целом может быть расчёт средних значений в зависимости от типа почвы или лесорастительных условий с последующей аппроксимацией на занимаемую ими площадь [8].

Цель настоящей работы – оценить средние значения запасов органического углерода в верхних слоях сезонно-промерзающих почв мощностью 30, 50 и 100 см под разными древесными породами в лесных экосистемах Красноярского края.

Объекты и методы исследования

По аналогии с [8] в данной работе применялся комплексный подход, представляющий

Таблица 1 / Table 1

Источники данных и распределение количества почвенных описаний по типам почв и древесным породам / Literature sources and distribution of soil descriptions on soil groups and tree species

Источник литературы Literature source	Количество разрезов / Number of soil pits		
	общее total	распределение / distribution	
		тип почвы soil group	древесная порода tree species
10	1	D (1)	C(1)
11	18	D(8), Gr(8), P(2)	Dc(1), L(2), Drc(2), C(13)
12	1	Gr	Dc (1)
13	1	P(1)	Drc (1)
14	1	P(1)	Dc (1)
15	7	D(2), P(5)	Dc (1), Drc (6)
16	3	D (3)	Dc (1), Drc (2)
17	1	Gr(1),	Dc (1)
Собственные данные / Own data	6	Pz (3), P (3)	C (3), Drc (3)

Примечание. Тип почвы: Pz – подзолы, P – подзолистые, D – дерново-подзолистые почвы, Gr – серые. Породы деревьев: Dc – лиственные (берёза, осина), L – лиственница, Drc – темнохвойные (ель, пихта, кедр), C – сосна. В скобках приведено количество разрезов.

Note. Soil groups: Pz – Albic Podzols, P – Haplic Retisols, D – Umbric Retisols, Gr – Phaeozems. Dc – deciduous (*Betula* sp., *Populus tremula* L.) tree species; L – *Larix sibirica* Ledeb., Drc – dark coniferous forest (*Picea obovata* Ledeb., *Abies sibirica* Ledeb., *Pinus sibirica* Du Tour), C – *Pinus sylvestris* L. The number of soil profiles is given in brackets.

собой сочетание собственных исследований и литературных данных, содержащих описания почвенных разрезов на территории средней и южной тайги Красноярского края. Были проанализированы данные по 33 разрезам сезонно-промерзающих почв, включающие информацию о мощности и содержании гумуса в отдельных горизонтах (табл. 1). Собственные исследования проводили на шести разрезах подзолов и подзолистых почв, заложенных в окрестностях базы Среднеенисейского стационара Института леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН (обсерватория ZOTTO, 60°43'–60°51' с. ш., 88°57'–89°34' в. д.). На подзолах произрастали сосновые леса, а на подзолистых почвах – темнохвойные. Следовательно, общее количество разрезов, по которым проводили расчёт, составило 39.

В соответствии с [9] были выделены следующие типы почв: подзолы (3 разреза), подзолистые (12 разрезов), дерново-подзолистые (14 разрезов) и серые (10 разрезов). По древесным породам участки были распределены следующим образом: сосняки – 17, темнохвойные леса (с преобладанием ели, кедр и пихты) – 14, лиственные (с преобладанием берёзы и осины) – 6, лиственничники – 2.

Описание разрезов, отбор проб на объёмный вес и химические анализы выполняли стандартными методами. В связи с тем, что литературные описания не содержали сведений об объёмном весе (ОВ) отдельных горизонтов, он рассчитывался по уравнениям зависимости ОВ от концентрации гумуса и глубины залегания горизонта для отдельных почвенных групп [18], которые дают достаточно достоверные величины [3]. Расчёт запасов углерода выполняли по формуле [19]:

$$C_{\text{орг.}} = 0,1 \cdot \text{ОВ} \cdot C \cdot H, \quad (1)$$

где $C_{\text{орг.}}$ – запас углерода в слое, кг/м²; ОВ – объёмный вес горизонта, г/см³; C – концентрация углерода, %; H – мощность горизонта, см; 0,1 – коэффициент для перевода в кг/м².

