

АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ
НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

МАССА ТОНКИХ КОРНЕЙ В ПОЧВАХ ЛЕСНЫХ СООБЩЕСТВ
НА ПОСТАГРОГЕННЫХ ЗЕМЛЯХ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ
(НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ)

© 2021 г. А. Ю. Карпечко^{1, *}, А. В. Туюнен¹, М. В. Медведева¹, Е. В. Мошкина¹,
И. А. Дубровина², Н. В. Геникова¹, В. А. Сидорова², А. В. Мамай¹,
О. В. Толстогузов³, Л. М. Кулакова³

¹Институт леса – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”,
г. Петрозаводск, Россия

²Институт биологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”,
г. Петрозаводск, Россия

³Институт экономики – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”,
г. Петрозаводск, Россия

*e-mail: anna.karpechko@gmail.com

Поступила в редакцию 07.05.2020 г.

После доработки 24.09.2020 г.

Принята к публикации 10.12.2020 г.

Определена и проанализирована масса тонких корней (диаметром до 2 мм) в лесных сообществах, которые сформировались на участках, использовавшихся в прошлом с сельскохозяйственными целями. Объекты изучения располагаются в среднетаежной подзоне, вблизи г. Петрозаводска (южный агроклиматический район Республики Карелия). Пробные площади были заложены в смешанном мелколиственном сообществе возрастом 20 лет и в 65- и 110-летних еловых лесах. Установлено, что наиболее высокая масса тонких корней характерна для лиственного древостоя, наиболее низкая – для 65-летнего елового древостоя с примесью лиственных пород. С увеличением возраста древостоя процентная доля тонких корней в общей подземной фитомассе снижается. Показано, что соотношение массы тонких корней березы и ели европейской не соответствует их доле в общем запасе стволовой древесины. Наибольший запас подстилки характерен для 110-летнего ельника, наименьший – для 20-летнего березняка. В еловых лесах при увеличении возраста древостоя от 65 до 110 лет доля тонких корней в общем запасе подстилки не изменяется.

Ключевые слова: постагроденные леса, мелколиственные леса, еловые леса, подземная фитомасса, масса тонких корней, запас подстилки

DOI: 10.31857/S0033994621010088

Леса, возобновляющиеся на землях постагроденного использования, являются эффективным поглотителем углерода [1–4]. В настоящее время Россия занимает лидирующие позиции по площади земель, выведенных из сельскохозяйственного оборота [5, 6]. Лесовосстановление в одних и тех же физико-географических условиях может проходить по разным сценариям [7–9]. Площадь зарастающих земель, тип почвы, таксационные показатели окружающих насаждений, а также вид сельскохозяйственного использования участков до момента его прекращения – все это отражается на показателях восстанавливающихся экосистем [10–12].

Основная функция тонких корней – снабжение дерева питательными веществами и водой [13–16]. Они играют важную роль в круговороте углерода в связи с более высокой скоростью разложения, по сравнению с надземными частями деревьев [17]. Согласно некоторым исследованиям [16, 18], доля тонких корней в ежегодной чистой первичной продукции бореальных лесов составляет 32%, при этом их участие в общей древесной биомассе составляет менее 5%. Тонкие корни прямо и опосредованно влияют на почвенные биогеохимические циклы [16]. По данным K. Vogt et al. [19], Clemmensen et al. [20] корни и микроорганизмы ризосферы являются источни-

ком 50–70% содержащегося в почве углерода. В некоторых экосистемах тонкие корни являются основным источником поступления органического вещества в почву [21].

Существуют разные градации деления корней на фракции по толщине. Чаще всего к тонким относят корни с диаметром в диапазоне от 0.6 до 5 мм. А.Я. Орлов [22] выделял фракцию корней диаметром до 0.6 мм. М.И. Калинин [14], L. Finer et al. [23], A. Lehtonen et al. [24] к тонким корням относят корни с диаметром до 2-х мм. В других работах [25, 26] корни делились на две группы: с диаметром менее 2 мм и от 2 до 5 мм. Иногда выделяют фракцию тонких корней с диаметром менее 1 мм [27, 28].

Накопление элементов минерального питания в корнях зависит от их размеров. Тонкие корни (диаметром до 2 мм) содержат большее количество зольных элементов и азота, чем более крупные корни. Согласно оценкам Н.И. Казимирова и Р.М. Морозовой [29], в мелких корнях количество зольных элементов и азота на единицу веса в 1.4 раза больше, чем в корнях диаметром до 1 см и в 2 раза больше, чем в корнях диаметром более 1 см. Кроме того, количество азота в корнях возрастает с повышением плодородия почвы [29]. Эти факты подчеркивают важность оценки массы тонких корней и изучение ее динамики.

Свойства почв после прекращения сельскохозяйственного использования постепенно изменяются по кислотно-щелочным показателям, пулу микро- и макроэлементов, ферментативной активности, характеристикам биотического компонента. Изменяется количество и качество опада, который интенсивнее вовлекается в природный круговорот [30–32]. Трудно минерализуемые остатки хвойных растений медленно разлагаются в почве, что является причиной формирования мощных грубогумусных лесных подстилок [33], в то время как опад лиственных растений положительно влияет на биологическую активность почв, процессы его микробиологической трансформации происходят быстрее [34]. Взаимосвязь и взаимообусловленность свойств почв и развития корней определяют необходимость их комплексного изучения.

Связующим звеном различных компонентов биогеоценоза являются лесные подстилки. На фоне антропогенного воздействия происходит изменение состава органического вещества почв, ризосферных процессов, микробиологических и экофизиологических показателей (рис. 1).

Анализ динамики накопления фитомассы на бывших сельхозземлях представляется актуальным, особенно это касается ее подземной части, как наименее изученной в связи с трудоемкостью работ и сложностью определения содержания корней в почве.

Целью настоящего исследования является оценка изменения массы и распределения в почве тонких корней древесных растений в период от 20 до 110 лет после прекращения сельскохозяйственного использования земель в условиях средней тайги.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Изучаемая территория располагается в средне-таежной подзоне Республики Карелия. Климат – континентальный с чертами морского [36]. Среднегодовая температура воздуха по многолетним наблюдениям составляет 2.0...2.5 °С, средняя температура января –9...–10 °С, июля +16...+17 °С. Для региона характерен режим избыточного увлажнения, сумма осадков составляет 550–750 мм в год [37]. По теплообеспеченности почв район относится к теплому, количество дней с температурой выше +10 °С составляет 115–125 [38].

На территории преобладают еловые (*Picea abies* (L.) Karst.) леса, которые могут сменяться мелколиственными после антропогенных нарушений. Почвенный покров характеризуется комплексностью. Широко распространены подзолистые почвы различной степени агрогенной трансформации. На фоне антропогенного воздействия (пашня, вырубки, урбанизация и пр.) происходит существенное изменение свойств почв. В целом для почв характерна природная ограниченность использования для нужд сельскохозяйственного производства, так как благоприятный период для вегетации растений относительно короткий [39].

