

УДК 631.4

## ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ПЕСЧАНЫХ ПОЧВАХ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ НА ЗАПАДЕ РОССИИ

© 2020 г. А. И. Кузнецова<sup>a, \*</sup>, Н. В. Лукина<sup>a</sup>, А. В. Горнов<sup>a</sup>, М. В. Горнова<sup>a</sup>, Е. В. Тихонова<sup>a</sup>,  
В. Э. Смирнов<sup>a</sup>, М. А. Данилова<sup>a</sup>, Д. Н. Тебенькова<sup>a</sup>, Т. Ю. Браславская<sup>a</sup>,  
В. А. Кузнецов<sup>b</sup>, Ю. Н. Ткаченко<sup>c</sup>, Н. В. Геникова<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,  
ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, Москва, 117997 Россия

<sup>b</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

<sup>c</sup>Институт леса Карельского научного центра РАН,  
ул. Пушкинская, 11, Республика Карелия, Петрозаводск, 185910 Россия

\*e-mail: [nasta472288813@yandex.ru](mailto:nasta472288813@yandex.ru)

Поступила в редакцию 01.11.2019 г.

После доработки 25.02.2020 г.

Принята к публикации 27.02.2020 г.

Дана сравнительная оценка аккумуляции углерода в почвах сосновых лесов в Республике Карелия, на Карельском перешейке, Брянской области, формирующихся на почвообразующих породах легкого гранулометрического состава. Общие запасы углерода в слое 0–50 см, включая подстилку, варьировали от 47 т/га в почвах сосняков Брянского полесья до 116 т/га в почвах сосняков Карельского перешейка. Показано, что основными факторами аккумуляции углерода в почвах сосновых лесов на западе России являются климат, почвообразующие породы, состав растительности, хозяйственная деятельность и пожары. Влияние климатических условий ярко проявляется в уровнях аккумуляции углерода в подстилке и верхних гумусово-аккумулятивных горизонтах почв. В подстилке сосняков хвойно-широколиственных лесов (Брянская область) уровень аккумуляции углерода оказался самым низким, а в сосняках северной тайги (Республика Карелия) – самым высоким. При этом в верхних минеральных слоях почв северотаежных лесов, где отсутствует гумусово-аккумулятивный минеральный горизонт, отмечены наименьшие запасы углерода. Значительный вклад в вариабельность запасов подстилки вносит отношение C/N, а также доля листового подроста и трав, отличающихся высоким качеством опада (соотношением элементов питания и вторичных метаболитов). Влияние хозяйственной деятельности на запасы почвенного углерода в сосновых лесах особенно выражено на Карельском перешейке, территория которого в прошлом активно использовалась, а также в Брянском полесье, где леса формируются из культур сосны. Влияние пожаров на запасы почвенного углерода наиболее выражено в вересковых и брусничных сосняках тайги Карелии.

*Ключевые слова:* хвойно-широколиственные леса, таежные леса, качество опада, почвообразующие породы, Albic Podzols (Arenic), Entic Podzols, Брянское полесье, Карелия, Карельский перешеек

DOI: 10.31857/S0032180X20080109

### ВВЕДЕНИЕ

Леса имеют ключевое значение в регулировании циклов углерода, так как являются самыми распространенными наземными экосистемами. На долю России приходится 22% всех мировых лесных ресурсов и более половины бореальных лесов планеты. Сосновые леса имеют широкое распространение на северо-западе европейской части России [21] и занимают до 20% от покрытой лесом площади [26]. Широкое распространение сосновых лесов обусловлено как биологическими особенностями вида, так и ценными в лесохозяйственном отношении свойствами этой породы. Сосна, как раннесукцессионный вид, успешно возобновляется после рубок и пожаров естествен-

ным путем [21, 27]. Однако в последние десятилетия на северо-западе европейской части России площади сосновых лесов сокращаются [7, 27], что объясняется уменьшением частоты и интенсивности пожаров из-за увеличения количества осадков [6, 39]. Одновременное повышение температуры воздуха и участвовавшие засухи в других регионах могут, напротив, приводить к увеличению частоты пожаров, поэтому доля сосновых лесов там может возрастать. Для прогноза динамики биогеохимических циклов углерода и разработок мер по смягчению изменений климата необходимо идентифицировать факторы накопления углерода в почвах. Полагают, что на региональном уровне ведущую роль в формировании запасов почвен-

**Таблица 1.** Характеристика почвообразующих пород почв сосновых лесов на западе России, %

Подзона	Регион	<0.002 мм	Ca	Fe	Al
Северная тайга	Карелия	<u>1.46</u>	<u>1.68</u>	<u>1.83</u>	<u>4.08</u>
	<i>n</i> = 26	0.68	0.44	0.86	0.61
Средняя тайга	Карелия	<u>0.74</u>	<u>1.18</u>	<u>1.72</u>	<u>3.49</u>
	<i>n</i> = 11	0.79	0.21	1.08	0.48
	Карельский перешеек	<u>0.59</u>	<u>1.01</u>	<u>1.48</u>	<u>3.79</u>
Хвойно-широколиственные леса	<i>n</i> = 24	0.57	0.69	0.63	0.96
	Брянское полесье	<u>1.87</u>	<u>0.39</u>	<u>0.17</u>	<u>0.61</u>
	<i>n</i> = 6	1.05	1.05	0.11	0.40

Примечание. Здесь и в табл. 2 над чертой среднее, под чертой – стандартное отклонение.

ного углерода играют климатические условия [40]. Климатические факторы оказывают влияние на скорость разложения органического вещества, продуктивность и видовой состав растений, от которых зависит количество и качество растительного опада [30], регулирующего функционирование почвенной биоты. На уровень аккумуляции углерода влияет гранулометрический и валовой состав почвообразующих пород. Показано, что высокая доля тонких частиц способствует увеличению содержания почвенного углерода [33]. При более высоком содержании полуторных оксидов, в иллювиальных горизонтах почв фиксируется больше органического углерода [17]. В настоящее время на уровень аккумуляции почвенного углерода существенное воздействие оказывает хозяйственная деятельность, а также пожары [37].

Цель работы – оценить запасы углерода в песчаных почвах сосновых лесов на западе России (Республика Карелия, Карельский перешеек, Брянская область) и выявить возможные причины их варьирования.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Данные о почвах сосновых лесов таежных лесов получены в ходе работ в рамках международной программы ICP Forests в 2009–2010 гг. [2]. Данные о почвах сосновых лесов хвойно-широколиственной зоны получены в ходе полевых исследований 2015–2018 гг. Пробные площади в таежной зоне заложены в узлах регулярной сети 16 × 16 км на Карельском перешейке (*n* = 24) и 32 × 32 км в Республике Карелия (*n* = 26 в северной тайге, *n* = 11 в средней тайге). Пробные площади в Брянском полесье заложены на ключевых участках (*n* = 25), расположенных в южной части Брянского полесья в пределах заповедника “Брянский лес”. Среди сосняков выделены сосняки с преобладанием в напочвенном покрове неморально-разнотравья (сосняки сложные) и разнотравно-кисличные, среди сосняков кустарничково-зеленомошных выделены сосняки с преобладанием черники, брусники, вереска.

