

УДК 63*630*181.351

РАЗЛОЖЕНИЕ КОРЫ В СОСТАВЕ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ ПОСЛЕ СПЛОШНЫХ РУБОК В СРЕДНЕТАЕЖНЫХ ЛЕСАХ¹

© 2019 г. Е. А. Капица^{a, b, *}, Е. В. Шорохова^{a, b, c}, И. В. Ромашкин^b,
Н. А. Галибина^b, К. М. Никерова^b, И. А. Казарцев^{a, b, d}

^aСанкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
Россия, 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5

^bКарельский научный центр Российской академии наук
Россия, 185910, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

^cИнститут Природных Ресурсов Финляндии (Луке)
Финляндия, FI-00790, Хельсинки, ул. Виикинкаари, 4

^dВсероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
Россия, 196608, Санкт-Петербург, Пушкин, шоссе Подбельского, 3

*E-mail: kapitsa@list.ru

Поступила в редакцию 16.11.2017 г.

После доработки 11.12.2017 г.

Принята к публикации 08.10.2018 г.

Роль коры как фракции фитомассы в биологическом круговороте веществ изучена недостаточно. В работе исследована шестилетняя динамика физических и химических свойств коры, оставшейся после сплошной рубки леса. Масса коры в составе порубочных остатков составила $20.8 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$, или пятую часть от запаса крупных древесных остатков, который варьировал от 105 до $127 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$. Начальная удельная масса коры составила в среднем 0.601 г см^{-2} для осины, 0.346 г см^{-2} для сосны, 0.446 г см^{-2} для березы и 0.233 г см^{-2} для ели. Начальная плотность коры варьировала от 0.51 до 0.71 г см^{-3} для осины, от 0.56 до 0.80 г см^{-3} для березы, от 0.39 до 0.64 г см^{-3} для сосны и от 0.60 до 0.73 г см^{-3} для ели; начальные концентрации азота и углерода – от 0.23 до 0.53% и от 42 до 48% , соответственно. Изменение во времени удельной массы коры, процента флоэмы и толщины коры зависело от древесной породы. Максимальная скорость потери массы отмечена у еловой коры, тогда как максимальная скорость потери флоэмы – у березовой коры. За 6 лет, прошедших после рубки, удельная масса коры уменьшилась на $32\text{--}38\%$, плотность – на $10\text{--}17\%$, процент флоэмы – на $78\text{--}99\%$. Концентрации азота и углерода в коре не изменились. Сохранение слоя коры на поверхности почвы после рубки леса частично компенсирует потери азота вследствие вывоза срубленной древесины.

Ключевые слова: древесная кора, ксиллиз, плотность, скорость разложения, флоэма, углерод, азот.

DOI: 10.1134/S0024114819010066

Кора представляет собой совокупность тканей, выполняющих, главным образом, защитные функции от: 1) неблагоприятных климатических условий, предохраняя ткани дерева от чрезмерного перегрева летом и охлаждения зимой; 2) биологических агентов, таких как дереворазрушающие грибы, бактерии и вирусы; 3) механических повреждений и атмосферного загрязнения, длительное время оберегая дерево от воздействия поллютантов (Sawidis et al., 2011; Dossa et al., 2016). После отмирания дерева все фракции фитомассы, в том числе и кора, вовлекаются в биологический круговорот. Роль коры в возврате минеральных элементов в лесную экосистему до

конца неясна в связи с ее сложным анатомическим строением. Отличия анатомического строения и минерального состава коры и древесины (Поздняков и др., 1974; Казимиров, Морозова, 1975; Лотова, 1999) не позволяют объединить эти фракции при изучении биологического круговорота. Различия луба и корки по плотности (Полубояринов, Сорокин, 1997) делают процесс деградации неравномерным. Луб как наиболее доступный и питательный пищевой ресурс активно поедают насекомые и разлагают микроорганизмы, в то время как богатая смолами и таннинами корка длительное время сохраняет свою структуру (Рипачек, 1967; Parameswaran et al., 1976).

Ранее для таежных лесов были определены скорости потери массы и объема прикрепленной к стволу коры (Tarasov, Birdsey, 2001; Шорохова,

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (15-14-10023).

Капица, 2007), а также образцов коры, выложенных на поверхность почвы и зарытых в подстилку (Wilhelm, 1976) или почву (Kuhlman, 1970), а также выявлены факторы, регулирующие эти процессы, к которым относятся древесная порода (Shorohova, Kapitsa, 2014), секция ствола (Шорохова, Капица, 2007), лесорастительные условия, воздействие регулируемого пала (Shorohova et al., 2008a, b). На вырубках рассчитаны константы разложения коры, прикрепленной к пням (Shorohova et al., 2008a). Вместе с тем, разложение коры, оставшейся после сплошной рубки леса на поверхности почвы, не изучено. Количественно не оценены объем и масса коры как фракции подстилки. Использование констант, характеризующих процесс разложения коры, прикрепленной к пням, невозможно в силу различий микроклиматических условий (Дымов, Старцев, 2016; Lukina et al., 2017).

Химический состав коры определяется породой (Поздняков и др., 1974), почвенными условиями (Gustafsson, Eriksson, 1995; Орлова и др., 2016), наличием в воздухе загрязнителей (Sekstere et al., 2015), а также временем и интенсивностью процесса разложения (Palviainen et al., 2010). Содержание азота и углерода в коре, как правило, выше чем в древесине (Palviainen et al., 2010). Установлено, что по мере деструкции древесины и прикрепленной к пню коры концентрация азота (на единицу сухой массы) в первые 10 лет увеличивается, что связано с низкой скоростью его вымывания, а также с фиксацией азота из атмосферы азотфиксирующими бактериями или его переносом филаментными грибами из других природных резервуаров (например, из почвы) в зону биодеструкции (разрушения). По истечении периода освоения коры и древесины происходит плавное снижение концентрации азота. Содержание углерода в коре (на единицу сухой массы), прикрепленной к пню, практически не меняется (Palviainen et al., 2010). Однако динамика углерода и азота в коре как фракции подстилки остается неизученной.