Работа велась на участках, вовлеченных в прошлом в сельскохозяйственное использование. Они расположены в окрестностях г. Петрозаводска (61°44'53" С 34°20'35" В). Было заложено 3 пробные площади (ПП).

ПП 1 представлена 20-летним смешанным мелколиственным (*Salix caprea* L., *Betula pubescens* Ehrh., *Alnus incana* (L.) Moench) разнотравным сообществом. Почва агродерново-подзолистая типичная [40] легкосуглинистая на суглинистой морене. В почве наблюдаются признаки первоначального восстановления текстурной дифференциации. Общее проективное покрытие напочвенного покрова составляет 40%. Доминантом является вейник лесной *Calamagrostis arundinaciae* (L.) Roth., покрытие других видов незначительно. Моховой покров развит слабо, представлены *Brachythecium salebrosum* (F. Weber & D. Mohr) Bruch et al. – 10%, *Climacium dendroides* (Hedw.) F. Weber & D. Mohr – 1%.

ПП 2 заложена в 65-летнем ельнике черничном. Почва дерново-подзолистая постагрогенная [40] легкосуглинистая на суглинистой морене. По морфологическому строению изучаемая почва

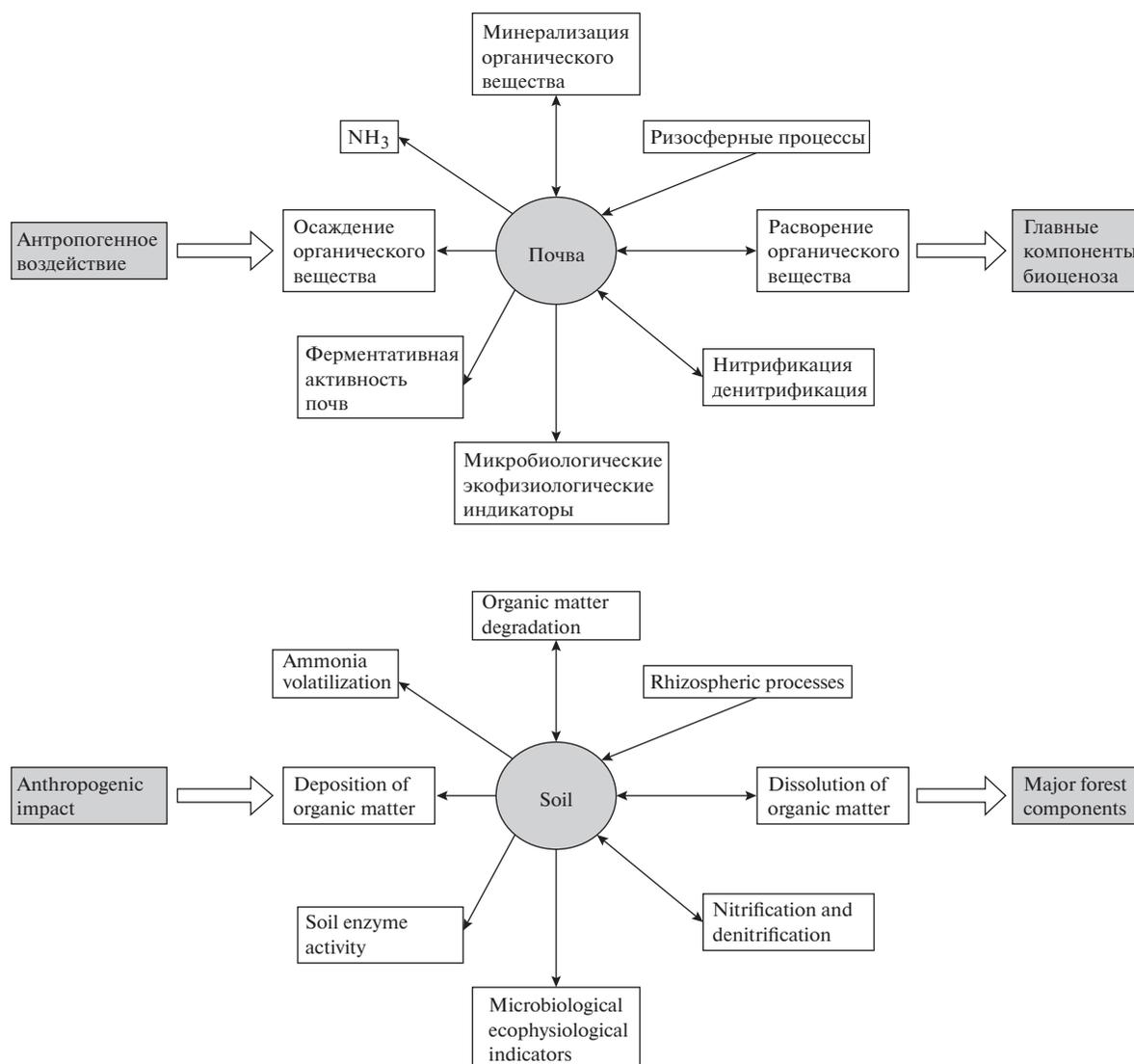


Рис. 1. Направленность изменения свойств лесных почв в условиях антропогенного воздействия (по материалам: Nein, 2019 [35]).
Fig. 1. Changes in the forest soil properties under anthropogenic impact (adapted from Nein, 2019 [35]).

близка к естественным зональным, однако в ней еще наблюдаются признаки агрогенной трансформации. Общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 20%, преобладают кислица *Oxalis acetosella* L., черника *Vaccinium myrtillus* L. и щитовник картузианский *Dryopteris carthusiana* (Vill.) Н.Р. Fuchs. Проективное покрытие мохово-лишайникового яруса составляет 5%, представлены *Pleurozium shreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt., *Dicranum scurparium* Hedw., *Rhodobrium roseum* (Hedw.) Limpr.).

ПП 3 заложена в 110-летнем ельнике черничном. Почва подзолистая типичная [40] легкосуглинистая на суглинистой морене. Для нее характерна типичная текстурная дифференциация профиля, отсутствие гумусово-аккумулятивного

горизонта. Напочвенный покров отличается высоким проективным покрытием *Vaccinium myrtillus* (40%), покрытие *Oxalis acetosella* составляет 15%, *Vaccinium vitis-idaea* L. – 10%. В моховом ярусе преобладают *Pleurozium shreberi* (20%) и *Sphagnum girgensohnii* Russow (15%).