Средняя годовая температура воздуха в северной тайге Карелии – около 0°C, в средней тайге Карелии и Карельского перешейка – 2.8 и 5.4°C соответственно, в Брянском полесье – 5.9°C. Количество осадков в северной тайге составляет 525 мм, в средней тайге Карелии возрастает до 566 мм и достигает максимума на Карельском перешейке и в Брянском полесье – 633 и 644 мм соответственно. Продолжительность вегетационного периода (*t* > 5°C) в подзоне северной тайги Карелии составляет 131 суток, в подзоне средней тайги Карелии – 159 суток, в средней тайге Карельского перешейка – 179 суток, в Брянском полесье – 199 суток [11].

Сосновые леса формируются на почвах легкого гранулометрического состава, бедных элементами питания (табл. 1) [15, 23]. Эти леса значительно преобразованы хозяйственной деятельностью. На преобладающей части Карельского перешейка в прошлом финнами проводилась сельскохозяйственная обработка земель [20, 37]. В Карелии и особенно на Карельском перешейке до начала XX в. широко применялась подсеčno-огневая система земледелия [4]. В настоящее время одним из основных факторов, определяющих распространение, структуру и состав лесов остаются пожары, а также рубки [8].

Современный лесной покров Брянского полесья представлен вторичными древостоями, где широко распространены различные сосняки [21, 22]. Среди сосновых лесов на исследуемой территории наиболее распространены сосняки кустарничково-зеленомошные [3]. Из этих сообществ со временем могут сформироваться сложные сосняки [5, 32].

Объектами исследования в сосновых лесах северной тайги Карелии являлись подзолы [10]: Albic Podzols [40], в средней тайге Карелии, наряду с альфегумусовыми подзолами, встречаются подбуры [10] (Entic Podzols [40]). Для сосняков Брянского полесья и Карельского перешейка характерны дерново-подзолы [10]: Albic Podzols (Arenic) [41], с выраженным гумусовым горизонтом.

При описании сообществ заложены квадратные площадки по 400 м<sup>2</sup>. На всех площадках составлен полный флористический список с учетом ярусной структуры леса. В каждом ярусе

определено проективное покрытие видов по шкале Ж. Браун-Бланке (Braun-Blanquet, 1964, цит. по [14]). Классификация функциональных групп растений основана на делении видов растений по их таксономической принадлежности и жизненным формам [38]: 1) злаки и осоки; 2) травы – все травянистые растения, за исключением п. 1; 3) кустарнички – низкорослые, не имеющие главного ствола многолетники с одревесневшими побегами; 4) зеленые мхи; 5) лишайники.

В северной тайге Карелии сосновые леса доминируют в лесном покрове (более 70%), в средней тайге Карелии и на Карельском перешейке их участие значительно меньше – 42–53% [13]. В типологической структуре сосновых лесов северной и средней тайги Карелии доминируют черничники (38 и 36% соответственно) и брусничники (46 и 45%). Участие сосняков вересковых незначительно (12% в северной тайге и отсутствуют в средней), как и сосняков лишайниковых (4% в северной и 18% в средней), сосняки кисличные отсутствуют. На Карельском перешейке преобладают сосняки черничные (62.5%), доля сосняков брусничных мала (12.5%), заметно участие сосняков кисличных (25%).

В таежных лесах в составе верхнего яруса, помимо сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), характерно участие березы (*Betula* sp.) и примерно на половине площадок присутствует ель. На Карельском перешейке в сосняках часто (встречаемость 33%) присутствует рябина (*Sorbus aucuparia*), реже (встречаемость 13%) – ольха серая (*Alnus incana*), единично в древостое отмечен клен остролистный (*Acer platanoides*).

В ярусе подлеска и подроста, как и в древесном ярусе, покрытие лиственных видов в средней тайге Карелии минимально в сосняках лишайниковых. В средней тайге Карельского перешейка отмечается самый разнообразный видовой состав яруса подроста и подлеска (18 видов) и максимальная доля лиственных видов в проективном покрытии (ПП) яруса – 54.6%. В нем доминирует рябина (встречаемость 67%, ПП 8.1%) и крушина (*Frangula alnus*) (встречаемость 42%, ПП 2.9%), в подросте обычно присутствует ель (встречаемость 79%, ПП 3.4%).

В Брянском полесье доля сосняков составляет более 30% от всего лесного фонда [24]. Среди них наиболее распространены сосняки кустарничково-зеленомошные (70%), доля сосняков сложных 20% [3].

Сосняки кустарничково-зеленомошные представлены культурами сосны, которые возникли на месте сплошных рубок. Сомкнутость яруса деревьев составляет 50–70%. В древостое доминирует сосна обыкновенная, реже встречается (50%) береза (*Betula pubescens*), единично отмечены (5%) особи дуба (*Quercus robur*). Доля лиственных видов в древесном ярусе составляет менее 10%.

Сложные сосняки рассматриваются как продвинутая стадия развития сосняков кустарничково-зеленомошных [5]. Сосна по-прежнему доминирует (60%) в древостое. В ярусе деревьев встречаются ель, дуб, береза, липа (*Tilia cordata*), клен (*Acer platanoides*) и осина (*Populus tremula*).

В сосняках кустарничково-зеленомошных подрост (сомкнутость 10–50%) формируют светолюбивые дуб и береза, теневыносливая ель. Под пологом сложных сосняков в подросте (сомкнутость 30–65%) представлены преимущественно теневыносливые деревья: липа, клен, ель, вяз (*Ulmus glabra*).

В напочвенном покрове сосняков кустарничково-зеленомошных преобладают (45% проективного покрытия) кустарнички: черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus*), брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea*), вереск обыкновенный (*Calluna vulgaris*) и др. Покрытие трав составляет 27%, злаков – 23%, папоротников – 5. Видовая насыщенность в исследуемых лесах варьирует от 10 до 19 видов сосудистых растений на 400 м<sup>2</sup>. В сложных сосняках доминируют неморальные травы – 55%. Доля злаков и папоротников в сосняках кустарничково-зеленомошных и сосняках сложных сопоставима, а доля кустарничков в 4 раза меньше в сосняках сложных. По сравнению с сосняками кустарничково-зеленомошными в сосняках сложных видовая насыщенность существенно выше: на 400 м<sup>2</sup> насчитывается от 20 до 26 видов сосудистых растений. Покрытие яруса мхов в сосняках кустарничково-зеленомошных достигает 90%. В связи с увеличением сомкнутости верхних ярусов в сосняках сложных покрытие мохообразных уменьшается до 1–15%.