Несмотря на свою высокую биологическую и сырьевую ценность (Lambert, 1981), кора остается слабо используемым ресурсом. В странах Скандинавии интенсификация лесопользования подразумевает использование всех фракций фитомассы, включая кору, корни и ветви, что ведет к истощению продуктивности лесных экосистем и повышению кислотности почв (Jönsson, 2000). Масштабы снижения продуктивности “истощенных экосистем” в долгосрочной перспективе пока не оценены. В России же наблюдается обратная ситуация — удаленность заготовительных и лесоперерабатывающих предприятий и, как следствие, отсутствие рынка сбыта древесных отходов приводят к образованию отвалов, содержащих продукты лесопиления, большую часть кото-

рых составляет кора. В процессе ее разложения высвобождаются фенольные и другие соединения, которые отрицательно влияют на грунтовые воды и лесные экосистемы, таким образом нарушая санитарное состояние территории. В связи с этим важно определить темпы естественного разложения древесной коры и оценить факторы, влияющие на скорость этого процесса.

Целью исследования являлась характеристика динамики физических свойств коры в процессе ее разложения в составе порубочных остатков после сплошных рубок в смешанных среднетаежных лесах. Решались следующие задачи: 1) оценить проективное покрытие, запас и массу коры, оставшейся на лесосеке после сплошной рубки леса, и сравнить их с таковыми для крупных древесных остатков; 2) выявить закономерности изменения физических характеристик коры, концентраций углерода (C) и азота (N) в процессе разложения и рассчитать параметры моделей, описывающих эти изменения во времени. В процессе работы была протестирована гипотеза об определяющей роли древесной породы в динамике изменения физических и химических характеристик коры на вырубках.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследование было выполнено в 2015–2016 гг. на вырубках в Республике Карелия. Территория приурочена к среднетаежной подзоне растительности (Курнаев, 1973). Среднегодовая температура составляет $+2.4^{\circ}\text{C}$, количество осадков — 584 мм год^{-1} . Разница температур между самым теплым (июль) и самым холодным (январь) месяцами равна 34.1°C . Продолжительность вегетационного периода составляет 80 дней.

Почва временных пробных площадей, на которой происходило разложение порубочных остатков, была классифицирована как подзол иллювиально-железисто-гумусовый (Соломатина, 2009). Почвообразующая порода представлена пылевато-песчаной мореной.

Сплошная узколесосечная рубка на всех пробных площадях проведена харвестером. Трелевка сортиментов осуществлялась по волокам (форвардером), с временным размещением сортиментов на погрузочной площадке. Порубочные остатки (отходы древесины, образующиеся на лесосеке при валке и трелевке деревьев, очистке стволов от сучьев (Острошенко, 2005)) распределены по пробным площадям относительно равномерно, с незначительной аккумуляцией на волоках, где отходы лесозаготовки используют для повышения проходимости техники.

Полевые исследования. Образцы коры были отобраны на четырех временных пробных площадях, заложенных на площадях с разной давностью

Таблица 1. Характеристика временных пробных площадей

Пробная площадь, год вырубki	Географические координаты	Тип леса	Состав древостоя до рубки*	Запас древостоя до рубки, м ³ га ⁻¹	Запас КДО** на вырубке, м ³ га ⁻¹ ***
Гомсельга, 2013 г.	62°06' с.ш., 33°99' в.д.	Черничный	5Е _{100–140} 2Ос _{60–70} 2С _{50–60} 1Б _{50–60}	447	17 + 64 + 17 + 29 = 127
Березовые мосты, 2015 г.	61°90' с.ш., 34°57' в.д.	Черничный	6Е _{120–140} 2Б _{70–80} 1С _{120–140} 1Ос _{60–70}	433	14 + 54 + 20 + 17 = 105
Ялгуба-1, 2015 г.	61°94' с.ш., 34°44' в.д.	Кислично-черничный	5С _{100–160} 3Б _{30–40} 1Е ₁₂₀ 1Ос _{60–70}	253	55 + 22 + 15 + 12 + 18 = 122
Ялгуба-2, 2010 г.	61°91' с.ш., 34°57' в.д.	Кислично-черничный	4Ос _{60–70} 3Е _{100–140} 2С _{120–160} 1Б _{60–70}	346	****

* Е – ель, Ос – осина, С – сосна, Б – береза, Р – рябина.

** КДО – крупные древесные остатки (сухостой, валеж, зависшие стволы, пни, а также их обломки, крупные сучья и корни со средним диаметром более 2.5 см).

*** С + Е + Б + Ос + Р = Σ.

**** Данные по запасу КДО отсутствуют.

сплошной рубки леса: 6 месяцев (Ялгуба-1, Березовые мосты), 2 года (Гомсельга) и 6 лет (Ялгуба-2) (табл. 1). На двух пробных площадях (Гомсельга, Березовые мосты) преобладающей породой до рубки леса была ель (*Picea abies* (L.) H.Karst), сопутствующими – сосна (*Pinus sylvestris* L.), береза (*Betula pubescens* Ehrh. и *Betula pendula* Roth.), осина (*Populus tremula* L.). В напочвенном покрове преобладали виды, характеризующие средние по богатству и влажности почвенные условия таежного леса: черника (*Vaccinium myrtillus* L.), брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.) и др. На третьей пробной площади (Ялгуба-1) доминировала сосна, на четвертой (Ялгуба-2) – осина. В напочвенном покрове более богатых по лесорастительным условиям третьей и четвертой пробных площадях преобладала черника (*Vaccinium myrtillus* L.), значительные площади занимали кислица (*Oxalis acetosella* L.), костяника (*Rubus saxatilis* L.) и папоротник (*Dryopteris filix-mas* (L.) Schott).

Запас крупных древесных остатков (КДО) оценивали на каждой вырубке на четырех 25-метровых трансектах, заложенных с севера на юг (2 трансекты) и с запада на восток (2 трансекты), захватывающих как пасеку, так и волоки. Для валежа и зависших деревьев учитывали породу, класс разложения (Шорохова, Шорохов, 1999) и диаметр в месте пересечения ходовой линии. Объем КДО по породам и классам разложения рассчитывали по формуле (Stahl et al., 2001):

$$V = (\pi^2 / 8 \sum d_i^2 S) / \sum L_j, \quad (1)$$

где V – объем КДО данного класса разложения, d_i – диаметр i -го объекта в месте пересечения ходовой линии, L_j – длина j -й ходовой линии, S – площадь, в данном случае равная 1 га. Для сухостоя и пней диаметром более 4 см регистрировали породу, класс разложения, диаметр основания и

вершины или диаметр на высоте 1.3 м и высоту. Объем пней рассчитывали по формуле усеченного конуса. Объем сухостойных деревьев рассчитывали умножением площади сечения на высоте груди и видовой высоты (см. методику (Капица и др., 2012б)).

Кору отбирали с поверхности почвы, на некотором расстоянии (до 50 см) от пня. Данный метод отбора позволяет быть уверенным в том, что процесс биогенного разложения коры на протяжении всего периода проходил на поверхности почвы.