Расчёты запасов $C_{\text{орг.}}$ выполнены для слоёв 0–30, 0–50 и 0–100 см и не включали массу углерода в лесной подстилке. Выбор глубин связан с тем, что слой 0–30 см является эталонным слоем для оценки запасов $C_{\text{орг.}}$ в подразделениях Продовольственной и сельскохозяйственной Организации Объединённых Наций [3, 20]. Слой 0–50 см часто используется при оценках $C_{\text{орг.}}$ на региональном уровне, поскольку в этой толще происходит трансформация органического вещества почв после изменения

режима землепользования. Иногда этот слой называют «ризосферой» из-за расположения здесь большей массы корней растений и связанных с ними почвенных микроорганизмов, выделения которых непосредственно влияют на свойства почвы. На глубине 0–100 см сосредоточена большая часть $C_{\text{орг.}}$ в почвенном профиле, и этот слой обычно учитывается при создании почвенных карт.

Описательная статистика наборов данных $C_{\text{орг.}}$ включала среднее значение, его стандартную ошибку, минимальные/максимальные значения. Нормальность распределения наборов данных проверяли при помощи теста Шапиро-Уилка. Для оценки различий запасов $C_{\text{орг.}}$ в отдельных слоях между типами почв и древесными породами применяли ANOVA или его непараметрический аналог (критерий Краскела-Уоллиса) при распределении отличном от нормального. Парные сравнения выполнены при помощи *t*-критерия Стьюдента. Статистический анализ выполнен при уровне значимости 95% с использованием Microsoft Excel и R 4.03.

Результаты и обсуждение

Согласно полученным нами данным, запасы $C_{\text{орг.}}$ в верхнем метровом профиле подзолов в условиях средней тайги Красноярского края изменялись от 4,9 до 7,0 кг/м², а в подзолистых почвах – от 5,6 до 11,4 кг/м² (рис.). В подзолах на слой 0–30 см в среднем приходится 57% от $C_{\text{орг.}}$, содержащегося в метровом слое, тогда как в подзолистых почвах в нём сконцентрировано около 50% запасов углерода. В ризосфере (0–50 см) подзолов сосредоточено 77% от $C_{\text{орг.}}$ в слое 0–100 см, а в подзолистых почвах – 64%. Более значимая доля верхних горизонтов в общем запасе $C_{\text{орг.}}$ подзолов обусловлена относительно высокой концентрацией органического углерода в верхних слоях песчаных почв. В тяжёлых по гранулометрическому составу подзолистых почвах значительное снижение содержания углерода в нижних горизонтах не сопровождается соответствующим уменьшением его запасов вследствие увеличения объёмного веса почвы.

Запасы углерода в почвах варьируют в зависимости от типа почвы. В таблице 2 представлены результаты расчётов усреднённых значений запасов углерода в различных слоях почв с учётом их принадлежности к почвенному типу и в зависимости от древесной породы в лесных экосистемах Красноярского края. Установлено, что запасы $C_{\text{орг.}}$ метрового