В Республике Карелия и на Карельском перешейке на каждой пробной площади отбирали образцы из четырех опорных разрезов по горизонтам (ФН, Е/А, В, ВС), из которых путем смешивания готовили усредненные с учетом горизонтов почв образцы. В Брянском полесье закладывали опорные разрезы, из которых отбирали образцы подстилки и минеральных горизонтов почв (каждые 10 см) до почвообразующей породы. Кроме того, на каждой пробной площади отобрали по 25 единичных проб из горизонтов L, ФН, АУ, Е, ВФ, которые смешивали с получением трех усредненных образцов для каждого горизонта.

В лабораторных условиях почвенные образцы высушивали, просеивали через сито 2 мм. Анализировали фракцию <2 мм. Во всех образцах определяли рН водной вытяжки потенциометрически. Гранулометрический состав почв определяли по методу ISO/DIS 11277 – для таежных образцов, по ГОСТ 12536-2014 – для образцов Брянского полесья. Валовое содержание металлов в горизонте ВС: методом ААС – для образцов из таежных лесов, рентгенофлюоресцентного анализа – для образцов Брянского полесья. Содержание углерода и азота исследовали на CHNS-анализаторе PE-2040

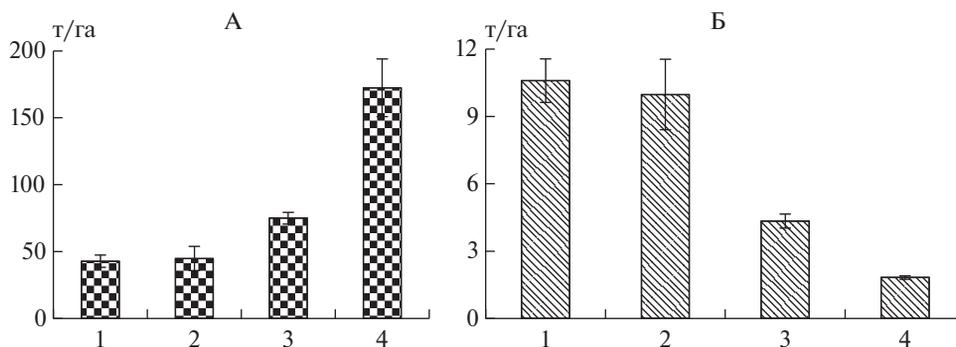


Рис. 1. Запасы (А) сосновых древостоев и запасы (Б) подстилки (т/га) в таежных и хвойно-широколиственных лесах (1 – северная тайга Карелии; 2 – средняя тайга Карелии; 3 – средняя тайга Карельского перешейка; 4 – хвойно-широколиственная зона Брянского полесья).

фирмы Perkin Elmer (США) для таежных образцов, на CHN-анализаторе (EA 1110 (CHNS-O)) для образцов Брянского полесья.

Для определения массы подстилки и запасов углерода в ней на каждой пробной площади дополнительно производили отбор подстилки с использованием рамки размером  $0.25 \times 0.25$  м в трехкратной повторности. Определение плотности сложения почвы проводили в опорных разрезах. В лабораторных условиях образцы почв и подстилки высушивали до сухого состояния при  $105^\circ\text{C}$  и взвешивали. При расчете запасов углерода использовали методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов [18]. Запасы углерода подстилки рассчитывали путем умножения веса пробы на содержание углерода. Запасы углерода в минеральных слоях рассчитывали путем умножения плотности почвы ( $\text{г}/\text{см}^3$ ), содержания углерода и мощности слоя.

Провели анализ влияния нескольких биотических факторов на запасы подстилки, определяющих запасы органического углерода в ней, с использованием модели множественной регрессии. В качестве независимых переменных выбрали отношение C/N в подстилке; долю древесных растений яруса В с быстроразлагаемым (лиственным) опадом, долю трав в ярусе С (по проективному покрытию) и число видов в ярусе С.

С помощью  $\nu$ -критерия [34] проверяли следующую нулевую гипотезу в отношении каждой переменной отдельно: среднее переменной в группе образцов равно среднему для всей выборки. Если нулевая гипотеза отклонена на принятом (5%-ном) уровне значимости, то можно говорить о том, что переменная отличается значимо высокими или низкими значениями для определенной группы и таким образом характеризует ее. Кроме того, отклонение нулевой гипотезы позволяют предположить, что сдвиг групповых средних относительно общего среднего вызван влиянием фактора, т.е. категориальной переменной, задающей группировку образцов. В нашем случае такими категори-

альными переменными были регионы исследования и типы сосновых лесов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Климат, состав почвообразующих пород и запасы почвенного углерода.** При оценках баланса углерода в лесах на региональном уровне подчеркивается ведущая роль климата в формировании запасов почвенного органического вещества [41]. Климатические условия (температура, количество осадков и др.) влияют на запасы почвенного углерода через регулирование продуктивности и состава растительности и почвенной биоты.

Известно, что продуктивность древесных растений закономерно уменьшается с юга на север [25], что подтверждают и наши данные (рис. 1). Годовое поступление опада в северотаежных сосновых лесах варьирует в пределах  $0.9\text{--}2.5$  т/га [16], в среднетаежных сосняках Карелии и Карельского перешейка –  $2.1\text{--}3.9$  т/га [9, 19], в сосняках подзоны хвойно-широколиственных лесов Брянского полесья –  $3.1\text{--}4.4$  т/га [29]. Как и следовало ожидать, несмотря на относительно высокие уровни поступления органического вещества с опадом в более южных районах, запасы углерода подстилки сосняков Брянского полесья оказались самыми низкими, а северной тайги – самыми высокими. Это связано с разницей в скорости разложения, что приводит к различиям в массе подстилки. Высокое содержание азота и узкое отношение C/N в подстилках сосняков Брянского полесья и Карельского перешейка (табл. 2) создают благоприятную для функционирования почвенной биоты среду, что приводит к уменьшению запасов подстилки и соответственно, запасов углерода в ней. Влияние климатических условий выражается в закономерном уменьшении запасов подстилки и запасов углерода в ней от подзоны северной тайги до сосняков в подзоне хвойно-широколиственных лесов.

При сравнении запасов углерода во всех минеральных слоях между подзонами обнаружено, что

Таблица 2. Характеристика почв сосновых лесов на западе России

Подзона	Регион	Горизонт	C <sub>общ.</sub> , %	N <sub>общ.</sub> , %	C/N	pH	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Северная тайга	Карелия <i>n</i> = 26	FH	41.8	0.92	48	4.3	—
			5.3	0.20	12	0.2	
		E	0.9	0.02	52	4.4	1.10
			0.7	0.02	50	0.7	0.21
		B	0.9	0.04	26	5.4	1.29
			0.6	0.05	17	0.4	0.2
Средняя тайга	Карелия <i>n</i> = 11	FH	39.7	0.83	51	4.3	—
			8.4	0.23	14	0.6	
		E/A	1.5	0.14	39	4.6	1.24
			1.3	0.27	37	0.3	0.20
		B	1.	0.04	35	5.2	1.45
			0.9	0.02	20	0.5	0.18
Хвойно-широколиственные леса	Карельский перешеек <i>n</i> = 24	FH	40.1	1.15	36	4.3	—
			7.4	0.29	9	0.4	
		E/A	2.8	0.20	21	4.6	1.69
			1.9	0.31	8	0.5	0.56
		B	1.4	0.08	19	5.2	1.98
			1.3	0.08	8	0.3	0.60
Хвойно-широколиственные леса	Брянское полесье <i>n</i> = 25	FH	36.9	1.51	25	4.9	—
			8.3	0.24	6	0.8	
		AУ	2.7	0.14	18	4.2	1.12
			1.7	0.09	3	0.5	0.11
		E	0.4	0.02	15	4.5	1.18
			0.1	0.01	3	0.4	0.22
	B	0.3	0.02	14	4.9	1.15	
		0.1	0.01	3	0.4	0.25	