Для исследования были отобраны 140 образцов коры: 40 – ели, 30 – сосны, 33 – осины и 37 – березы. Данные о возрасте рубки (а, значит, и моменте формирования слоя коры вырубki) получены из лесничеств. В качестве контроля (начальной точки разложения) использовали образцы коры, собранные с валежа текущего года (со свежей листвой и хвоей) или с живого дерева (для сосны) в непосредственной близости от временных пробных площадей. Для всех образцов коры в полевых условиях измеряли площадь поверхности.

Для оценки запаса коры на свежей вырубке (возраст рубки 0 лет) были заложены две 25-метровые трансекты: одна – с севера на юг, другая с запада на восток. На каждой трансекте с шагом 1 м оценивали процент покрытия коры на поверхности почвы на площадке 1 м²; в общей сложности обследовали 12 площадок. Толщина слоя составляла в среднем 1 см.

Массу слоя коры для исследуемых вырубок рассчитывали, исходя из доли участия древесных пород до рубки леса в составе древостоя, путем умножения объема слоя коры на свежей вырубке на базисную плотность коры.

Таблица 2. Объем и масса коры, масса азота (N) в коре, масса углерода (C) в коре в составе порубочных остатков на свежей вырубке

Показатель	Осина	Береза	Сосна	Ель
Запас коры на вырубке, м ³ га ⁻¹	2.1–8.3	2.1–6.2	2.1–10.4	2.1–12.5
Масса коры на вырубке, кг га ⁻¹	1331–5262	1514–4470	1045–5179	1403–8350
Масса N в коре на вырубке, кг га ⁻¹	7.1–27.9	6.8–20.1	2.4–11.9	6.0–35.9
Масса C в коре на вырубке, кг га ⁻¹	559–2210	727–2146	502–2486	645–3841

Массу углерода и азота на свежей вырубке рассчитывали как процент содержания соответствующего элемента в коре от общей массы коры на вырубке.

Лабораторные исследования и расчеты. В лаборатории кору высушивали в сушильном шкафу при температуре 103°C в течение 48 ч до абсолютно сухого состояния, взвешивали (для оценки удельной массы коры), парафинировали, взвешивали после парафинирования для вычитания массы парафина и определяли объем методом гидростатического взвешивания (Полубояринов, 1976).

Для определения содержания N и C все растительные образцы сразу после отбора замораживали в жидком азоте, лиофильно высушивали и измельчали до однородной массы на лабораторной мельнице. Элементоорганический анализ проводили с помощью CHNS/O-анализатора Perkin Elmer 2400 Series II (USA). На анализ отбирали навеску 1.5–2.5 мг абсолютно сухого образца. После каждых 10–20 образцов использовали органический аналитический стандарт ацетанилида (Perkin Elmer № 0204-1121) для калибровки CHNS/O-анализатора.

Скорость потери массы коры рассчитывали на единицу площади (методика разработана на основании ранее проведенных исследований (Шорохова, Капица, 2007)). Массу коры на единицу площади (M_b , г м⁻²) (удельную массу) вычисляли по формуле:

$$M_b = M/S, \quad (2)$$

где M – масса образца коры в абсолютно сухом состоянии, мг; S – площадь поверхности образца, см².

Долю флоремы (%) абсолютно сухого образца измеряли как процент от толщины коры. Толщину коры (см) рассчитывали делением объема образца на площадь его поверхности. Плотность коры в абсолютно сухом состоянии (ρ , г м⁻³) находили делением массы образца в абсолютно сухом состоянии на его объем в абсолютно сухом состоянии. Объем абсолютно сухого образца рассчитывали методом гидростатического взвешивания (Полубояринов, 1976).

Статистический анализ данных. Зависимости массы на единицу площади (M_b), плотности (ρ), доли флоремы и концентрации C и N от древесной породы, времени рубки и типа лесорастительных условий (средние и богатые) оценивали с использованием дисперсионного анализа (ANOVA) и теста Дункана. По результатам статистического анализа данные были разделены на группы. Динамику вышеперечисленных показателей анализировали с помощью линейной множественной регрессионной и генерализированной линейной множественной регрессионной моделей среды R (функции lm, glm), (R Core Team, 2013).

Построение графиков осуществляли в среде R (ggplot2), (R Core Team, 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вклад слоя коры в круговорот веществ на вырубке.

Запас коры, оставшейся после рубки леса, составил 20.8 м³ га⁻¹, из которых 2.1–10.4 м³ га⁻¹ – кора сосны, 2.1–12.5 м³ га⁻¹ – кора ели, 2.1–6.2 м³ га⁻¹ – кора березы, 2.1–8.3 м³ га⁻¹ – кора осины (табл. 2). Запасы крупных древесных остатков на пробных площадях варьировали от 105 до 127 м³ га⁻¹. Оставленные порубочные остатки были представлены в основном доминирующей породой (елью или сосной) и составили 22–64 м³ га⁻¹ для ели и 14–55 м³ га⁻¹ для сосны (табл. 1). Если учесть, что в коренных сосняках средней тайги на долю крупных древесных остатков приходится от 2 до 92 м³ га⁻¹, а в ельниках – от 32 до 328 м³ га⁻¹ (Капица и др., 2012б), оставленные 20.8 м³ га⁻¹ коры являются значительным вкладом в биологический круговорот после сплошнолесосечной рубки леса, особенно с учетом того, что кора богаче биогенными элементами, чем древесина (Palviainen et al., 2010).

Физические характеристики контрольных образцов. Средний процент флоремы у контрольных образцов уменьшался в ряду: береза, осина, ель, сосна (табл. 3). Минимальный процент флоремы был у контрольных образцов сосны – 21% от общей толщины коры, максимальный – у коры березы (71%). Полученные результаты близки к данным, полученным О.И. Полубояриновым и А.М. Сорокиным (1997), согласно которым про-

Таблица 3. Средние значения физических и минеральных характеристик коры контрольных образцов

Показатель	Осина	Береза	Сосна	Ель
Базисная плотность ρ_0 , г см ⁻³	0.634 (0.025)	0.721 (0.023)	0.498 (0.072)	0.668 (0.022)
Удельная масса M_b/S , г см ⁻²	0.601 (0.073)	0.446 (0.057)	0.346 (0.107)	0.233 (0.012)
Толщина, см	1.101 (0.179)	0.618 (0.068)	0.602 (0.053)	0.348 (0.013)
Флоэма, %	55 (6)	71 (3)	21 (10)	48 (3)
Концентрация С, %	42 (1)	48 (1)	48 (3)	46 (3)
Концентрация N, %	0.53 (0.06)	0.45 (0.04)	0.23 (0.04)	0.43 (0.10)
C/N	88 (12)	109 (7)	230 (17)	135 (37)

Примечание. В скобках указана стандартная ошибка SE.