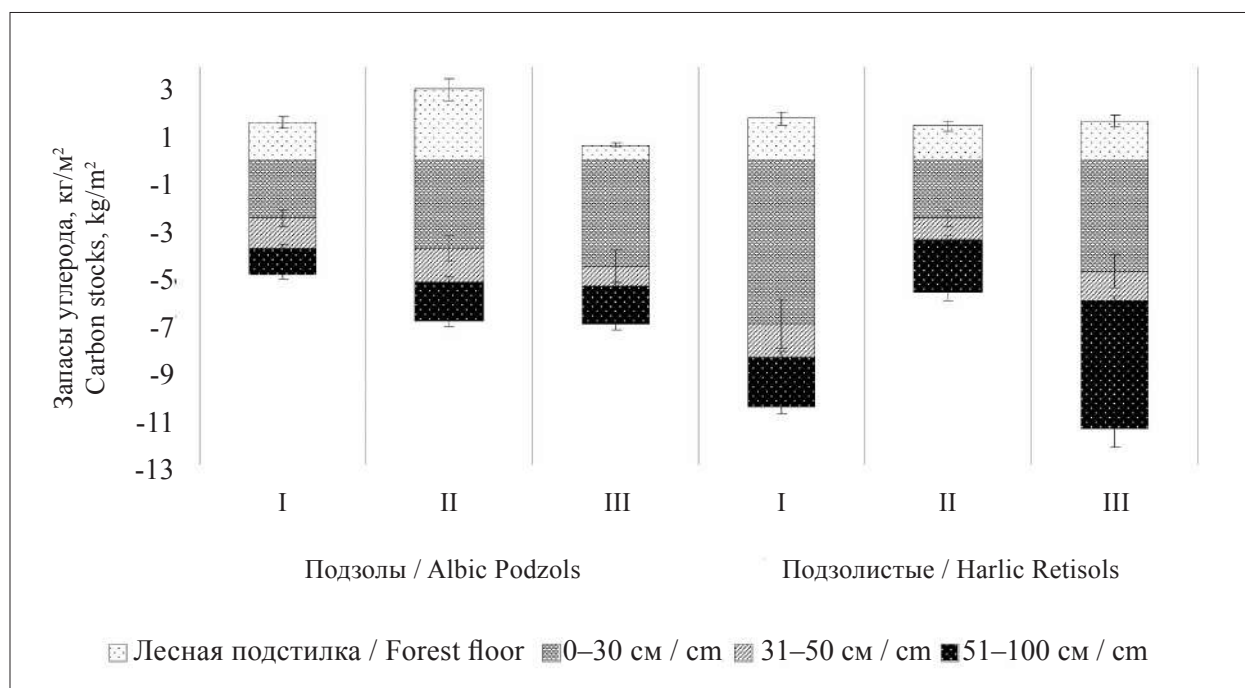


Рис. Запасы углерода в лесной подстилке и в верхнем метровом слое подзолов и типичных подзолистых почв (римские цифры – номера разрезов)
Fig. Carbon stocks in forest floor and upper 1-meter layer in Albic Podzols and Haplic Retisols. Roman numerals are numbers of soil profiles

профиля в разных типах почв изменяются от 6,2 до 24,3 кг/м², с более высокими значениями в серых почвах, низкими – в подзолах. Результаты факторного анализа показали, что тип почвы оказывает достоверное влияние на $C_{орг}$ в слое 0–100 см ($p = 0,006$). Однако не выявлены значимые различия в парах «дерново-подзолистые – подзолистые» ($p = 0,120$) и «дерново-подзолистые – серые почвы» ($p = 0,173$). Запасы $C_{орг}$ метрового профиля для остальных пар отличаются между собой ($p < 0,05$).

Согласно [21–23] средние значения $C_{орг}$ в слое 0–100 см, по которым в дальнейшем выполняются оценки запасов углерода в почвенном блоке крупных территорий, изменяются от 9,6 до 34,3 кг/м². Ранее было установлено [8], что средние запасы углерода в подзолах Республики Коми составили 3,80 кг/м², в подзолистых почвах – 7,69 кг/м², что ниже полученных нами результатов. По-видимому, более высокие значения $C_{орг}$ в подзолах Красноярского края по сравнению с Республикой Коми можно объяснить более частыми пожарами [24]. В то же время данные для подзолов исследуемого региона оказались несколько ниже, чем средние величины, приводимые в [21–23], что, вероятно, обусловлено небольшим количеством почвенных описаний, включённых в расчёт, и лёгким гранулометрическим составом почв. Однако для остальных почвенных

типов рассчитанные средние величины находятся в диапазоне существующих оценок. В работах [3, 8, 25] показано, что тип почвы является основным фактором, определяющим запасы $C_{орг}$ на региональном уровне. Следовательно, полученные средние оценки $C_{орг}$ для отдельных типов почв можно использовать при расчётах запасов углерода в почвенном блоке лесных экосистем Красноярского края.

Запасы углерода в верхних 30 см почвенного профиля характеризуются достаточно высокой вариабельностью. Так, меньший разброс (разница в 1,8 раза) значений отмечен для подзолов, более высокий (в 5,0 раз) – для серых почв. В дерново-подзолистых и подзолистых почвах эта величина изменялась в 3,0–4,4 раза соответственно. Выявлено, что этот слой концентрирует 48–59% от $C_{орг}$ метрового слоя, с меньшей долей в серых почвах. Тип почвы оказывает значимое ($p = 0,002$) влияние на запасы углерода в слое 0–30 см, достоверных различий между подзолистыми и дерново-подзолистыми почвами не отмечено ($p = 0,776$).