Закладка пробных площадей и описание древостоев (табл. 1) проводилось в соответствии с общепринятыми методиками [41]. Были выполнены геоботанические описания с оценкой общего проективного покрытия и покрытия доминантных видов напочвенного покрова. На основании полученных таксационных показателей и плотности древесины [42] рассчитывалась общая фитомасса древостоя, в составе которой, исходя

Таблица 1. Таксационная характеристика древостоев
Table 1. Forest stand characteristics

ПП Sample plot	Древесная порода Tree species	Запас, м ³ га ⁻¹ Standing stock, m ³ ha ⁻¹	Состав Stand composition	Общая фитомасса, т га ⁻¹ Total phytomass, t ha ⁻¹	Число стволов, экз. га ⁻¹ Number of stems, ind. ha ⁻¹	Средние Average		Сумма площадей сечений, м ² га ⁻¹ Basal area, m ² ha ⁻¹
						диаметр, см diameter, cm	высота, м height, m	
1	Ива <i>Salix caprea</i>	77			11167	4.4	6.4	16.6
	Береза <i>Betula pubescens</i>	56.1	38B52S10AI	105	8750	3.9	8.1	10.2
	Ольха <i>Alnus incana</i>	15.6			667	7.7	8.9	3.05
2	Ель <i>Picea abies</i>	193			1444	14.6	13.9	24.1
	Ольха <i>Alnus incana</i>	37.7			222	17.6	14.8	5.42
	Осина <i>Populus tremula</i>	29.2			44	31.4	18.3	3.44
	Береза <i>Betula pubescens</i>	15.6	67P1c16AI 12Pop5B	200	44	23.7	17.2	1.96
	Рябина <i>Sorbus aucuparia</i>	9.3			267	8.6	10.4	1.6
Ива <i>Salix caprea</i>	4.1			44	13.8	13.5	0.62	
3	Ель <i>Picea abies</i>	459			575	28.5	27.3	36.8
	Береза <i>Betula pubescens</i>	17.5	95P1c4B1Pop	319	71	17.3	23.3	1.69
	Осина <i>Populus tremula</i>	3.27			4	31.9	25.0	0.29

Примечание. P1c – *Picea abies*, B – *Betula pubescens*, Pop – *Populus tremula*, AI – *Alnus incana*, S – *Salix caprea*.
Note. P1c – *Picea abies*, B – *Betula pubescens*, Pop – *Populus tremula*, A – *Alnus incana*, S – *Salix caprea*.

Таблица 2. Масса тонких корней древесных пород в верхнем слое почвы
Table 2. Tree species fine roots mass in the upper soil layer

Общая подземная фитомасса, т га ⁻¹ Total underground phytomass, t ha ⁻¹	Масса корней древесных пород по фракциям диаметра Root mass of tree species by diameter			
	т га ⁻¹ t ha ⁻¹		% от общей подземной фитомассы % of total underground phytomass	
	0–1 мм 0–1 mm	0–2 мм 0–2 mm	0–1 мм 0–1 mm	0–2 мм 0–2 mm
	ПП1 Березняк разнотравный 20 лет SP1 <i>Betuletum herbosum</i> 20 years			
12.60	1.95 ± 0.23	3.21 ± 0.37	15.5	25.5
	ПП2 Ельник черничный 65 лет SP2 <i>Piceetum myrtillosum</i> 65 years			
31.28	0.89 ± 0.08	1.78 ± 0.17	2.8	5.7
	ПП3 Ельник черничный 110 лет SP3 <i>Piceetum myrtillosum</i> 110 years			
59.40	1.09 ± 0.09	2.58 ± 0.21	1.8	4.3

из известных соотношений [29, 43], выделялась фракция подземной фитомассы.

Массу тонких корней определяли методом монолитов [22]. На каждой ПП отбиралось по 10–15 монолитов, размер которых составлял 10 × 10 × 20 см. Из образцов извлекались корни, которые сортировались по размерам: до 1 и до 2 мм по диаметру. Далее корни высушивались до абсолютно сухого состояния при температуре 105 °С и взвешивались. Запас подстилок определяли термостатно-весовым методом, с пересчетом абсолютно сухого веса в т га⁻¹ [44].

Достоверность различий величин исследованных параметров оценивалась с использованием критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для начальной стадии восстановления лесного покрова после прекращения использования участков в сельскохозяйственных целях в условиях среднетаежной подзоны характерно формирование лиственных древостоев с участием в составе березы пушистой, ивы козьей, ольхи серой (ПП 1). Этому способствуют благоприятные эдафические условия (повышенное содержание органического вещества), ежегодный высокий урожай семян в лиственных насаждениях, произрастающих на прилегающих территориях, а также высокая энергия роста надземных и подземных органов лиственных пород по сравнению с хвойными.

Масса тонких корней (диаметр менее 2 мм) древесных пород является более высокой в мелколиственном сообществе (ПП 1) по сравнению с другими изучаемыми сообществами (ПП 2, 3) (табл. 2). Это свидетельствует о характерной для постагрогенной экосистемы активной аккумуля-

ции фитомассы. Полученный результат согласуется с данными других исследователей [45], согласно которым масса тонких корней диаметром до 2 мм достигает более высокого значения на участке, выведенном из сельскохозяйственного оборота 20 лет назад, по сравнению с контрольным лесным участком.

В березняке с ивой разнотравном (ПП 1) общая масса корней составляет 12.6 т га⁻¹, из которой на долю тонких корней диаметром до 2 мм приходится 25.5% (табл. 2). Полученная величина значительно отличается от соответствующих величин в других изученных сообществах. Это объясняется тем, что мелколиственный древостой, отличающийся высокой густотой (более 20 тыс. экз. га⁻¹), находится на этапе активного роста и нуждается в большом количестве минеральных веществ. Согласно имеющимся обзорным работам, в биоме бореальных лесов доля тонких корней в общей корневой массе составляет в среднем 16% [18].

Общая подземная фитомасса 65-летнего елового древостоя на ПП 2 составляет 31.28 т га⁻¹ (табл. 2). На долю корней диаметром до 2 мм приходится около 6% от этой величины. В 110-летнем еловом древостое (ПП 3) общая подземная фитомасса равна 59.4 т га⁻¹, тонкие корни диаметром до 2 мм составляют 4.3% (табл. 2). Полученные результаты согласуются с данными Т. Sun et al. [16], согласно которым с возрастом доля тонких корней деревьев имела тенденцию к уменьшению в ряду 36-, 57- и 82-летних древостоев. В соответствии с более высокой общей подземной фитомассой в 110-летнем сообществе, масса корней древесных пород менее 2 мм в диаметре на ~30% больше, чем в 65-летнем ельнике.