цент флоэмы коры на высоте 1.3 м также уменьшался в ряду береза, осина, ель, сосна и составил 72.4% (против 71% по нашим результатам), 49.7 (против 55), 31.6 (против 48), 8.72% (против 21%), соответственно. Незначительные различия связаны с тем, что процент флоэмы от общей толщины коры определяется также возрастом дерева, частью ствола и условиями произрастания (Полубояринов, Сорокин, 1997).

Толщина коры контрольных образцов варьировала от 0.31 до 1.82 см: 0.33–0.98 см для березы, 0.31–0.39 см для ели, 0.53–1.82 см для осины и 0.52–0.70 см для сосны.

Значения начальной плотности коры (ρ_0) варьировали: от 0.51 до 0.71 для осины, от 0.56 до 0.80 для березы, от 0.39 до 0.64 для сосны и от 0.60 до 0.73 г см⁻³ для ели. Средняя базисная плотность контрольных образцов уменьшалась в ряду: береза, ель, осина, сосна (табл. 3).

Полученные концентрации углерода и азота несколько ниже по сравнению с данными М. Pal-

viainen с соавт. (2010) для пней южной тайги. Так, концентрация углерода для ели, сосны и березы равна 46, 48 и 48% (наши данные), в то время как на вырубках южнотаежной подзоны – 53, 56, 52%; концентрация азота – 0.43, 0.23, 0.45% (наши данные) против 0.31, 0.28, 0.45% (Palviainen et al., 2010). Процентное соотношение химических элементов в коре определяется породой (Palviainen et al., 2010), диаметром ствола, возрастом дерева, частью ствола (Harmon et al., 1986), плодородием почвы (Werkelin et al., 2011), временем года (Helmisaari, Siltala, 1989) и климатом (Berg, McLaugherty, 2003).

Изменение физических показателей коры во времени. Различия в динамике потери удельной массы коры, уменьшении пропорции флоэмы и толщины зависели от породы и времени. Наиболее активно происходило истончение коры осины и сосны, практически вдвое медленнее – коры березы (табл. 4). Процент флоэмы линейно уменьшался со временем разложения (рис. 1).

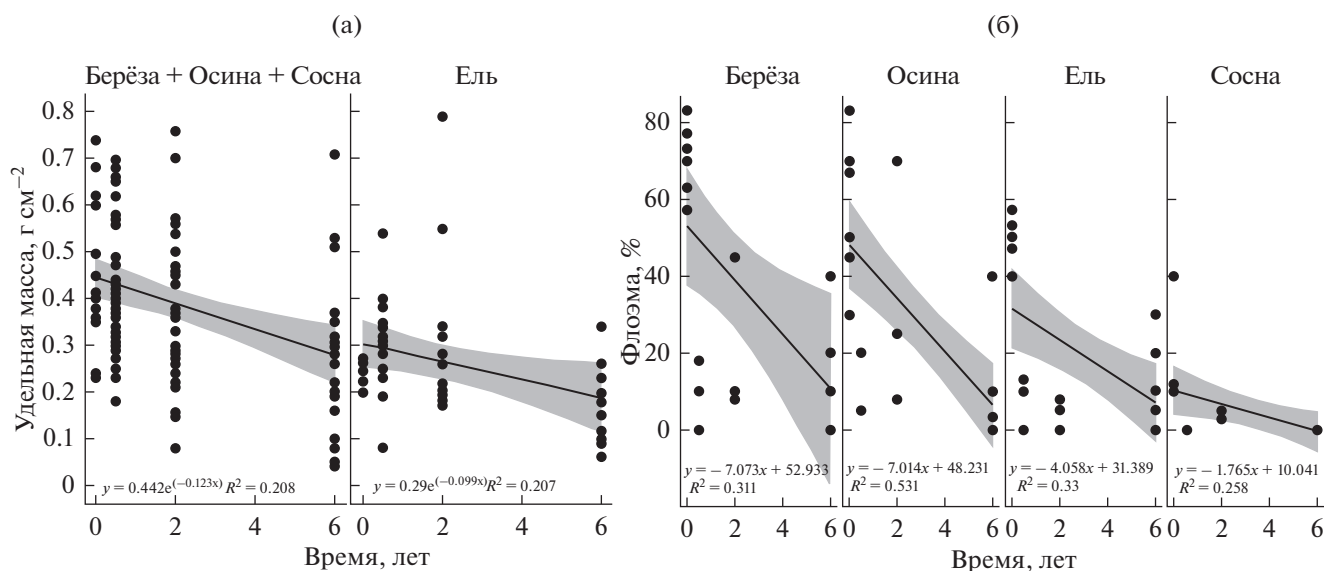


Рис. 1. Изменение физических характеристик (а – удельной массы, б – доли флоэмы) коры осины, березы, ели и сосны в процессе разложения.

Таблица 4. Изменение физических и химических характеристик коры в зависимости от времени и породы

Зависимая переменная	Модель, распределение, функция связи	<i>F</i>	<i>df</i>	Средние значения коэффициентов моделей для породы	Средние значения коэффициентов моделей для времени	<i>Z</i>	Множественный <i>R</i> ² : скорректированный <i>R</i> ²
Плотность <i>p</i> , г см ⁻³	Линейная регрессия, нормальное, тождество	49.76	4	Свободный член (Осина): 0.61 (0.18) Сосна: -0.19 (0.02) Ель: 0.06 (0.02) Береза: -0.09 (0.02)	-	-	0.565 : 0.554
Удельная масса <i>M_b/S</i> , г см ⁻²	Линейная регрессия, нормальное, тождество	11.85	4	Свободный член (Осина): 0.47 (0.03) Ель: -0.15 (0.04)	-0.026 (0.006)	-	0.234 : 0.217
Толщина, см	Линейная регрессия, нормальное, тождество	11.86	4	Свободный член (Осина): 0.84 (0.06) Ель: -0.34 (0.08) Береза: -0.16 (0.08)	-0.04 (0.01)	-	0.237 : 0.217
Флоэма, %	Генерализованная линейная, Пуассона, тождество	1564 (время) 1129 (порода)	1 3	Свободный член (Осина): 3.89 (0.04) Сосна: -1.78 (0.12) Ель: -0.33 (0.06) Береза: 0.15 (0.05)	-0.30 (0.13)	93 -14 -5 3	-
Концентрация N, %	Линейная регрессия, нормальное, тождество	8.82	4	Свободный член (Осина): 0.65 (0.05) Сосна: -0.33 (0.07) Ель: -0.13 (0.06)	-	-	-
C : N	Линейная регрессия, нормальное, тождество	4.92	4	Свободный член (Осина): 85.20(10.27) Сосна: 41.79 (13.03)	-	-	-

Примечание. *F* – критерий Фишера дисперсионного анализа. *df* – число степеней свободы, параметры моделей, коэффициент детерминации *R*² или *Z*. В скобках указана ошибка среднего (SE) с уровнем значимости 0, 0.001, 0.01, 0.05.