наименьшие запасы в слое 0–10 см формируются в почвах сосновых лесов северной тайги (табл. 3). Это можно также объяснить менее благоприятными климатическими условиями, обуславливающими низкое качество опада доминирующих растений и низкую активность почвенной биоты, что тормозит разложение опада и подстилки и миграцию углерода в минеральную толщу почв, препятствует формированию гумусово-аккумулятивного минерального горизонта. Отношение C/N в почвах северной тайги значительно шире, чем в почвах других подзон во всей минеральной толще, что также указывает на менее интенсивный круговорот. Уровень аккумуляции в минеральных горизонтах может быть связан и с интенсивностью промывания почвенного профиля: вынос углерода из почв в низкопродуктивных северотаежных сосняках, формирующихся в ярко выраженных гумидных условиях, может быть на порядок меньше, чем в сосняках Брянского полесья [1].

Для того, чтобы продемонстрировать прямое влияние климата, проведено сравнение запасов углерода в почвах одного и того же типа леса (сосняков черничных) между всеми объектами исследований, расположенными в разных подзонах. Запасы углерода подстилки в сосняках чернич-

ных закономерно уменьшались от  $47 \pm 8$  т/га в северной тайге до  $8 \pm 1$  т/га в хвойно-широколиственных лесах, а запасы в слое 0–10 см, характеризующем гумусово-аккумулятивный горизонт, напротив, повышались от  $8 \pm 1$  до  $18 \pm 2$  т/га. Следовательно, несмотря на растительность сходного видового состава и, соответственно, сходного качества опада, запасы углерода в органических горизонтах почв сосняков, формирующихся в разных климатических условиях, существенно различались.

Таким образом, влияние климата на запасы почвенного углерода проявляется через регулирование температурного режима, продуктивности и состава растительности и через изменение водного режима.

На процессы аккумуляции почвенного углерода также влияет состав почвообразующих пород [17, 33]. Небольшие запасы углерода в нижних минеральных горизонтах почв Брянского полесья обусловлены небольшим содержанием валовых форм железа и алюминия в иллювиальных горизонтах, о чем свидетельствует положительная корреляция между содержанием углерода и алюминия ( $r = 0.91$  при  $n = 6$ ,  $P < 0.05$ ), углерода и железа ( $r = 0.84$  при  $n = 6$ ,  $P < 0.05$ ). Валовое содержание железа и

**Таблица 3.** Запасы почвенного углерода сосновых лесов разных регионов, т/га

Слой и горизонт	v-критерий*				Среднее				Стандартное отклонение				Общее среднее	Общее стандартное отклонение	p-value			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4			1	2	3	4
FN	5.2	2.5	-2.2	-5.0	44.1	41.1	17.0	6.8	22.6	24.2	6.3	2.4	25.3	22.2	0.000	0.011	0.031	0.000
0-10	-4.2	-1.3	4.9	0.3	9.1	15.2	39.0	23.5	6.1	12.3	24.6	12.6	22.5	19.4	0.000	0.188	0.000	0.740
0-30	-2.8	-0.4	5.1	-1.9	29.0	43.1	82.2	34.4	16.4	22.7	57.2	13.6	47.3	39.7	0.005	0.712	0.000	0.054
0-50	-2.0	-0.2	4.5	-2.3	43.3	57.3	99.6	40.1	24.7	33.2	76.1	14.8	59.9	51.0	0.047	0.863	0.000	0.021
FN-50	0.2	0.9	3.3	-4.2	87.4	98.4	116.6	46.9	33.2	43.2	77.9	15.6	85.3	54.8	0.809	0.345	0.001	0.000

\* Статистика v-критерия выступает в роли стандартизированной величины эффекта (влияния). Примечание. 1 – северная тайга Карелии ( $n = 26$ ); 2 – средняя тайга Карелии ( $n = 11$ ); 3 – средняя тайга Карельского перешейка ( $n = 24$ ); 4 – хвойно-широколиственная зона Брянского полесья ( $n = 25$ ).

алюминия – элементов, формирующих органо-минеральные комплексы, в почвообразующей породе почв сосновых лесов Брянского полесья оказалось наименьшим.

**Хозяйственная деятельность, пожары и запасы почвенного углерода.** Наряду с влиянием климата на функционирование лесов на региональном и локальном уровнях может оказывать влияние хозяйственная деятельность и пожары [35].

Наибольшие запасы углерода в минеральных слоях обнаружены в почвах сосновых лесов средней тайги Карельского перешейка, на формирование которых значительное воздействие оказала прошлая хозяйственная деятельность. Многолетняя сельскохозяйственная практика, связанная с внесением мелиорантов и удобрений, привела к накоплению углерода в гумусовом горизонте почв Карельского перешейка [1]. Об активной сельскохозяйственной практике свидетельствует также высокое содержание обменного кальция в верхних минеральных горизонтах при его низком валовом содержании в почвообразующих породах [36]. Запасы углерода в слоях 0–10 и 0–50 см почв, имеющих признаки предшествующего сельскохозяйственного использования, идентифицированных нами по наличию плужной подошвы и высокому содержанию кальция и углерода, составляли  $64 \pm 9$  и  $168 \pm 29$  т/га соответственно, тогда как в типичных лесных почвах запасы углерода в этих слоях оказались существенно ниже  $30 \pm 5$  и  $77 \pm 15$  т/га соответственно.

К другим объектам, созданным в результате хозяйственной деятельности, относятся сосняки с преобладанием черники и брусники в напочвенном покрове и сосняки сложные в Брянском полесье, которые сформировались из культур сосны после сплошных рубок в естественных лесах, причем сосняки сложные относятся к более продвинутой стадии развития. Соответственно, время создания культур повлияло на запасы углерода: в подстилках сосняков черничных и брусничных запасы углерода оказались существенно больше.