Таблица 3. Масса тонких корней в верхнем слое почвы по породам
Table 3. Fine root mass in the upper soil layer by tree species

Корни лиственных пород, т га ⁻¹ Roots of deciduous species, t ha ⁻¹		Корни ели европейской, т га ⁻¹ Roots of <i>Picea abies</i> , t ha ⁻¹	
0–1 мм 0–1 mm	0–2 мм 0–2 mm	0–1 мм 0–1 mm	0–2 мм 0–2 mm
ПП1 Березняк разнотравный 20 лет SP1 <i>Betuletum herbosum</i> 20 years			
1.95 ± 0.23	3.21 ± 0.37	–	–
ПП2 Ельник черничный 65 лет SP2 <i>Piceetum myrtillosum</i> 65 years			
0.56 ± 0.07	1.10 ± 0.14	0.33 ± 0.06	0.68 ± 0.10
ПП3 Ельник черничный 110 лет SP3 <i>Piceetum myrtillosum</i> 110 years			
0.09 ± 0.01	0.19 ± 0.04	1.00 ± 0.09	2.39 ± 0.21

Таблица 4. Масса тонких корней в верхних почвенных горизонтах
Table 4. Fine root mass in the upper soil layer

Масса корней в лесной подстилке, т га ⁻¹ Root mass in forest litter, t ha ⁻¹		Масса корней в минеральном слое, т га ⁻¹ Root mass in mineral layer, t ha ⁻¹	
0–1 мм 0–1 mm	0–2 мм 0–2 mm	0–1 мм 0–1 mm	0–2 мм 0–2 mm
ПП2 Ельник черничный 65 лет SP2 <i>Piceetum myrtillosum</i> 65 years			
0.41 ± 0.05	0.71 ± 0.08	0.48 ± 0.07	1.07 ± 0.13
ПП3 Ельник черничный 110 лет SP3 <i>Piceetum myrtillosum</i> 110 years			
0.71 ± 0.09	1.34 ± 0.16	0.38 ± 0.04	1.24 ± 0.14

При сравнении массы корней отдельных древесных пород (табл. 3) установлено, что в 65-летнем сообществе, несмотря на примерно 2-кратное преобладание по запасу ели европейской над лиственными породами, масса корней лиственных пород диаметром до 1 и до 2 мм на 40% больше ($p < 0.05$). Согласно некоторым данным [46] при одновременном или почти одновременном возобновлении ели и лиственных пород, корни ели при контакте с корнями лиственных пород нередко частично отмирают или сильно деформируются. Б.С. Мартинович [47] указывает, что корни березы обладают большей энергией роста по сравнению с корнями хвойных пород. Полученные результаты демонстрируют более высокую активность роста корней березы пушистой по сравнению с корнями ели европейской при освоении свободного пространства. Это было также отмечено и в других работах, посвященных изучению корневых систем [48]. В тоже время, согласно Г.А. Чибисову [46] при разложении корней березы в процессе ее естественного изреживания, условия для роста корневых систем ели улучшаются.

В 110-летнем ельнике доля лиственных пород в составе древостоя составляет лишь 5%. К этому возрасту в значительной степени происходит их отпад. Доля корней лиственных пород в общей массе подземных органов (менее 10%), примерно соответствует их доле общей фитомассе древостоя.

Анализ распределения массы корней древесных растений по почвенным горизонтам (табл. 4) показал, что в 65-летнем сообществе в минеральном слое почвы масса корней диаметром до 1 и до 2 мм больше, чем в горизонте лесной подстилки. Для фракции до 2 мм отмеченные различия достоверны при $p < 0.05$. В 110-летнем древостое картина обратная, лесная подстилка содержит больше корней по сравнению с минеральным слоем почвы. Для фракции до 1 мм различия достоверны при $p < 0.05$. Полученный результат можно объяснить наличием на ПП 3 более мощной подстилки, слой которой имеет толщину в среднем 5 см, тогда как на ПП 2 он составляет 3 см. Кроме того, известно, что после окончания использования участка в сельскохозяйственном обороте, характерные для географических условий почвообразовательные процессы начинают

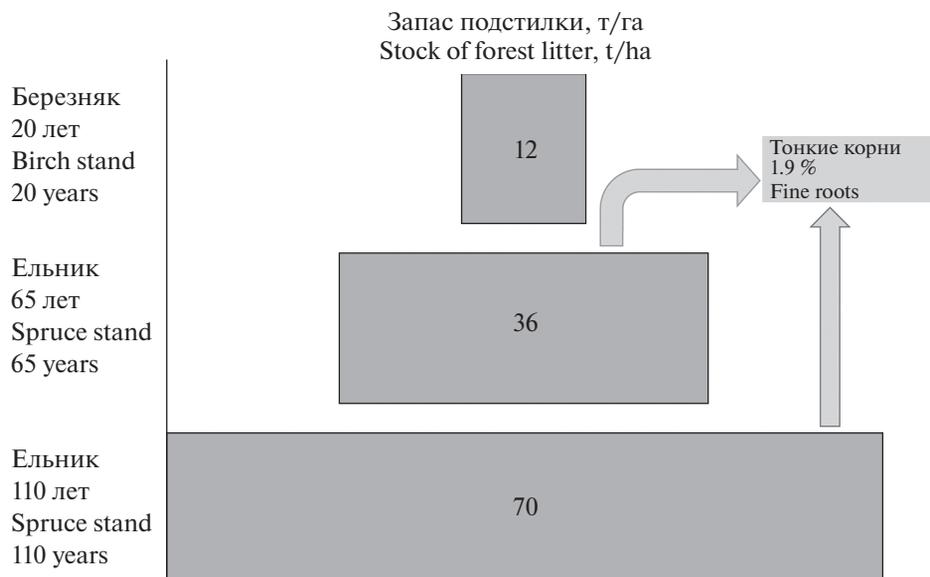


Рис. 2. Содержание тонких корней в лесной подстилке.
Fig. 2. Content of fine roots in forest litter.

играть ведущую роль в формировании почвы [49]. Для изучаемой территории характерен зональный подзолообразовательный процесс. Почвенный профиль 110-летнего древостоя характеризуется наличием обедненного элементами питания подзолистого горизонта и соответственно концентрация тонких корней происходит в лесной подстилке более богатой органическими веществами. В 20-летнем лиственном древостое анализ распределения корней по генетическим почвенным горизонтам выполнить не представлялось возможным вследствие недифференцированности почвенного профиля.