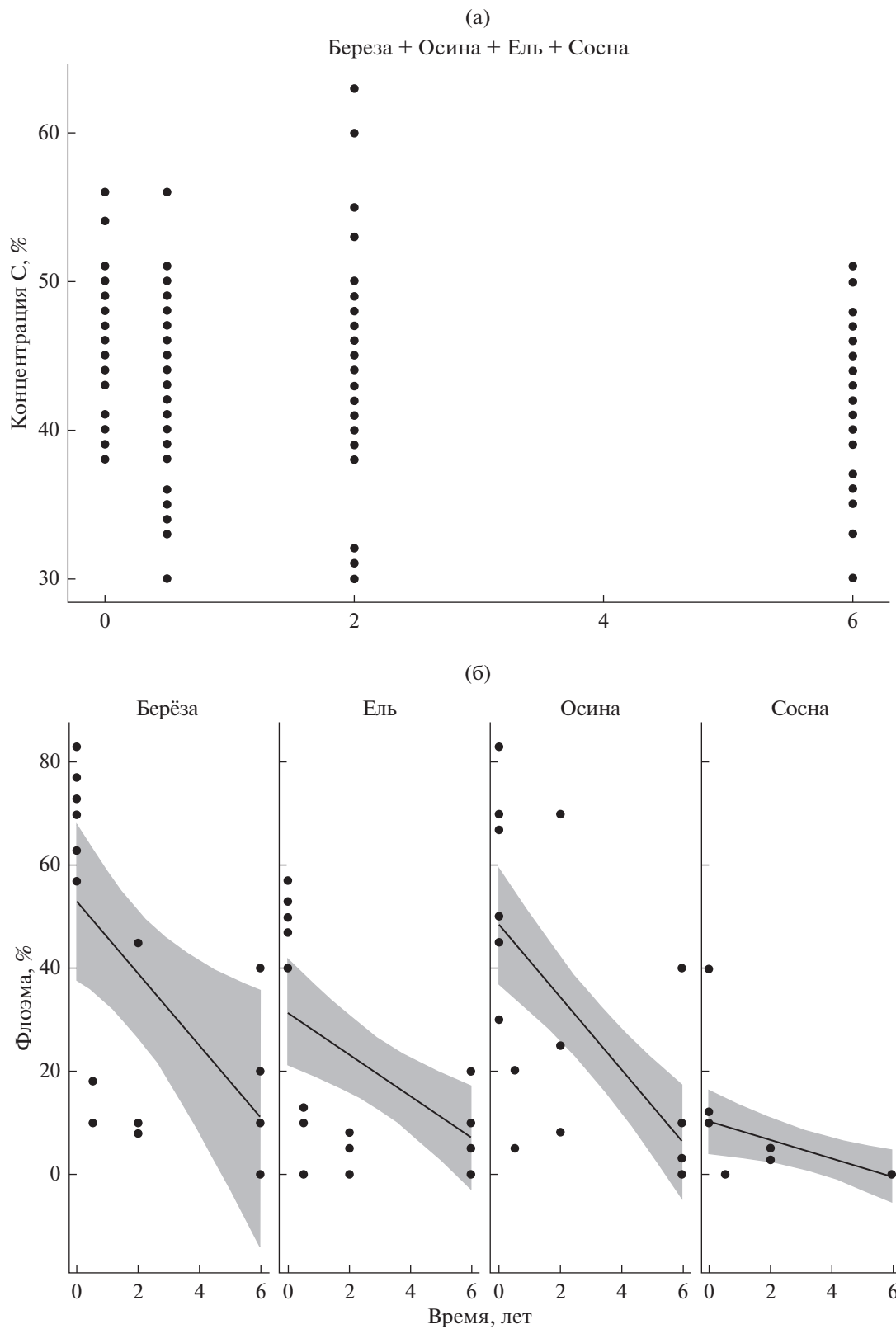


Рис. 2. Концентрации минеральных элементов (а – углерода, б – азота) по мере разложения коры в составе порубочных остатков.

За шесть лет, прошедших после рубки, удельная масса коры осины, березы и сосны уменьшилась практически вдвое. Изменение удельной массы коры ели протекало менее интенсивно (рис. 1). Высокая скорость изменения удельной массы коры лиственных пород может быть связана с отсутствием смолистых соединений в их строении (в отличие от хвойных пород). Смолистые вещества, пронизывающие древесину и кору сосны и ели, выполняют роль биологической защиты от патогенных организмов: монотерпены, входящие в состав смолы, обладают свойствами контактных ядов для насекомых-ксилофагов, которые, фрагментируя кору, ускоряют ее разложение (Рожков, 1972; Ludley et al., 2008). Различия в скорости изменения удельной массы коры сосны и ели объясняются способностью коры сосны расслаиваться больше коры ели. Процесс потери массы на единицу площади связан не только с деструкцией коры дереворазрушающими организмами, но и с отслаиванием коры по мере ее высыхания.

Анатомическое строение коры определяет ее плотность и, как следствие, различия в скорости биологической деструкции (табл. 4). Изменение плотности коры во времени статистически недостоверно, что связано с низкой плотностью флоэмы, которая хоть и быстро разлагается, но вносит незначительный вклад в общую плотность коры. Более того, быстрое разложение неплотной флоэмы повышает плотность коры в целом спустя 6 лет, что, в свою очередь, нивелирует влияние времени на динамику плотности. Отсутствие зависимости изменения плотности от времени также может быть связано с незначительным временем исследования, которого оказалось недостаточно для освоения труднорастворимых элементов коры (корки) дереворазрушающими организмами.