Запасы $C_{орг}$ в слое 0–50 см исследуемых типов почв изменяются от 4,8 до 15,6 кг/м², что составляет большую (64–77%) часть от слоя 0–100 см. Результаты факторного анализа показывают достоверное ($p = 0,002$) влияние типа почвы на массу углерода в этом слое. Од-

нако, как и в случае с вышележащим слоем, не выявлено различий между подзолистыми и дерново-подзолистыми почвами ($p = 0,565$). Ранее было показано [26], что основным фактором, определяющим значимое участие ризосферы в $C_{орг}$ метрового профиля, являются подземные органы растений. Во многом это связано с микроорганизмами, ассоциированными с корнями, выполняющими роль связывающих агентов при создании агрегатов и органоминеральных комплексов, что способствует закреплению органического вещества в верхних горизонтах почвы [27, 28].

Важную роль в процессах почвообразования играет растительный опад, разложение которого происходит на поверхности почвы и в лесной подстилке, в результате чего пополняются запасы органического вещества. Как следствие, важным пулом углерода в лесных экосистемах являются лесные подстилки [23].

В исследованных нами подзолах они концентрируют $0,7-3,0$ кг/м² углерода, в подзолистых почвах – $1,5-1,8$ кг/м² (рис.), что составляет $10-44$ и $15-27\%$ от $C_{орг}$ верхнего метрового профиля соответственно. В работе [17] установлено, что в южной тайге Красноярского края в зависимости от условий произрастания лесные подстилки сосредотачивают $0,4-1,7$ кг/м² углерода. По данным [4] в органо-генном горизонте на поверхности почвы запасы углерода варьируют от $0,5$ до $0,9$ кг/м². Следовательно, наряду с пополнением базы данных по запасам $C_{орг}$ минеральной части почвы, необходим также сбор сведений об участии лесных подстилок в аккумуляции органического углерода с учётом условий произрастания растений и функционирования почв.

Запасы углерода в почвах варьируют в зависимости от преобладающей древесной породы. В условиях Красноярского края от-

Таблица 2 / Table 2
Средние запасы углерода в зависимости от типа почвы и лесообразующей породы, кг/м²
Dependence of average carbon stocks on the group of soils and tree species, kg/m²

Тип почвы/древесной породы Type of soil/tree species	Почвенный слой / Soil layer					
	0–30 см / cm		0–50 см / cm		0–100 см / cm	
	M±SE ¹	min–max	M±SE	min–max	M±SE	min–max
Типы почв / Soil groups						
Подзолы (3) ² Albic Podzols (3) ²	3,6±0,6	2,45–4,51	4,8±0,5	3,73–5,37	6,2±0,7	4,87–6,96
Подзолистые (12) Naplic Retisols (12)	7,1±0,7	2,44–10,77	9,0±0,9	3,37–14,60	11,1±1,0	5,64–16,65
Дерново-подзолистые (14) Umbric Retisols (14)	7,4±0,7	4,18–12,56	9,7±1,0	4,95–16,85	14,6±1,9	7,16–26,83
Серые (10) Phaeozems (10)	11,8±1,5	3,83–19,08	15,7±2,0	3,95–21,87	24±6	7,07–41,86
Влияние типа почвы ³ Influence of soil group ³	$F = 6,21,$ $p = 0,002$		$F = 6,05,$ $p = 0,002$		$F = 5,25,$ $p = 0,006$	
Древесные породы / Tree species						
Сосна (17) <i>Pinus sylvestris</i> L. (17)	7,2±1,0	2,12–17,03	9,9±1,4	3,14–21,87	16±5	4,62–41,86
Темнохвойные (14) Dark coniferous forest (14)	7,3±0,8	2,44–12,56	9,4±1,0	3,37–16,85	11,3±1,0	5,54–16,91
Лиственницы (6) Small-leaved (6)	10,1±2,1	3,83–19,08	12,0±2,5	3,95–21,49	16,3±3,4	7,07–29,70
Лиственница (2) <i>Larix sibirica</i> Ledeb	13,0±1,0	12,04–13,96	17,3±0,9	16,45–18,22	20,9±1,0	19,90–21,94
Влияние древесной породы Influence of tree specie	$F = 2,45,$ $p = 0,098$		$F = 1,67,$ $p = 0,190$		$\chi^2 = 3,19,$ $p = 0,360$	

Примечание: ¹ – среднее ± стандартная ошибка, ² – в скобках количество разрезов, ³ – оценка различий между группами типов почв/породами по данным факторного анализа (для ANOVA приведено значение F, для критерия Краскела-Уоллиса – значение χ^2).