Запас подстилки в 20-летнем лиственном древостое по сравнению с хвойными относительно низкий (рис. 2). Это обусловлено более быстрым разложением опада в связи с высокой микробиологической активностью почв и более интенсивным круговоротом элементов питания [50]. Для хвойных древостоев характерно замедление темпа трансформации органического вещества и усиление процессов его консервации, эфемерные трофические связи, характерные для молодых сообществ, становятся устойчивыми [51]. В результате происходит формирование более мощных лесных подстилок, дифференциация почв на отдельные генетические горизонты становится заметнее. Депонирование N, С, Р, К и других элементов питания растений в лесной подстилке приводит к перераспределению массы тонких корней с концентрацией их в органогенном горизонте. Независимо от возраста еловых древостоев масса тонких корней составляет около 2% от запаса подстилок. Можно предположить, что в почвах мелкие корни занимают определенный объем

межпорового пространства, заполняют благоприятные для их развития локусы, создавая континуум живой части подземного пространства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях среднетаежной подзоны, земли, исключенные из сельскохозяйственного использования, относительно быстро зарастают древесной растительностью, чему способствует повышенное содержание органического вещества в почвенном профиле, характерное для постагрогенной сукцессии.

На территории южного агроклиматического района Республики Карелия в 20-летнем березняке разнотравном доля тонких корней в общей подземной фитомассе значительно (в 4.5–6 раз) выше, чем в мелколиственно-еловом и еловом сообществах. С увеличением времени, прошедшего с момента прекращения сельскохозяйственного использования территории, общая фитомасса древостоя и ее подземная часть, закономерно возрастают. При этом доля тонких корней в подземной фитомассе снижается. Это объясняется уменьшением величины прироста фитомассы и, соответственно, количества корней, необходимого для его обеспечения.

Доля древесной породы в общей фитомассе древостоя или запаса стволовой древесины не всегда соответствует доле тонких корней в подземной части древостоя. В 65-летнем сообществе при значительном участии в составе древостоя ели европейской (67% по запасу), масса ее корней диаметром до 2 мм на 40% меньше по сравнению

с массой корней листовных пород. Этот факт демонстрирует более активный рост корней листовных.

Для листовного древостоя характерен наиболее низкий запас подстилки. При восстановлении елового древостоя этот показатель возрастает и приходит в соответствие с величинами, характерными для зональных почв. Доля тонких корней в запасе подстилок исследуемых еловых лесов возрастом 65 и 110 лет одинакова.

Проведенное исследование позволило выявить специфику изменения массы и распределения в почве тонких корней древесных растений в лесных фитоценозах, находящихся в условиях постагрогенной трансформации среды. Пред-

ставляется целесообразным активизировать изучение тонких корней, как компонента, активно участвующего в цикле углерода, в почвах лесных сообществ, формирующихся на бывших сельхозземлях. Это необходимо для более точной оценки потоков углерода и лучшего понимания роли постагрогенных экосистем в глобальных климатических процессах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-29-05153) и из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания ИЛ КарНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fan S., Gloor M., Mahlman J., Pacala S., Sarmiento J., Takahashi T., Tans P.* 1998. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. — *Science*. 282: 442–6. <https://doi.org/10.1126/science.282.5388.442>
2. *Silver W.L., Osterlag R., Lugo A.E.* 2000. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. — *Restor. Ecol.* 8(4): 394–407. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2000.80054.x>
3. *Pacala S.W., Hurtt G.C., Baker D., Peylin P., Houghton R.A., Birdsey R.A., Heath L., Sundquist E.T., Stallard R.F., Ciais P., Moorcroft P., Caspersen J.P., Shevliakova E., Moore B. nine others.* 2001. Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates. — *Science*. 292: 2316–20. <https://doi.org/10.1126/science.1057320>
4. *Hooker T.D., Compton J.E.* 2003. Forest ecosystem carbon and nitrogen accumulation during the first century after agricultural abandonment. — *Ecol. Applicat.* 13(2): 299–313. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2003\)013\[0299:FECANA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2003)013[0299:FECANA]2.0.CO;2)
5. *Люри Д.И., Горячкин С.В., Караева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г.* 2010. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М. 416 с.
6. *Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А.* 2015. Изменение запасов углерода в постагрогенных экосистемах в результате естественного восстановления лесов в Костромской области. — *Лесоведение*. 4: 307–317. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23906221&>
7. *Уткин А.И., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И., Ермолова Л.С.* 2002. О наступлении лесной растительности на сельскохозяйственные земли в Верхнем Поволжье. — *Лесоведение*. 5: 44–52.
8. *Залесов С.В., Магасумова А.Г., Юровских Е.В.* 2009. Зарастание бывших сельскохозяйственных угодий в Слободо-Туринском районе Свердловской области. — *Леса России и хозяйство в них*. 3(34): 14–23. http://usfeu.ru/media/filer_public/08/aa/08aacbee-61f0-4fd0-97b1-c4787d5c9b61/lesa_rossii_i_khoziaistvo_v_nikh_4_342009.pdf
9. *Мошкина Е.В., Медведева М.В., Туюнен А.В., Карпечко А.Ю., Геникова Н.В., Дубровина И.А., Мамай А.В., Сидорова В.А., Толстогузов О.В., Кулакова Л.М.* 2019. Особенности естественного восстановления лесных экосистем на бывших сельскохозяйственных землях (на примере южного агроклиматического района Карелии). — *Биосфера*. 11(3): 134–145. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v11i3.506>
10. *Houghton R.A., Hackler J.L., Lawrence K.T.* 1999. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. — *Science*. 285: 574–578. <https://doi.org/10.1126/science.285.5427.574>
11. *Caspersen J.P., Pacala S.W., Jenkins J.C., Hurtt G.C., Moorcroft P.R., Birdsey R.A.* 2000. Contributions of land-use history to carbon accumulation in U.S. forests. — *Science*. 290: 1148–1151. <https://doi.org/10.1126/science.290.5494.1148>
12. *Goodale C.L., Aber J.D., McDowell W.H.* 2000. The long-term effects of disturbance on organic and inorganic nitrogen export in the White Mountains, New Hampshire. — *Ecosystems*. 3: 433–450. <https://doi.org/10.1007/s100210000039>
13. *Рахтеенко И.Н.* 1952. Корневые системы древесных и кустарниковых пород. М., Л. 107 с.
14. *Калинин М.И.* 1983. Формирование корневой системы деревьев. М. 152 с.
15. *Ehrenfeld J.G., Parsons W.F.J., Han X., Parmelee R.W., Zhu W.* 1997. Live and dead roots in forest soil horizons: contrasting effects on nitrogen dynamics — *Ecology*. 78(2): 348–362.