Динамика углерода в коре не зависела от времени и породы (рис. 2); концентрация азота в коре на вырубках определялась только древесной породой (табл. 4). Полученные результаты подтверждают теорию о 5–6-летнем лаг-периоде, в течение которого скорость биологической деструкции незначительна. Так, согласно литературным данным (Palviainen et al., 2010), через 5 лет после рубки концентрация углерода в коре пней снижается лишь на 7 (ель) и 1% (сосна). Концентрация азота, вопреки нашим ожиданиям, не увеличилась, что также, возможно, связано с наличием периода “освоения” коры.

Тип леса (черничный vs. кислично-черничный) не влиял на скорость биогенной деструкции коры на поверхности почвы (удельная масса: $F = 1.706$; $p = 0.203$; плотность: $F = 0.018$; $p = 0.893$; толщина коры: $F = 4.070$; $p = 0.058$). Гипотеза о более активной деструкции коры на поверхности более богатых почв (Прокушкин и др., 2014) не

нашла подтверждения в нашем исследовании. Микроклимат под пологом и на вырубках сильно различается (влажность, температура) (Мурзаева, 1978). На вырубке скорость деструкции коры определяют климатические характеристики района, которые более значимы, чем лесорастительные особенности биотопа.

Заключение. Кора в составе порубочных остатков играет значительную роль в обеспечении устойчивого лесопользования, препятствуя обеднению почв, — запасы коры на вырубке составляют около 1/5 от объема крупных древесных остатков. Особенно существенна роль коры в азотном цикле, т. к. она более богата азотом по сравнению с древесиной. Различия в анатомическом строении древесных пород определяют скорость изменения плотности, процента флоэмы, толщины, удельной массы и азота в коре, а, следовательно, и ее роль как части подстилки в биологическом круговороте.

Мы благодарим за помощь в сборе данных и подборе пробных площадей Алексея Полевого, Анастасию Мамай, Елену Мошкину, Нилу Сироткину, Дарью Глазунову и Никиту Баклаженко.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дымов А.А., Старцев В.В. Изменение температурного режима подзолистых почв в процессе естественного лесовозобновления после сплошнолесосечных рубок // Почвоведение. 2016. № 5. С. 599–608.
- Казимиров Н.И., Морозова Р.М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии // Л.: Наука, 1973. 175.
- Капица Е.А., Трубицына Е.А., Шорохова Е.В. Биогенное разложение стволов, ветвей и корней основных лесобразующих пород темнохвойных северотаежных лесов // Лесоведение. 2012а. № 3. С. 51–58.
- Капица Е.А., Шорохова Е.В., Кузнецов А.А. Пул углерода крупных древесных остатков в коренных лесах северо-запада Русской равнины // Лесоведение. 2012б. № 5. С. 36–43.
- Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука. 1973. 203 с.
- Лотова Л.И. Микроструктура коры основных лесобразующих лиственных деревьев и кустарников Восточной Европы. М.: КМК. 1999. 114 с.
- Мурзаева М.К. Особенности микроклимата на лесосеках различных способов рубок // Леса Урала и хозяйство в них. Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во. 1978. Вып. 11. С. 73–77.
- Орлова М.А., Лукина Н.В., Смирнов В.Э., Артемкина Н.А. Влияние ели на кислотность и содержание элементов питания в почвах северотаежных ельников кустарниково-зеленомошных // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1355–1367.
- Острошенко В.В. Краткий словарь основных лесоводственно-экономических терминов. Уссурийск: Приморская гос. с.-х. академия, 2005. 196 с.