Note: ¹ – Mean ± standard error; ² – The number of soil profiles is given in brackets; ³ – Estimation of differences between soil groups / tree species according to factorial analysis (F are given for ANOVA and χ^2 for Kruskal-Wallis H test).

носителем высокие запасы углерода во всех исследуемых слоях почвы отмечены в лиственничниках. Однако эти различия статистически не значимы ($p > 0,05$). Вместе с тем, наблюдаемое увеличение средних величин $C_{орг.}$ в ряду «сосняки → темнохвойные леса → лиственные леса → лиственничники» укладывается в существующие представления о запасах углерода в почвах лесов, сформированных разными древесными породами. Так, сосняки, преимущественно занимающие низкопродуктивные песчаные почвы, обычно характеризуются меньшими запасами $C_{орг.}$ по сравнению с лесами, представленными другими породами деревьев, произрастающими на более плодородных глинистых и суглинистых почвах. Различия в запасах $C_{орг.}$ лиственничников, темнохвойных и лиственных лесов, вероятно, обусловлены качественным составом растительного опада. Так, опад берёзы, осины и лиственницы имеет более узкое отношение углерода к азоту, что свидетельствует о его относительно высокой скорости деструкции и, следовательно, скорости образования гумусовых веществ по сравнению с опадом темнохвойных пород [4]. В результате происходит более интенсивное накопление органического вещества в почвах, развивающихся под этими древесными породами.

Заключение

Рассчитаны запасы $C_{орг.}$ в различных слоях почв Красноярского края с учётом типа почв и преобладающей древесной породы. Подзолы характеризовались меньшими (в среднем $6,22 \text{ кг/м}^2$) запасами углерода в верхнем метровом слое, наибольшие его запасы (в среднем $24,32 \text{ кг/м}^2$) отмечались в серых почвах. В подзолистых почвах сосредоточено $11,1 \pm 1,0 \text{ кг/м}^2$, в дерново-подзолистых – $14,6 \pm 1,9 \text{ кг/м}^2 C_{орг.}$. Выявлено, что корнеобитаемый слой (0–50 см) аккумулирует большую часть углерода в почвенном блоке. Установлено, что тип почвы оказывает статистически значимое влияние на запасы углерода в почвенном профиле. Достоверного влияния типа древесной породы, являющейся эдификатором лесной экосистемы, на $C_{орг.}$ не установлено.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-29-05111-мк.

Литература

1. Paradis L., Thiffault E., Achim A. Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of

forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada) // *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2019. V. 92. P. 264–277.

2. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux // *Global and Planetary Change*. 2015. V. 128. P. 24–30.

3. Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepaschenko D.G. Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian Federation // *Eurasian Soil Science*. 2021. V. 54. P. 325–336.

4. Лесные экосистемы Енисейского меридиана / Под ред. Ф.И. Плешиков. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 356 с.

5. Bird M.I., Santrůcková H., Arneš A., Grigoriev S., Gleixner G., Kalaschnikov Y.N., Lloyd J., Schulze E.-D. Soil carbon inventories and carbon-13 on a latitude transect in Siberia // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2002. V. 54. P. 631–641.

6. Czimczik C.I., Schmidt M.W.I., Schulze E.-D. Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests // *European Journal of Soil Science*. 2005. V. 56. P. 417–428.

7. Gavrikov V.L., Sharafutdinov R.A., Knorre A.A., Pakharkova N.V., Shabalina O.M., Bezkorovaynaya I.N., Borisova I.V., Erunova M.G., Khlebopros R.G. How much carbon can the Siberian boreal taiga store: a case study of partitioning among the above-ground and soil pools // *Journal of Forest Research*. 2016. V. 27. No. 4. P. 907–912.

8. Osipov A.F., Bobkova K.S., Dymov A.A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia // *Geoderma Regional*. 2021. V. 27. Article No. e00427.

9. Классификация и диагностика почв России / Отв. ред. Г.В. Добровольский. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

10. Вередченко Ю.П. Агрофизическая характеристика почв центральной части Красноярского края. М.: АН СССР, 1961. 175 с.

11. Горбачев В.Н. Почвы нижнего Приангарья и Енисейского края. М.: Наука, 1967. 140 с.