- [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[0348:LADRIF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[0348:LADRIF]2.0.CO;2)
16. Sun T., Dong L.L., Mao Z.J., Li Y.Y. 2015. Fine root dynamics of trees and understory vegetation in a chronosequence of *Betula platyphylla* stands. — *Forest Ecology and Management*. 346: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.035>
 17. Ruess R., Hendrick R., Burton A., Pregitzer K., Sveinbjornsson B., Allen M., Maurer G. 2003. Coupling fine root dynamics with ecosystem carbon cycling in black spruce forests of interior Alaska. — *Ecol. Monogr.* 73(4): 643–662. <https://doi.org/10.1890/02-4032>
 18. Yuan Z.Y., Chen Y.H. 2010. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: Literature review and meta-analyses. — *CRC Crit. Rev. Plant Sci.* 29(4): 204–221. <https://doi.org/10.1080/07352689.2010.483579>
 19. Vogt K.A., Vogt D.J., Palmiotto P.A., Boon P., O'Hara J., Ashbjornsen H. 1995. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. — *Plant Soil*. 187(2): 159–219. <https://doi.org/10.1007/BF00017088>
 20. Clemmensen K.E., Bahr A., Ovaskainen O., Dahlberg A., Ekblad A., Wallander H., Stenlid J., Finlay R.D., Wardle D.A., Lindahl B.D. 2013. Roots and associated fungi drive long term carbon sequestration in boreal forest. — *Science*. 339: 1615–1618. <https://doi.org/10.1126/science.1231923>
 21. Jackson R.B., Mooney H.A., Schulze E.D. 1997. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. — *PNAS*. 94(14): 7362–7366. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.14.7362>
 22. Орлов А.Я. 1967. Метод определения массы корней деревьев в лесу и возможность учета годичного прироста органической массы в толще лесной почвы. — *Лесоведение*. 1: 64–70.
 23. Finér L., Ohashi M., Noguchi K., Hirano Y. 2011. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. — *Forest Ecol. Manag.* 262(11): 2008–2023. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.042>
 24. Lehtonen A., Palviainen M., Ojanen P., Kallioikoski T., Nöjd P., Kukkola M., Penttilä T., Mäkipää R., Leppälampi-Kujansuu J., Helmisaari H.-S. 2016. Modelling fine root biomass of boreal tree stands using site and stand variables. — *Forest Ecol. Manag.* 359: 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.023>
 25. Vanninen P., Mäkelä A. 1999. Fine root biomass of Scots pine stands differing in age and soil fertility in southern Finland. — *Tree Physiology*. 19(12): 823–830. <https://doi.org/10.1093/treephys/19.12.823>
 26. Helmisaari H.-S., Derome J., Nöjd P., Kukkola M. 2007. Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. — *Tree Physiology*. 27(10): 1493–1504. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.10.1493>
 27. Усольцев В.А. 1988. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск. 253
 28. Усольцев В.А., Залесов С.В. 2005. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург. 147 с.
 29. Казимиров Н.И., Морозова Р.М. 1973. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л. 175 с.
 30. Владыченский А.С., Телеснина В.М., Чалая Т.А. 2012. Влияние растительного опада на химические свойства и биологическую активность постагрогенных почв южной тайги. — *Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение*. 1: 3–10. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17637057>
 31. Телеснина В.М. 2015. Постагрогенная динамика растительности и свойств почвы в ходе демулационной сукцессии в южной тайге. — *Лесоведение*. 4: 293–306. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23906220>
 32. Телеснина В.М., Ваганов И.Е., Карлсен А.А., Иванова А.Е., Жуков М.А., Лебедев С.М. 2016. Особенности морфологии и химических свойств постагрогенных почв южной тайги на легких отложениях (Костромская область) — *Почвоведение*. 1: 115–129. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16010111>
 33. Прокушкин С.Г. 1992. Динамика минерализации соснового опада. — *Лесоведение*. 4: 28–34.
 34. Кузнецов М.А. 2010. Влияние условий разложения и состава опада на характеристики и запас подстилки в среднетаежном чернично-сфагновом ельнике. — *Лесоведение*. 6: 54–60. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15510017>
 35. Neina D. 2019. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. — *Appl. Environ. Soil Sci.* 9: 1–9. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
 36. *Научно-прикладной справочник по климату СССР*. 1988. 3 (1–6). Л. 693 с.
 37. Романов А.А. 1961. О климате Карелии. Петрозаводск. 139 с.
 38. *Атлас Карельской АССР*. Москва. 1989. 40 с.
 39. Федорец Н.Г., Морозова Р.М., Солодовников А.Н. 2003. Лесные почвы Карелии и оценка их продуктивности. — *Труды Карельского научного центра РАН*. 5: 108–120.

- http://resources.krc.karelia.ru/transactions/doc/trudy2003/trudy_2003_5_108-120.pdf
40. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. 2004. Классификация и диагностика почв России. Смоленск. 342 с.
 41. ОСТ 56-69-83. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки.
 42. Полубояринов О.И. 1976. Плотность древесины. М. 160 с.
 43. Казимиров Н.И., Морозова Р.М., Куликова В.К. 1979. Органическая масса и потоки веществ в березняках средней тайги. Л. 216 с.
 44. Методические рекомендации по определению запасов лесной подстилки и ее зольности при лесоводственных исследованиях. М. 1979. 38 с.
 45. Кондратова А.В., Абрамова Е.Р. 2018. Особенности формирования тонких корней на различных стадиях восстановления постагрогенных экосистем в зоне южной тайги. — Успехи современного естествознания. 9: 18–22. <https://www.natural-sciences.ru/pdf/2018/9/36860.pdf>
 46. Чибисов Г.А. 1971. Рост корневых систем в березово-еловых насаждениях и влияние на них рубок ухода. — Сб. работ по лесному хозяйству и лесохимии. Архангельск. С. 121–130.
 47. Мартинович Б.С., Кабашикова Г.И., Крот Л.А. 1982. Особенности роста и жизнедеятельности ели и березы в смешанных елово-березовых насаждениях. — В сб.: Регулирование роста, развития и питания растений в фитоденозах. Минск. С. 49–78.
 48. Schmid I. 2002. The influence of soil type and interspecific competition on the fine root system of Norway spruce and European beech. — Basic Appl. Ecol. 3(4): 339–346. <https://doi.org/10.1078/1439-1791-00116>
 49. Почвообразовательные процессы. 2006. М. 510 с.
 50. Германова Н.И., Медведева М.В., Мамай А.В. 2012. Динамика разложения листового опада в среднетаежных насаждениях Карелии. — Известия вузов. Лесной журнал. 1: 24–32.
 51. Зябченко С.С., Дьяконов В.В., Федорец Н.Г., Синькевич Т.А. 1994. Лесные экосистемы заповедника “Кивач”. — В сб.: Структурно-функциональная организация лесных почв среднетаежной подзоны Карелии. Петрозаводск. С. 5–37.