- Поздняков Л.К., Шербаков Н.М., Зябченко С.С., Куликова В.К. Лесные растительные ресурсы Карелии. Петрозаводск: Карельск. филиал АН СССР. 1974. 135 с.
- Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Наука, 1976. 159 с.
- Полубояринов О.И., Сорокин А.М. Физические свойства сосновой коры и ее компонентов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1997. № 3. С. 70–74.
- Прокушкин С.Г., Прокушкин А.С., Сорокин Н.Д. Интенсивность разложения отдельных компонентов фитодетрита в лиственничниках криолитозоны Средней Сибири // Известия РАН. Серия биол. 2014. № 1. С. 76–85.
- Рипачек В. Биология дереворазрушающих грибов. М.: Лесн. пром-сть, 1967. 258 с.
- Рожков А.С. Анатомические, гистохимические и биологические преобразования у лиственницы при повреждении насекомыми. Иркутск: АН СССР. Сиб. отделение. Сиб. ин-т физиологии и биохимии растений. 1972. 125 с.
- Соломатова Е.А. Экология и география почв // Почвы еловых лесов Восточной Фенноскандии. Петрозаводск: Кар НЦ РАН, 2009. С. 66–90.
- Шорохова Е.В., Капица Е.А. Фрагментация и разложение еловой коры в лесах южной и средней тайги // Лесоведение. 2007. № 5. С. 22–26.
- Шорохова Е.В., Шорохов А.А. Характеристика классов разложения древесного детрита ели, березы и осины в ельниках подзоны средней тайги // Тр. СПб. НИИ лесн. хоз-ва. 1999. Вып. 1(2). С. 17–23.
- Berg B., McLaugherty C. Plant litter: decomposition, humus formation, carbon sequestration. Berlin – Heidelberg: Springer Verlag, 2003. 286 p.
- Čekstere G., Laiviņš M., Osvalde A. Chemical composition of Scots pine bark as a bioindicator of environmental quality in Riga, Latvia // Proceedings of the Latvian academy of science. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences. 2015. V. 69. № 3. P. 87–97.
- Dossa G.G.O., Paudel E., Cao K., Schaefer D., Harrison R.D. Factors controlling bark decomposition and its role in wood decomposition in the tropical tree species. Scientific Reports. 6:34153. doi 10.1038/srep34153
- Gustafsson L., Eriksson I. Factors of importance for the epiphytic vegetation of aspen *Populus tremula* with special emphasis on bark chemistry and soil chemistry. J. Applied Ecology. 1995. V. 32. № 2. P. 412–424.
- Harmon M.E., Cromack Jr K., Smith B.G. Coarse woody debris in mixed-conifer forests, Sequoia National Park, California // Canadian J. Forest Research. 1987. V. 17. № 10. P. 1265–1272.
- Helmisaari H.S., Siltala T. Variation in nutrient concentrations of *Pinus sylvestris* stems // Scandinavian J. Forest Research. 1989. V. 4. № 1–4. P. 443–451.
- Jönsson A.M. Mineral nutrients of beech (*Fagus sylvatica*) bark in relation to frost sensitivity and soil treatments in southern Sweden // Annals of Forest Science. 2000. V. 57. № 1. P. 1–8.
- Kuhlman E.G. Decomposition of loblolly pine bark by soil- and root-inhabiting fungi // Canadian Journal of Botany. 1970. V. 48. № 10. P. 1787–1793.
- Lambert M.J. Inorganic constituents in wood and bark of New South Wales forest tree species // Forestry commission of New South Wales research note № 45. Sydney. 1981. 43 p.
- Ludley K.E., Robinson C.H., Jickells S., Chamberlain P.M., Whitaker J. Differential response of ectomycorrhizal and saprotrophic fungal mycelium from coniferous forest soils to selected monoterpenes // Soil Biology and Biochemistry. 2008. V. 40. Is. 3. P. 669–678.
- Lukina N.V., Orlova M.A., Steinnes E., Artemkina N.A., Gorbacheva T.T., Smirnov V.E., Belova E.A. Mass-loss rates from decomposition of plant residues in spruce forests near the northern tree line subject to strong air pollution // Environmental Science and Pollution Research. 2017. V. 24. № 24. P. 19874–19887.
- Palviainen M., Finér L., Laiho R., Shorohova E., Kapitsa E., Vanha-Majamaa I. Carbon and nitrogen release from decomposing Scots pine, Norway spruce and Silver birch stumps // Forest Ecology & Management. 2010. V. 259. № 3. P. 390–398.
- Parameswaran N., Wilhelm G.E., Liese W. Ultrastructural aspects of beech bark degradation by fungi // European J. Forest Pathology. 1976. V. 6. № 5. P. 274–286.
- Sawidis T., Breuste J., Mitrovic M., Pavlovic P., Tsigaridas K. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities // Environmental Pollution. 2011. V. 159. № 12. P. 3560–3570.
- Shorohova E., Kapitsa E., Vanha-Majamaa I. Decomposition of stumps 10 years after partial and complete harvesting in southern boreal forest in Finland // Canadian J. Forest Research. 2008a. V. 38. № 9. P. 2414–2421.
- Shorohova E., Kapitsa E., Vanha-Majamaa I. Decomposition of stumps in a chronosequence after clear-felling vs. clear-felling with prescribed burning in southern boreal forest in Finland // Forest Ecology and Management. V. 255. № 10. 2008b. P. 3606–3612.
- Shorohova E., Kapitsa E. Influence of the substrate and ecosystem attributes on the decomposition rates of coarse woody debris in European boreal forests // Forest Ecology and Management. 2014. V. 315. № 1. P. 173–184.
- Ståhl G., Ringvall A., Fridman J. Assessment of coarse woody debris – a methodological overview // Ecological Bulletins. 2001. V. 49. P. 57–70.
- Tarasov M.E., Birdsey R.A. Decay rate and potential storage of coarse woody debris in the Leningrad region // Ecological Bulletins. 2001. V. 49. P. 137–147.
- Werkelin J., Lindberg D., Boström D., Skrifvars B.-J., Hupa M. Ash-forming elements in four Scandinavian wood species. Part 3. Combustion of five spruce samples // Biomass & Bioenergy. 2011. V. 35. № 1. P. 725–733.
- Wilhelm G.E. Über die Zersetzung von Buchen- und Fichtenrinde unter natürlichen Bedingungen // European Journal of Forest Pathology. 1976. V. 6. № 2. P. 80–91.

Decomposition of Bark as Part of Logging Slashes after Clearcuts in Forests of Middle Taiga

E. A. Kapitsa^{1,2,*}, E. V. Shorokhova^{1,2,3}, I. V. Romashkin²,
N. A. Galibina², K. M. Nikerova², and I. A. Kazartsev^{1,2,4}

¹Saint-Petersburg Forestry University (SPbFTU) Institutskiy ln. 5, Saint-Petersburg, 194021, Russia

²Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences Pushkinskaya st. 11, Petrozavodsk, 185910 Russia

³Natural Resources Institute Finland (Luke) Viikinkari 4, Helsinki, FI-00790, Finland

⁴All-Russian Institute of Plant Protection Podbelskogo hwy. 3, Pushkin, Saint Petersburg, 196608, Russia

*E-mail: kapitsa@list.ru

Received 16 November 2017

Revised 11 December 2017

Accepted 8 October 2018

The contribution of bark to biological cycle of elements is understudied. Six-year dynamics of physical and chemical features of bark residues after clear cut have been considered. Mass of bark as part of logging slashes was $20.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, or a fifth of the stock of coarse woody debris, which varied from 105 to $127 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Initial unit mass of bark was on average 0.601 g cm^{-2} for aspen, 0.346 g cm^{-2} for pine, 0.446 g cm^{-2} for birch and 0.233 g cm^{-2} for spruce. Initial density of bark varied from 0.51 to 0.71 g cm^{-3} for aspen, from 0.56 to 0.80 g cm^{-3} for birch, from 0.39 to 0.64 g cm^{-3} for pine and from 0.60 to 0.73 g cm^{-3} for spruce. Initial concentrations of nitrogen and carbon were from 0.23 to 0.53% and from 42 to 48%, respectively. Temporal changes of unit mass, of phloem percentage and of thickness of bark was species specific. Maximal rate of mass loss was found for spruce bark, while the maximal rate of phloem loss was found for birch bark. Unit mass of bark decreased by 32–38%, density decreased by 10–17%, phloem percentage decreased by 78–99% over 6 years after logging. Concentration of nitrogen and carbon did not change in the bark. Deposition of bark layer atop of soil partially compensate for the losses of nitrogen caused by removal of logged wood.

Keywords: bark, xylolysis, density, rate of decomposition, phloem, carbon, nitrogen.

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Science Foundation (grant 15-14-10023).