Пожарами, приводящими к смене типов леса, может объясняться варьирование запасов почвенного углерода в северной тайге. Так, самые высокие запасы углерода в минеральном слое 0–50 см отмечены в северотаежных сосняках с 40-летним древостоем и преобладанием вереска в напочвенном покрове, которые сформировались после относительно недавних пожаров [28]. Большое содержание и запасы углерода в минеральных горизонтах этих сосняков часто связано с их формированием на месте еловых лесов, где запасы углерода существенно выше, чем в сосновых лесах [1]. В среднетаежных сосняках брусничных, имеющих, как правило, послепожарное происхождение, обнаружены сходные тенденции. Наибольшие запасы углерода в слое 0–50 см (от 60 до 130 т/га) характерны для более молодых лесов (80–90 лет), в то время как в старовозрастных лесах (130–230 лет) запасы оказались значительно ниже и варьировали от 44 до 50 т/га. Уменьшение запасов углерода в минеральных горизонтах с возрастом сосновых лесов, сформировавшихся на месте еловых в результате пожаров, объясняется гораздо более интенсивным промыванием почвенного профиля сосняков по сравнению с ельниками [1].

Кроме того, накопление углерода в минеральных слоях почв сосновых лесов, может быть связано с его миграцией из разрушенной пожаром подстилки [35]. В других работах отмечается положительное долгосрочное влияние лесных пожаров на накопление органического вещества в минеральных горизонтах почв [31].

**Качество растительного опада и запасы почвенного углерода.** Одним из важнейших факторов аккумуляции почвенного углерода является качество растительного опада. Качество растительного опада – это соотношение элементов питания и вторичных метаболитов [30]. Одним из показателей качества опада является соотношение C/N [30, 40], регулирующее скорость разложения растительных остатков. Бореальные кустарнички рода *Vaccinium* отличаются по качеству опада, на что указывают и соотношения C/N подстилки: в

среднем 38 в черничниках и 46 в брусничниках. Максимальных значений (в среднем 54) это соотношение достигает в сосняках лишайниковых. Появление трав и увеличение разнообразия листовенных деревьев в составе подроста и подсека приводит к уменьшению С/Н в среднем до 26 и увеличению скорости разложения опада.

На локальном уровне этот механизм проявляется при сравнениях между лесами разных типов внутри подзон (табл. 4). В средней тайге Карелии доля листовенных видов в покрытии древесного яруса заметно выше в сосняках черничных по сравнению с сосняками брусничными и особенно с сосняками лишайниковыми (16.6, 5.4 и 1.6% соответственно). Более высокие запасы углерода в верхних минеральных слоях почв сосняков черничных с большой долей трав по сравнению с сосняками лишайниковыми в среднетаежных сосняках Карелии объясняются более активным разложением опада высокого качества и миграцией углерода вниз по почвенному профилю. В северной тайге наименьшие запасы углерода обнаружены в сосняках лишайниковых, тогда как различия между сосняками брусничными и черничными оказались не значимыми, что обусловлено менее выраженными, чем в средней тайге, различиями в составе напочвенного покрова.

На Карельском перешейке запасы почвенного углерода в разных типах леса, несмотря на различия в качестве опада, как в подстилке, так и минеральных горизонтах, оказались сопоставимыми, что объясняется сходным составом почвообразующих пород и интенсивной сельскохозяйственной практикой в прошлом, в результате которой сформировался гумусовый горизонт с высоким содержанием углерода. Однако влияние качества опада на аккумуляцию углерода в минеральных горизонтах почв выявляется при сравнении сосняков Карельского перешейка и таежных лесов Карелии. На Карельском перешейке видовое богатство растений оказалось в 3 раза больше (138 видов), чем в северо- и среднетаежных сосняках Карелии (42 и 51 видов соответственно). Созданные в результате интенсивной хозяйственной деятельности благоприятные почвенные условия, наряду с благоприятными климатическими условиями, могли способствовать повышению видового богатства растений, особенно трав и злаков. Высокое покрытие и богатство видов трав и злаков, отличающихся высоким качеством опада, и соответственно, высокой скоростью его разложения, способствует активной внутрипочвенной миграции органического вещества и накоплению углерода в минеральных слоях [1]. Это может являться одной из причин большого содержания и запасов углерода в минеральных слоях почв Карельского перешейка по сравнению с почвами северной и средней тайги Карелии и Брянского полесья.

Влияние качества опада проявляется и в хвойно-широколиственных лесах Брянского полесья. Несмотря на благоприятные климатические условия, в сосняках черничных и брусничных, созданных посадкой культур, формируется мощная подстилка, что обусловлено низким качеством опада доминирующих растений напочвенного покрова — бореальных кустарничков и зеленых мхов. Сосняки сложные представляют более продвинутой стадии развития культур, в составе сообществ здесь преобладают растения с высоким качеством опада, поэтому подстилка самая маломощная и запасы углерода в ней наименьшие. При этом развивается мощный гумусово-аккумулятивный горизонт. Вместе с сосной обыкновенной в лесах этого типа доля листовенных видов в древесном ярусе составляет более 30%, что способствует развитию значительной биомассы микроорганизмов и почвенных мезосапрофагов, приводит к быстрому разложению растительных остатков и, соответственно, к неразвитой подстилке и низким запасам углерода в ней [12]. При сходных климатических условиях запасы углерода подстилки значительно больше в сосняках черничных и брусничных, отличающихся низким качеством опада. Запасы углерода существенно больше в верхнем минеральном слое 0–10 см сосняков сложных по сравнению с сосняками черничными и брусничными.

При сравнении запасов почвенного углерода в сосняках наиболее распространенных типов (без разделения в соответствии с подзонами) обнаруживается, что подстилки сосняков сложных в целом накапливали меньше углерода, чем подстилки лесов остальных типов. В сосняках с преобладанием кустарничков, зеленых мхов и лишайников, напротив, отмечены самые высокие запасы углерода в подстилке (рис. 2).

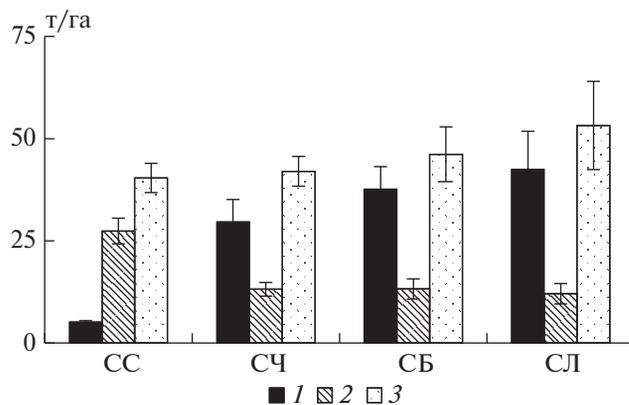


Рис. 2. Запасы углерода подстилки (1), верхних минеральных горизонтов (2), в слое 0–50 см (3) разных типов сосновых лесов Карелии и Брянского полесья (СС — сосняки сложные ( $n = 13$ ), СЧ — сосняки черничные ( $n = 22$ ), СБ — сосняки брусничные ( $n = 20$ ), СЛ — сосняки лишайниковые ( $n = 7$ )).