12. Горбачев В.Н., Попова Э.П. Особенности почвообразования на лессовидных суглинках в южной тайге Средней Сибири // *Почвоведение*. 1984. № 2. С. 15–21.

13. Корсунов В.М. Подзолистые почвы автономных ландшафтов средней тайги приенисейской части Западной Сибири // О почвах Сибири: К 11 Междунар. конгрессу почвоведов / Под ред. Р.В. Ковалева. Новосибирск: Наука, 1978. С. 122–131.

14. Корсунов В.М., Ведрова Э.Ф. Диагностика почвообразования в зональных лесных почвах. Новосибирск: Наука, 1982. 160 с.

15. Корсунов В.М., Ведрова Э.Ф., Красеха Е.Н. Почвенный покров таёжных ландшафтов Сибири. Новосибирск: Наука, 1988. 167 с.

16. О почвах Урала, Западной и Центральной Сибири. М.: АН СССР, 1962. 212 с.

17. Попова Э.П., Горбачев В.Н. Особенности формирования и свойства подстилок лесных биогеоценозов

Среднего Приангарья // Почвоведение. 1988. № 1. С. 109–116.

18. Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G. Bulk density of soil horizons as dependent on their humus content // Eurasian Soil Science. 2004. V. 37. P. 816–823.

19. Hiederer R., Kchy M. Global soil organic carbon estimates and the harmonized world soil database. EUR 25225 EN. Publications Office of the European Union, 2011. 79 p.

20. FAO, 2017. Soil Organic Carbon: the hidden potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy [Электронный ресурс] <http://www.fao.org/3/a-i6937e.pdf> (Дата обращения: 01.02.2022).

21. Lal R. Forest soils and carbon sequestration // Forest Ecology and Management. 2005. V. 220. P. 242–258.

22. IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability // Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, 2007. 976 p.

23. Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Mukhortova L.V., Vedrova E.F. The pool of organic carbon in the soils of Russia // Eurasian Soil Science. 2013. V. 46. P. 107–116.

24. Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Petrov I.A., Im S.T., Ranson K.J. Larch forests of middle Siberia: long-term trends in fire return intervals // Regional Environmental Change. 2016. V. 16. No. 8. P. 2389–2397.

25. De Vos B., Cools N., Iivesniemi H., Vesterdal L., Vanguelova E., Carnicelli S. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey // Geoderma. 2015. V. 251–252. P. 33–46.

26. Jobbágy E.G., Jackson R.B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation // Ecological Application. 2000. V. 10. No. 2. P. 423–436.

27. Chen H.Y.H., Shrestha B.M. Stand age, fire and clearcutting affect soil organic carbon and aggregation of mineral soils in boreal forest // Soil Biology and Biochemistry. 2012. V. 50. P. 149–157.

28. Дымов А.А., Низовцев Н.А. Амфифильные свойства почвенного органического вещества в парцеллах преобладающих хвойных деревьев средней тайги // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 1. С. 62–68.

References

1. Paradis L., Thiffault E., Achim A. Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada) // Forestry: An International Journal of Forest Research. 2019. V. 92. P. 264–277. doi: 10.1093/forestry/cpz004

2. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux // Global and Planetary Change. 2015. V. 128. P. 24–30. doi: 10.1016/j.gloplacha.2015.02.004

3. Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Assessment of organic carbon stocks in forest soils on a regional scale // Eurasian Soil Science. 2020. V. 53. P. 339–348. doi: 10.1134/S1064229320030023

4. Forest ecosystems of the Yenisey Meridian / Ed. F.I. Pleshokov. Novosibirsk: SO RAN, 2002. 356 p. (in Russian).

5. Bird M.I., Santrůcková H., Arneith A., Grigoriev S., Gleixner G., Kalaschnikov Y.N., Lloyd J., Schulze E.-D. Soil carbon inventories and carbon-13 on a latitude transect in Siberia // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2002. V. 54. P. 631–641. doi: 10.3402/tellusb.v54i5.16699

6. Czimczik C.I., Schmidt M.W.I., Schulze E.-D. Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests // European Journal of Soil Science. 2005. V. 56. P. 417–428. doi: 10.1111/j.1365-2389.2004.00665.x

7. Gavrikov V.L., Sharafutdinov R.A., Knorre A.A., Pakharkova N.V., Shabalina O.M., Bezkorovaynaya I.N., Borisova I.V., Erunova M.G., Khlebopros R.G. How much carbon can the Siberian boreal taiga store: a case study of partitioning among the above-ground and soil pools // Journal of Forest Research. 2016. V. 27. No. 4. P. 907–912. doi: 10.1007/s11676-015-0189-7

8. Osipov A.F., Bobkova K.S., Dymov A.A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia // Geoderma Regional. 2021. V. 27. Article No. e00427. doi: 10.1016/j.geodrs.2021.e00427

9. Classification and diagnostics of soils of the Russia / Ed. G.V. Dobrovolski. Smolensk: Ojkumena, 2004. 342 p. (in Russian).