Fine Root Mass in Post-Agricultural Forest Soils of the Middle Taiga Subzone: The Case of the Republic of Karelia

A. Yu. Karpechko^{a,*}, A. V. Tuyunen^a, M. V. Medvedeva^a, E. V. Moshkina^a, I. A. Dubrovina^b,
N. V. Genikova^a, V. A. Sidorova^b, A. V. Mamai^a, O. V. Tolstoguzov^c, L. M. Kulakova^c

^aForest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

^bInstitute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

^cInstitute of Economics of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

*e-mail: anna.karpechko@gmail.com

Abstract—The mass of fine roots (<2 mm in diameter) was determined and analyzed for post-agricultural sites of the middle taiga subzone. They are located near the city of Petrozavodsk. This area belongs to the southern agroclimatic district of Karelia. Sample plots were established in a 20-year-old deciduous stand and 65- and 110-year-old spruce stands. The highest fine root biomass was observed in the deciduous stand, and the lowest — in the 65-year-old spruce stand with admixture of deciduous species. The share of fine roots in the total underground plant biomass declines in maturing stands. Roots of deciduous trees may outnumber spruce roots even on spruce dominated sites, i.e. the fine root mass ratio of tree species does not match the species' shares in the standing stock. The forest floor stock was the highest in the 110-year-old spruce stand and the lowest in the 20-year-old birch stand. The share of fine roots in the total stock of the forest floor in the studied spruce stands did not change. Fine roots are actively involved in carbon cycling, and estimation of their mass is necessary for better understanding the phenomenon of post-agricultural ecosystems in the context of global climate change.

Keywords: underground phytomass, abandoned agricultural land, post-agricultural forest, spruce, deciduous, litter stock, standing stock\fine root mass ratios

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by RFBR research project no. 19-29-05153 and by state order to the Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

1. *Fan S., Gloor M., Mahlman J., Pacala S., Sarmiento J., Takahashi T., Tans P.* 1998. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. – *Science*. 282: 442–6. <https://doi.org/10.1126/science.282.5388.442>
2. *Silver W.L., Osterlag R., Lugo A.E.* 2000. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. – *Restor. Ecol.* 8(4): 394–407. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2000.80054.x>
3. *Pacala S.W., Hurtt G.C., Baker D., Peylin P., Houghton R.A., Birdsey R.A., Heath L., Sundquist E.T., Stallard R.F., Ciais P., Moorcroft P., Caspersen J.P., Shevliakova E., Moore B. and nine others.* 2001. Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates. – *Science*. 292: 2316–20. <https://doi.org/10.1126/science.1057320>
4. *Hooker T.D., Compton J.E.* 2003. Forest ecosystem carbon and nitrogen accumulation during the first century after agricultural abandonment. – *Ecol. Applicat.* 13(2): 299–313. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2003\)013\[0299:FECANA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2003)013[0299:FECANA]2.0.CO;2)
5. *Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G.* 2010. [Dynamics of agricultural lands of Russia in XXth century and post-agricultural restoration of vegetation and soils]. M. 416 p. (In Russian)
6. *Ryzhova I.M., Yerokhova A.A., Podvezennaya M.A.* 2015. Alterations of the Carbon Storages in Postagrogenic Ecosystems Due to Natural Reforestation in Kostroma Oblast. – *Lesovedeniye*. 4: 307–317. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23906221&> (In Russian)
7. *Utkin A.I., Gulbe T.A., Gulbe Ya.I., Yermolova L.S.* 2002. On advance of forest vegetation to agricultural lands in the upper Volga river basin. – *Lesovedeniye*. 5: 44–52. (In Russian)
8. *Zalesov S.V., Magasumova A.G., Yurovskikh E.V.* 2009. Regeneration of former agricultural lands in Slobodo-Turinsky district of Sverdlovsk region. – *Les Rossii i Khozyaistvo v Nikh*. 3(34): 14–23. http://usfeu.ru/media/filer_public/08/aa/08aacbee-61f0-4fd0-97b1-c4787d5c9b61/lesa_rossii_i_khoziaistvo_v_nikh__4_342009.pdf (In Russian)
9. *Moshkina E.V., Medvedeva M.V., Tuyunen A.V., Karpechko A.Yu., Genikova N.V., Dubrovina I.A., Mamai A.V., Sidorova V.A., Tolstoguzov O.V., Kulakova L.M.* 2019. Patterns of natural forest ecosystem regeneration in abandoned farmland (the case of the southern agro-climatic district of Karelia). – *Biosfera*. 11(3): 134–145. <http://dx.doi.org/10.24855/biosfera.v11i3.506> (In Russian)
10. *Houghton R.A., Hackler J.L., Lawrence K.T.* 1999. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. – *Science*. 285: 574–578. <https://doi.org/10.1126/science.285.5427.574>
11. *Caspersen J.P., Pacala S.W., Jenkins J.C., Hurtt G.C., Moorcroft P.R., Birdsey R.A.* 2000. Contributions of land-use history to carbon accumulation in U.S. forests. – *Science*. 290: 1148–1151. <https://doi.org/10.1126/science.290.5494.1148>
12. *Goodale C.L., Aber J.D., McDowell W.H.* 2000. The long-term effects of disturbance on organic and inorganic nitrogen export in the White Mountains, New Hampshire. – *Ecosystems*. 3: 433–450. <https://doi.org/10.1007/s100210000039>
13. *Rakhteyenko I.N.* 1952. [Root systems of tree and shrub species]. Moscow, Leningrad. 107 p. (In Russian)
14. *Kalinin M.I.* 1983. [Shaping of the tree root system]. Moscow. 152 p. (In Russian)
15. *Ehrenfeld J.G., Parsons W.F.J., Han X., Parmelee R.W., Zhu W.* 1997. Live and dead roots in forest soil horizons: contrasting effects on nitrogen dynamics – *Ecology*. 78(2): 348–362. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[0348:LADRIF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[0348:LADRIF]2.0.CO;2)
16. *Sun T., Dong L.L., Mao Z.J., Li Y.Y.* 2015. Fine root dynamics of trees and understory vegetation in a chronosequence of *Betula platyphylla* stands. – *Forest Ecology and Management*. 346: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.035>
17. *Ruess R., Hendrick R., Burton A., Pregitzer K., Sveinbjornsson B., Allen M., Maurer G.* 2003. Coupling fine root dynamics with ecosystem carbon cycling in black spruce forests of interior Alaska. – *Ecol. Monogr.* 73(4): 643–662. <https://doi.org/10.1890/02-4032>
18. *Yuan Z.Y., Chen Y.H.* 2010. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: Literature review and meta-analyses. – *CRC Crit. Rev. Plant Sci.* 29(4): 204–221. <https://doi.org/10.1080/07352689.2010.483579>
19. *Vogt K.A., Vogt D.J., Palmiotto P.A., Boon P., O'Hara J., Asbjornsen H.* 1995. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. – *Plant Soil*. 187(2): 159–219. <https://doi.org/10.1007/BF00017088>
20. *Clemmensen K.E., Bahr A., Ovaskainen O., Dahlberg A., Ekblad A., Wallander H., Stenlid J., Finlay R.D., Wardle D.A., Lindahl B.D.* 2013. Roots and associated fungi drive long term carbon sequestration in boreal forest. – *Science*. 339:

- 1615–1618.
<https://doi.org/10.1126/science.1231923>
21. Jackson R.B., Mooney H.A., Schulze E.D. 1997. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. – PNAS. 94(14): 7362–7366.
<https://doi.org/10.1073/pnas.94.14.7362>
 22. Orlov A.Ya. 1967. [Assessment of the tree root biomass in the forest: and approaches to accounting annual growth of organic mass in the thickness of the forest soil]. – Lesovedeniye. 1: 64–70. (In Russian)
 23. Finér L., Ohashi M., Noguchi K., Hirano Y. 2011. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. – Forest Ecol. Manag. 262(11): 2008–2023.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.042>
 24. Lehtonen A., Palviainen M., Ojanen P., Kalliokoski T., Nöjd P., Kukkola M., Penttilä T., Mäkipää R., Leppälampi-Kujansuu J., Helmisaari H.-S. 2016. Modelling fine root biomass of boreal tree stands using site and stand variables. – Forest Ecol. Manag. 359: 361–369.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.023>
 25. Vanninen P., Mäkelä A. 1999. Fine root biomass of Scots pine stands differing in age and soil fertility in southern Finland. – Tree Physiology. 19(12): 823–830.
<https://doi.org/10.1093/treephys/19.12.823>
 26. Helmisaari H.-S., Derome J., Nöjd P., Kukkola M. 2007. Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. – Tree Physiology. 27(10): 1493–1504.
<https://doi.org/10.1093/treephys/27.10.1493>
 27. Usoltsev V.A. 1988. [Growth and structure of forest stands phytomass]. Novosibirsk. 253 p. (In Russian)
 28. Usoltsev V.A., Zalesov S.V. 2005. Methods for determining biological productivity of plantations. Ekaterinburg. 147 p. (In Russian)
 29. Kazimirov N.I., Morozova R.M. 1973. Biologicheskii krugovorot veshchestv v yelnikakh Karelii [Biological circuit of substances in spruce forests of Karelia]. Leningrad. 175 p. (In Russian)
 30. Vladychenskiy A.S., Telesnina V.M., Chalaya T.A. 2012. Plant leaf-fall influence on biological activity of south taiga post-agrogenic soils. – Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser 17. Pochvovedeniye. 1: 3–10.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17637057> (In Russian)
 31. Telesnina V.M. 2015. Postagrogenic dynamics of vegetation and soil properties during demutational succession in south taiga. – Lesovedeniye. 4: 293–306. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23906220> (In Russian)
 32. Telesnina V.M., Vaganov I.E., Karlsen A.A., Ivanova A.E., Zhukov M.A., Lebedev S.M. 2016. Specific features of the morphology and chemical properties of coarse-textured postagrogenic soils of the southern taiga, Kostroma oblast. – Eurasian Soil Sc 49(1): 102–115. (In Russian)
<https://doi.org/10.1134/S1064229316010117>
 33. Prokushkin S.G. 1992. Pine litter mineralization dynamics. – Lesovedeniye. 4: 28–34. (In Russian)
 34. Kuznetsov M.A. 2010. Effect of decomposition conditions and falloff composition on litter reserves and characteristics in a bilberry-sphagnum spruce forest of middle taiga. – Lesovedeniye. 6: 54–60.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15510017> (In Russian)
 35. Neina D. 2019. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. – Appl. Environ. Soil Sci. 9: 1–9.
<https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
 36. [Scientific and applied reference book of the USSR's climate]. 1988. 3 (1–6). Leningrad. 693 p. (In Russian)
 37. Romanov A.A. 1961. [Climate of Karelia]. Petrozavodsk. 139 p. (In Russian)
 38. [Atlas of the Karelian USSR]. Moscow. 1989. 40 p. (In Russian)
 39. Fedorets N.G., Morozova R.M., Solodovnikov A.N. 2003. The forest soils in Karelia and evaluation their capacity. – Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. 5: 108–120.
http://resources.krc.karelia.ru/transactions/doc/trudy2003/trudy_2003_5_108-120.pdf (In Russian)
 40. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. 2004. [Russian soil classification and diagnostic system]. Smolensk. 342 p. (In Russian)
 41. OST 56-69-83. [Industry standard OST 56-69-83. Forest valuation sample plots. Setting-up method]. (In Russian)
 42. Poluboyarinov O.I. 1976. [Wood density]. Moscow. 160 p. (In Russian)
 43. Kazimirov N.I., Morozova R.M., Kulikova V.K. 1979. [Birch forests in the middle taiga zone: organic mass and flow of substances]. Leningrad. 216 p. (In Russian)
 44. [Methods for forest litter stock and ash content quantifications in silvicultural research]. Moscow. 1979. 38 p. (In Russian)
 45. Kondratova A.V., Abramova E.R. 2018. Specific features of fine root formation at different stages of regeneration of postagrogenic ecosystems in southern taiga zone. – Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya. 9: 18–22.
<https://www.natural-sciences.ru/pdf/2018/9/36860.pdf> (In Russian)

46. *Chibisov G.A.* 1971. [Growth of root systems in birch-spruce stands and the effect of thinning on it]. – In: [Papers on forest management resin industry]. Arkhangelsk. P. 121–130. (In Russian)
47. *Martinovich B.S., Kabashnikova G.I., Krot L.A.* 1982. [Life activity and growth patterns of spruce and birch in mixed spruce-birch stands]. – In: [Adjustment of plant growth, development and nutrition in phytocoenoses]. Minsk. P. 49–78. (In Russian)
48. *Schmid I.* 2002. The influence of soil type and interspecific competition on the fine root system of Norway spruce and European beech. – *Basic Appl. Ecol.* 3(4): 339–346.
<https://doi.org/10.1078/1439-1791-00116>
49. [Soil formation processes]. 2006. Moscow. 510 p. (In Russian)
50. *Germanova N.I., Medvedeva M.V., Mamai A.V.* 2012. [Dynamics of the needle-leaf tree waste destruction in the stands of medium boreal Karelia]. – *Izvestiya Vuzov. Lesnoy Zhurnal.* 1: 24–32. (In Russian)
51. *Zyabchenko S.S., Dyakonov V.V., Fedorets N.G., Sinkevich T.A.* 1994. [Forest ecosystems of “Kivach” strict nature reserve]. – In: [Structural and functional arrangement of forest soils of the middle taiga subzone of Karelia]. Petrozavodsk. p. 5–37. (In Russian)