**Таблица 4.** Запасы почвенного углерода сосновых лесов разных типов разных регионов  
Запасы С, т/га

Слой, см	v-критерий					среднее					стандартное отклонение					общее среднее	общее стандартное отклонение	p-value				
	СС	СК	СЧ	СБ	СВ	СС	СК	СЧ	СБ	СВ	СС	СК	СЧ	СБ	СВ			СС	СК	СЧ	СБ	СВ
Северная тайга Карелии ( $n_{СЧ} = 10$ , $n_{СБ} = 12$ , $n_{СВ} = 3$ , $n_{СЛ} = 1$ )																						
FN	-	0.5	-0.7	0.7	-	47.0	40.9	52.5	29.6	-	25.8	20.5	28.2	-	44.2	22.7	-	0.613	0.498	0.496	-	
0-10	-	-0.9	-0.1	1.3	-	7.8	9.1	13.5	10.8	-	4.3	7.0	8.5	-	9.1	6.1	-	0.359	0.949	0.184	-	
0-30	-	-0.3	-1.0	2.4	-	27.9	25.6	50.4	18.5	-	14.3	14.7	20.6	-	29.1	16.4	-	0.768	0.320	0.016	-	
0-50	-	0.0	-1.4	2.7	-	43.5	35.8	80.1	22.6	-	23.1	20.5	18.2	-	43.3	24.7	-	0.982	0.147	0.006	-	
FN-50	-	0.4	-1.5	2.5	-	90.5	76.6	132.7	52.2	-	30.2	24.6	43.7	-	87.5	33.2	-	0.716	0.123	0.012	-	
Средняя тайга Карелии ( $n_{СЧ} = 4$ , $n_{СБ} = 5$ , $n_{СЛ} = 2$ )																						
FN	-	-1.2	0.7	-	0.6	29.4	46.6	-	51.0	-	17.3	30.9	-	16.1	41.2	24.2	-	0.225	0.496	-	0.525	
0-10	-	0.3	0.5	-	-1.0	16.7	17.4	-	7.0	-	10.5	15.8	-	3.0	15.3	12.3	-	0.770	0.596	-	0.294	
0-30	-	-0.2	1.4	-	-1.5	40.9	53.7	-	20.9	-	20.3	23.8	-	9.2	43.1	22.7	-	0.810	0.157	-	0.126	
0-50	-	-1.1	1.9	-	-1.1	43.8	77.2	-	33.2	-	12.9	36.6	-	14.9	57.3	33.2	-	0.286	0.058	-	0.251	
FN-50	-	-1.3	1.7	-	-0.6	73.2	123.8	-	84.2	-	31.9	48.1	-	1.3	100.7	43.2	-	0.187	0.091	-	0.545	
Средняя тайга Карельского перешейка ( $n_{СК} = 6$ , $n_{СЧ} = 15$ , $n_{СБ} = 3$ )																						
FN	-	0.6	-0.5	0.0	-	18.3	16.5	16.9	-	-	10.2	4.5	7.1	-	17.0	6.3	-	0.548	0.604	0.980	-	
0-10	-	0.4	-0.3	-0.1	-	42.8	37.9	37.4	-	-	29.7	25.2	16.2	-	39.1	24.6	-	0.666	0.765	0.899	-	
0-30	-	-0.8	0.7	0.1	-	65.7	88.3	85.2	-	-	42.9	67.2	17.4	-	82.3	57.2	-	0.413	0.504	0.925	-	
0-50	-	-0.8	0.8	-0.2	-	79.2	109.6	90.6	-	-	49.2	91.1	16.5	-	99.6	76.1	-	0.449	0.407	0.825	-	
FN-50	-	-0.7	0.8	-0.2	-	97.6	126.1	107.5	-	-	54.3	92.6	22.8	-	116.6	77.9	-	0.489	0.443	0.828	-	
Хвойно-широколиственная зона Брянского полесья ( $n_{СС} = 13$ , $n_{СЧ} = 8$ , $n_{СБ} = 4$ )																						
FN	-3.5	-	1.9	2.4	-	5.2	8.1	9.8	-	-	1.3	0.9	3.9	-	6.8	2.3	0.000	-	0.057	0.016	-	
0-10	1.6	-	-1.5	-0.1	-	27.4	18.1	22.9	-	-	15.7	5.9	9.6	-	23.5	12.6	0.113	-	0.139	0.930	-	
0-30	0.1	-	-0.5	0.4	-	34.6	32.6	37.5	-	-	16.9	8.8	14.3	-	34.4	13.6	0.937	-	0.647	0.670	-	
0-50	0.1	-	0.2	-0.5	-	40.4	40.8	36.0	-	-	17.9	9.8	18.5	-	40.1	14.8	0.925	-	0.869	0.612	-	
FN-50	-0.4	-	0.4	-0.1	-	45.5	48.9	45.9	-	-	18.3	10.3	22.3	-	46.9	15.6	0.658	-	0.656	0.904	-	

Примечание. СС – сосняки сложные, СК – сосняки разнотравно-кисличные, СЧ – сосняки черничные, СБ – сосняки черничные, СВ – сосняки брусничные, СЛ – сосняки лишайниковые.

**Таблица 5.** Результаты регрессионного анализа запасов подстилки

Модель	Коэффициент	Стандартная ошибка	<i>t</i>	Объясненная дисперсия, %	<i>P</i>
Константа	−0.857	0.362	−2.364		0.021
lg(ПП_В)	−0.004	0.001	−4.985	38.4	<0.001
lg(C/N)	0.742	0.224	3.307	37.9	0.001
lg(ПП_тр)	−0.205	0.090	−2.265	16.7	0.026
lg( <i>n</i> _С)	0.616	0.211	2.915	7.0	0.005

$$R_a^2 = 0.53; F = 24.4, v_1 = 4, v_2 = 79, P < 0.001$$

Примечание. Отклик в модели – десятичный логарифм запаса подстилки, [т/га]; предикторы: ПП\_В – доля подроста листовых пород деревьев, [%], C/N – отношение углерода к азоту в подстилке, ПП\_тр – доля трав в ярусе С, [%], *n*\_С – число видов в ярусе С.

Отношение C/N подстилки объясняет 38% вариации ее запасов, определяющих запасы органического углерода в ней, и положительно связано с уровнем ее накопления (табл. 5). Увеличение доли подростов листовых пород деревьев и трав, продуцирующих опад высокого качества, способствует повышению скорости разложения опада и снижению запасов подстилки. Доля подростов листовых пород деревьев объясняет 38% вариации запасов подстилки и отрицательно связана с уровнем ее накопления. Доля трав в ярусе С также отрицательно связана с запасами подстилки и объясняет 17% вариации запасов. Число видов в ярусе С объясняет незначительную часть дисперсии (7%), и наоборот, положительно связано с запасами подстилки. Нами ранее показано, что скорость разложения определяется участием видов, продуцирующих опад разного качества [1]. В данном случае эта связь демонстрирует положительное влияние на запасы подстилки увеличения количества видов с низким качеством опада (мохообразные, лишайники, бореальные кустарнички).