10. Veredchenko Ju.P. Agrophysical characteristics of soils in the central part of the Krasnoyarsk region. Moskva: AN SSSR, 1961. 175 p. (in Russian).

11. Gorbachev V.N. Soils of the lower Angara region and the Yenisei ridge. Moskva: Nauka, 1967. 140 p. (in Russian).

12. Gorbachev V.N., Popova E.P. Features of soil formation on loess-like loams in the southern taiga of Central Siberia // Pochvovedenie. 1984. No. 2. P. 15–21 (in Russian).

13. Korsunov V.M. Podzolic soils of autonomous landscapes of the middle taiga in the Yenisei part of Western Siberia // About the soils of Siberia: K 11 Mezhdunar. kongressu pochvovedov / Ed. R.V. Kovalev. Novosibirsk: Nauka, 1978. P. 122–131 (in Russian).

14. Korsunov V.M., Vedrova E.F. Diagnostics of soil formation in zonal forest soils. Novosibirsk: Nauka, 1982. 160 p. (in Russian)

15. Korsunov V.M., Vedrova E.F., Kraseha E.N. Soil cover of the taiga landscapes of Siberia. Novosibirsk: Nauka, 1988. 167 p. (in Russian).

16. On the soils of the Urals, Western and Central Siberia. Moskva: AN SSSR, 1962. 212 p. (in Russian)

17. Popova E.P., Gorbachev V.N. Peculiarities of formation and properties of litters of forest biogeocenoses in the middle Angara Region // *Pochvovedenie*. 1988. No. 1. P. 109–116 (in Russian).
18. Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G. Bulk density of soil horizons as dependent on their humus content // *Eurasian Soil Science*. 2004. V. 37. P. 816–823.
19. Hiederer R., Kchy M. Global soil organic carbon estimates and the harmonized world soil database. EUR 25225 EN. Publications Office of the European Union, 2011. 79 p. doi: 10.2788/13267
20. FAO, 2017. Soil Organic Carbon: the hidden potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy [Internet resource] <http://www.fao.org/3/a-i6937e.pdf> (Accessed: 01.02.2022).
21. Lal R. Forest soils and carbon sequestration // *Forest Ecology and Management*. 2005. V. 220. P. 242–258. doi: 10.1016/j.foreco.2005.08.015
22. IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability // Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, 2007. 976 p.
23. Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Mukhortova L.V., Vedrova E.F. The pool of organic carbon in the soils of Russia // *Eurasian Soil Science*. 2013. V. 46. P. 107–116. doi: 10.1134/S1064229313020129
24. Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Petrov I.A., Im S.T., Ranson K.J. Larch forests of middle Siberia: long-term trends in fire return intervals // *Regional Environmental Change*. 2016. V. 16. No. 8. P. 2389–2397. doi: 10.1007/s10113-016-0964-9
25. De Vos B., Cools N., Ilvesniemi H., Vesterdal L., Vanguelova E., Carnicelli S. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey // *Geoderma*. 2015. V. 251–252. P. 33–46. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.03.008
26. Jobbágy E.G., Jackson R.B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation // *Ecological Application*. 2000. V. 10. No. 2. P. 423–436. doi: 10.2307/2641104
27. Chen H.Y.H., Shrestha B.M. Stand age, fire and clearcutting affect soil organic carbon and aggregation of mineral soils in boreal forest // *Soil Biology and Biochemistry*. 2012. V. 50. P. 149–157. doi: 10.1016/j.soilbio.2012.03.014
28. Dymov A.A., Nizovtsev N.A. Amphiphilic properties of soil organic matter in parcels of predominant coniferous trees in the middle taiga // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 1. P. 62–68 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-1-061-068