В отличие от закономерностей, отмеченных для подстилок, выявлена тенденция уменьшения запасов углерода в минеральных слоях 0–10 см от сосняков сложных до сосняков лишайниковых. В верхних минеральных слоях 0–10 см сосняков сложных, благодаря наличию гумусовых горизонтов, запасы углерода высоки по сравнению с сосняками других типов. При этом самые низкие запасы углерода в минеральных слоях отмечены в сосняках лишайниковых, что объясняется растительным опадом низкого качества.

## ВЫВОДЫ

1. Запасы почвенного углерода в сосновых лесах, формирующихся на почвах легкого гранулометрического состава в таежных и хвойно-широколиственных лесах, значительно различались. Общие запасы углерода с учетом подстилки и слоя 0–50 см варьировали от 47 т/га в почвах сосняков Брянского полесья до 116 т/га в почвах сосняков Карельского перешейка. В почвах средне- и северотаежных сосняков Карелии запасы угле-

рода составляли 100 и 87 т/га соответственно. Основными факторами аккумуляции углерода в почвах сосновых лесов на западе России являются климатические условия, почвообразующие породы, качество растительного опада, хозяйственная деятельность и пожары.

2. Влияние климата на запасы почвенного углерода проявляется в закономерном уменьшении запасов углерода подстилки и увеличении запасов углерода в гумусово-аккумулятивных горизонтах почв от сосняков северной тайги до сосняков хвойно-широколиственных лесов.

3. Влияние почвообразующих пород на запасы почвенного углерода проявляется через различия в их валовом составе. Низкое содержанием валовых форм железа и алюминия и кальция в почвообразующих породах Брянского полесья обуславливает небольшие запасы углерода в нижних минеральных горизонтах почв. Это объясняется бедностью почвообразующих пород железом и алюминием, что уменьшает интенсивность иллювирувания органического вещества, поступающего из верхних горизонтов почв.

4. Влияние растительности связано с качеством опада и проявляется при сравнении запасов почвенного углерода между типами сосняков в пределах подзон. В Брянском полесье влияние качества опада выражено в различиях запасов углерода в подстилках и верхних минеральных горизонтах между сосняками кустарничковыми (черничными и брусничными) и сложными, а в среднетаежных лесах Карелии – в подстилках и верхних минеральных горизонтах между сосняками черничными с высокой долей трав и сосняками лишайниковыми.

5. Влияние хозяйственной деятельности на запасы почвенного углерода ярко выражено в лесах Карельского перешейка и Брянского полесья. Многолетняя сельскохозяйственная практика внесения мелиорантов и удобрений привела к накоплению углерода в гумусовом горизонте почв Карельского перешейка. В сосняках черничных Брянского полесья, представляющих раннюю стадию развития сосновых культур, несмотря на благоприятные клима-

тические условия, из-за низкого качества опада формируются развитые подстилки. Хозяйственная деятельность, приводящая к смене растительности, оказывает существенное влияние на запасы почвенного углерода через изменение качества опада.

6. Влияние пожаров на запасы почвенного углерода максимально выражено в вересковых и брусничных сосняках северной тайги.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем благодарность коллективу экоаналитической лаборатории ЦКП “Хроматография” (регистрационный номер 3297) ИБ Коми НЦ УрО РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511257) за выполнение количественного анализа углерода и азота.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках проекта FP7 ERA – Net Sumforest-POLYFORES при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61618X0101).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / Под ред. Лукиной Н.В. М.: Тов-во научн. изданий КМК, 2018. 232 с.
2. Бахмет О.Н., Федорец Н.Г., Крышень А.М. Исследования по международной программе ICP-forests в Карелии // Тр. Карельского научного центра РАН. 2011. № 2. С. 133–139.
3. Булохов А.Д. Эколого-флористическая классификация лесов Южного Нечерноземья России. Брянск: Изд-во БГУ, 2003. 359 с.
4. Волков А.Д. Типы леса Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 180 с.
5. Горнов А.В., Горнова М.В., Тихонова Е.В., Шевченко Н.Е., Казакова А.И. Оценка сукцессионного статуса хвойно-широколиственных лесов европейской части России на основе популяционного подхода // Лесоведение. 2018. № 6. С. 16–30.
6. Громцев А.Н. Основы ландшафтной экологии европейских таежных лесов России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 238 с.
7. Громцев А.Н. Ретроспективный анализ общих тенденций антропогенной динамики лесного покрова на северо-западе таежной зоны России // Тр. Карельского научного центра РАН. 2003. № 4. С. 6–18.
8. Громцев А.Н., Кравченко А.В., Курхинен Ю.П., Сазонов С.В. Методы идентификации лесов на разных стадиях сукцессий и закономерности антропогенной трансформации флоры и фауны в условиях различных типов ландшафта северо-запада таежной зоны России // Разнообразие и динамика лесных экосистем России. Кн. 1. М.: Тов-во научн. изданий КМК, 2012. С. 96–130.
9. Казимиров Н.И. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 301 с.
10. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
11. Климат России: Научно-прикладной справочник [Электронный ресурс]. – <http://meteo.ru/pogodai-klimat/197-nauchno-prikladnoj-spravochnik-klimatrossii> (дата обращения 24.10.2019).
12. Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Смирнов В.Э., Гераськина А.П., Шевченко Н.Е., Тебенькова Д.Н., Чумаченко С.И. Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе восстановительных сукцессий // Почвоведение. 2019. № 7. С. 803–816. <https://doi.org/10.1134/S1064229319070081>
13. Лукина Н.В., Орлова М.А., Горнов А.В., Крышень А.М., Кузнецов П.В., Нязева С.В., Смирнов В.Э., Бахмет О.Н., Эйдлина С.П., Ершов В.В., Зукерт Н.В., Исаева Л.Г. Оценка критериев устойчивого управления лесами с использованием индикаторов международной программы ICP Forests // Лесоведение. 2013. № 5. С. 62–75.
14. Миркин Б.М., Розенберг Г.С., Наумова Л.Г. Словарь понятий и терминов современной фитоценологии. М.: Наука, 1989. 223 с.
15. Морозова Р.М. Географические закономерности формирования почвенного покрова Карелии // Биогеография Карелии. Тр. КарНЦ РАН. Сер. Биология. 2001. № 2. С. 12–18.
16. Никонов В.В. Запасы и состав подстилок вторичных сосняков на северном пределе произрастания // Почвоведение. 1986. № 6. С. 79–88.
17. Пономарёва В.В. Теория подзолообразовательного процесса (биохимические аспекты). М.: Наука, 1964. 381 с.
18. Распоряжение Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 30 июня 2017 г. № 20-р “О методических указаниях по количественному определению объема поглощения парниковых газов” [Электронный ресурс]. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71612096/> (дата обращения 01.07.2018).
19. Редько Г.И. Линдуловская листовициная роща: учебное пособие. Л.: ЛТА, 1984. 96 с.
20. Рожнова Т.А. Почвенный покров Карельского пещерейка. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 184 с.
21. Рысин Л.П., Савельева Л.И. Сосновые леса России. М.: Тов-во научн. изданий КМК, 2008. 289 с.
22. Семишников Ю.А. Фитоценологическое разнообразие Судость-Деснянского междуречья. Брянск: БГУ, 2009. 400 с.
23. Соколов Л.А. К вопросу классификации почвообразующих и подстилающих горных пород Брянского лесного массива // Вклад ученых и специалистов в национальную экономику. Т. 2. Брянск, 1998. 125 с.
24. Указ губернатора Брянской области от 18 декабря 2018 г. № 288 лесной план Брянской области [Электронный ресурс]. <https://www.bryanskleshoz.ru/lesnoy-plan-bryanskoj-oblasti/> (дата обращения 24.10.2018).
25. Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов (методы изучения и результаты) // Лесоведение и лесоводство. 1975. Т. 1. С. 9–190.

26. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В. Пулы углерода фитомассы и почв сосновых лесов России // Хвойные бореальной зоны. 2004. Т. 22. № 1–2.
27. Федорчук В.Н., Нешатаев В.Ю., Кузнецова М.Л. Лесные экосистемы северо-западных районов России: Типология, динамика, хозяйственные особенности. СПб.: СПбНИИЛХ, 2005. 382 с.
28. Ценофонд лесов Европейской России [Электронный ресурс]. [http://cepl.rssi.ru/bio/flora/forestype3\\_pin\\_frut\\_hyl.html](http://cepl.rssi.ru/bio/flora/forestype3_pin_frut_hyl.html) (дата обращения 24.10.2018).
29. Шаблий И.В. Формирование дубово-сосновых насаждений в условиях свежих судубрав Южной части Полесья и Северной лесостепи. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Киев, 1990. 25 с.
30. Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils // Forest ecology and Management. 2000. V. 133. № 1–2. P. 13–22.
31. Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review // Oecologia. 2005. V. 143. № 1. P. 1–10.
32. Evstigneev O.I., Korotkov V.N. Pine Forest Succession on Sandy Ridges within Outwash Plain (Sandur) in Nerussa-Desna Polesie // Russ. J. Ecosystem Ecology. 2016. V. 1(3). P. 1–18.
33. Fujisaki K., Chapuis-Lardy L., Albrecht A., Razafimbelo T., Chotte J.L., Chevallier T. Data synthesis of carbon distribution in particle size fractions of tropical soils: Implications for soil carbon storage potential in croplands // Geoderma. № 313. P. 41–51.
34. Husson F., Le S., Pagès J. Exploratory multivariate analysis by example using. Chapman R. & Hall/CRC. 2017. 248 p.
35. Johnson D.W., Curtis P.S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis // Forest Ecology and Management. 2001. V. 140. № 2–3. P. 227–238.
36. Lukina N.V., Tikhonova E.V., Danilova M.A., Bakhmet O.N., Kryshen A.M., Tebenkova D.N., Kuznetsova A.I., Smirnov V.E., Braslavskaya T. Yu., Gornov A.V., Shashkov M.P., Knyazeva S.V., Kataev A.D., Isaeva L.G., Zukert N.V. Associations between forest vegetation and the fertility of soil organic horizons in northwestern Russia // Forest Ecosystems. 2019. V. 6. № 1. P. 34.
37. Rautiainen A., Virtanen T., Kauppi P.E. Land cover change on the isthmus of Karelia 1939–2005: agricultural abandonment and natural succession // Environ. Science Policy. 2016. V. 55. P. 127–134.
38. Salemaa M., Derome J., Nöjd P. Response of boreal forest vegetation to the fertility status of the organic layer along a climatic gradient // Boreal Environ. Res. 2008. V. 13. P. 48–66.
39. Tikhonova E., Tikhonov G., Shevchenko N., Knyazeva S., Plotnikova A., Lukina N., Shashkov M. Tree diversity patterns along the latitudinal gradient in the Northwestern Russia // Forest Ecosystems. 2017. V. 4. № 27. P. 1–11.
40. Wiesmeier M., Urbanski L., Hobbey E., Lang B., von Lutetow M., Marin-Spiotta E., Wesemael van B., Rabot E., Ließ M., Garcia-Franco N., Wollschläger U., VogelfIngrid H.-J., Kögel-Knabner I. Soil organic carbon storage as a key function of soils—a review of drivers and indicators at various scales // Geoderma. 2019. V. 333. P. 149–162.
41. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports / IUSS Working Group. Rome: FAO, 2015. 203 p.

## Carbon Stock in Sandy Soils of Pine Forests in the West of Russia

A. I. Kuznetsova<sup>1,\*</sup>, N. V. Lukina<sup>1</sup>, A. V. Gornov<sup>1</sup>, M. V. Gornova<sup>1</sup>, E. V. Tikhonova<sup>1</sup>, V. E. Smirnov<sup>1</sup>, M. A. Danilova<sup>1</sup>, D. N. Tebenkova<sup>1</sup>, T. Yu. Braslavskaya<sup>1</sup>, V. A. Kuznetsov<sup>2</sup>, Yu. N. Tkachenko<sup>3</sup>, and N. V. Genikova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Center for Forest Ecology and Productivity, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

<sup>3</sup>Forest Research Institute of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, 185910 Russia

\*e-mail: [nasta472288813@yandex.ru](mailto:nasta472288813@yandex.ru)

A comparative assessment of carbon accumulation in the soils of pine forests in western Russia (the Republic of Karelia, the Karelian Isthmus, and Bryansk oblast) developed from coarse-textured parent materials is given. The total carbon stock in the soil organic horizon and upper soil layer (0–50 cm) varies from 47 t/ha in the soils of pine forests of Bryansk oblast to 116 t/ha in the soils of pine forests of the Karelian Isthmus. It is shown that the main factors of carbon accumulation in the soils of pine forests in western Russia are the climate, parent materials, vegetation, agricultural activity, and fires. The influence of climatic conditions is clearly manifested in the levels of carbon accumulation in the soil organic horizon and in the upper humus-accumulative soil horizons. In the pine soil organic horizon within the zone of mixed forests (Bryansk oblast), the level of carbon accumulation is the lowest, whereas the litter layer of pine forests in the northern taiga (Karelia) has the highest stock of carbon. At the same time, the lowest carbon stocks in the upper mineral soil layers are noted for the soils of northern taiga forests, in which the humus-accumulative mineral horizon is absent. The variability of stocks in the soil organic horizon layer is largely controlled by the C/N ratio, as well as by the proportion of deciduous undergrowth and grasses producing high-quality litter. The influence of agricultural activity on soil carbon stock in pine forests is especially pronounced on the Karelian Isthmus with the high agricultural activity in the past, as well as in Bryansk oblast, where pine forests are formed from pine crops. The effect of fires on soil carbon stock is most pronounced in heather and lingonberry pine forests of the northern taiga of Karelia.

**Keywords:** C/N, coniferous-deciduous forests, taiga forests, litter quality, parent rocks, Albic Podzols (Arenic), Entic Podzols, Bryansk region, Karelia, Karelian Isthmus