REFERENCES

- Berg B., McLaugherty C., *Plant litter: decomposition, humus formation, carbon sequestration*, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2003, 286 p.
- Čekstere G., Laiviņš M., Osvalde A., Chemical composition of scots pine bark as a bioindicator of environmental quality in Riga, Latvia, *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, 2015, Vol. 69, No. 3, pp. 87.
- Dossa G.G.O., Paudel E., Cao K., Schaefer D., Harrison R.D., Factors controlling bark decomposition and its role in wood decomposition in five tropical tree species, *Scientific Reports*, 2016, Vol. 6, pp. 34153.
- Dymov A.A., Startsev V.V., Changes in the temperature regime of podzolic soils in the course of natural forest restoration after clearcutting, *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49, No. 5, pp. 551–559.
- Gustafsson L., Eriksson I., Factors of Importance for the Epiphytic Vegetation of Aspen *Populus tremula* with Special Emphasis on Bark Chemistry and Soil Chemistry, *Journal of Applied Ecology*, 1995, Vol. 32, No. 2, pp. 412–424.
- Harmon M.E., Cromack Jr K., Smith B.G., Coarse woody debris in mixed-conifer forests, Sequoia National Park, California, *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, Vol. 17, No. 10, pp. 1265–1272.
- Helmisaari H.S., Siltala T., Variation in nutrient concentrations of *Pinus sylvestris* stems, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1989, Vol. 4, No. 1–4, pp. 443–451.
- Jönsson A.M. Mineral nutrients of beech (*Fagus sylvatica*) bark in relation to frost sensitivity and soil treatments in southern Sweden, *Annals of Forest Science*, 2000, Vol. 57, No 1, pp. 1–8.
- Kapitsa E.A., Shorokhova E.V., Kuznetsov A.A., Pul ugleroda krupnykh drevesnykh ostatkov v korennykh lesakh severo-zapada Russkoi ravniny (Carbon pool of large wood residues in native forests of the Northwestern Russian Plain), *Lesovedenie*, 2012, No. 5, pp. 36–43.
- Kapitsa E.A., Trubitsyna E.A., Shorokhova E.V., Biogennoe razlozhenie stvolov, vetvei i kornei osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod temnokhoivnykh severotaezhnykh lesov (Biogenic xylolysis of trunks, branches, and roots of forest-forming species of dark coniferous forests in northern taiga), *Lesovedenie*, 2012, No. 3, pp. 51–58.
- Kazimirov N.I., Morozova R.M., *Biologicheskii krugovorot veshchestv v el'nikakh Karelii*, Leningrad: Nauka, 1973, 175 p.
- Kuhlman E.G., Decomposition of loblolly pine bark by soil- and root-inhabiting fungi, *Canadian Journal of Botany*, 1970, Vol. 48, No. 10, pp. 1787–1793.
- Kurnaev S.F., *Lesorastitel'noe raionirovanie SSSR* (Zoning of forest sites in the USSR), Moscow: Nauka, 1973, 203 p.

- Lambert M.J., *Inorganic constituents in wood and bark of New South Wales forest tree species*, Sydney: Forestry commission of New South Wales, 1981, 43 p.
- Lotova L.I., *Mikrostruktura kory osnovnykh lesoobrazuyushchikh listvennykh derev'ev i kustarnikov Vostochnoi Evropy* (Microstructure of bark of the main forest-forming leaved trees and shrubs in Eastern Europe), Moscow: KMK, 1999, 114 p.
- Ludley K.E., Robinson C.H., Jickells S., Chamberlain P.M., Whitaker J., Differential response of ectomycorrhizal and saprotrophic fungal mycelium from coniferous forest soils to selected monoterpenes, *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, Vol. 40, No. 3, pp. 669–678.
- Lukina N.V., Orlova M.A., Steinnes E., Artemkina N.A., Gorbacheva T.T., Smirnov V.E., Belova E.A., Mass-loss rates from decomposition of plant residues in spruce forests near the northern tree line subject to strong air pollution, *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, Vol. 24, No. 24, pp. 19874–19887.
- Murzaeva M.K., Osobennosti mikroklimata na lesoskakh razlichnykh sposobov rubok (Microclimatic features on cuttings of various types), In: *Lesy Urala i khozyaistvo v nikh* (Woodlands of Urals and the forestry), Sverdlovsk: Sredne-Ural'skoe knizhnoe izd-vo, 1970, Vol. 11, pp. 73–77 (172 p.).
- Orlova M.A., Lukina N.V., Smirnov V.E., Artemkina N.A., The influence of spruce on acidity and nutrient content in soils of Northern Taiga dwarf shrub–green moss spruce forests, *Eurasian soil science*, 2016, Vol. 49, No. 11, pp. 1276–1287.
- Ostroschenko V.V., *Kratkii slovar' osnovnykh lesovodstvenno-ekonomicheskikh terminov* (Short dictionary of the basic forestry economic terms), Ussuriysk: Izd-vo PGSKhA, 2005, 161 p.
- Palviainen M., Finér L., Laiho R., Shorohova E., Kapitsa E., Vanha-Majamaa I., Carbon and nitrogen release from decomposing Scots pine, Norway spruce and silver birch stumps, *Forest Ecology and Management*, 2010, Vol. 259, No. 3, pp. 390–398.
- Parameswaran N., Wilhelm G.E., Liese W., Ultrastructural aspects of beech bark degradation by fungi, *European Journal of Forest Pathology*, 1976, Vol. 6, No. 5, pp. 274–286.
- Poluboyarinov O.I., *Plotnost' drevesiny* (The density of wood), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1976, 159 p.
- Poluboyarinov O.I., Sorokin A.M., Fizicheskie svoystva osnovnoi kory i ee komponentov (Physical features of pine bark and its components), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, 1997, No. 3, pp. 70–74.
- Pozdnyakov L.K., Shcherbakov N.M., Zhabchenko S.S., Kulikova V.K., *Lesnye rastitel'nye resursy Karelii* (Resources of forest plants of Karelia), Petrozavodsk: Karel'skii filial AN SSSR, 1974, 136 p.
- Prokushkin S.G., Prokushkin A.S., Sorokin N.D., The intensity of phytodetrite decomposition in larch forest of the permafrost zone in Central Siberia, *Biology Bulletin*, 2014, Vol. 41, No. 1, pp. 89–97.
- Rozhkov A.S., *Anatomicheskie, gistokhimicheskie i biologicheskie preobrazovaniya u listvenitsy pri povrezhdenii nasekomyimi* (Anatomical, histological and biological transformations of larch from insect injuries), Irkutsk: Izd-vo SIFIBR SO RAN, 1972, 125 p.
- Rypáček V., *Biologie dřevokazných hub*, Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1967, 276 p.
- Sawidis T., Breuste J., Mitrovic M., Pavlovic P., Tsigaridas K., Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities, *Environmental Pollution*, 2011, Vol. 159, No. 12, pp. 3560–3570.
- Shorohova E., Kapitsa E., Influence of the substrate and ecosystem attributes on the decomposition rates of coarse woody debris in European boreal forests, *Forest Ecology and Management*, 2014, Vol. 315, No. 1, pp. 173–184.
- Shorohova E., Kapitsa E., Vanha-Majamaa I., Decomposition of stumps 10 years after partial and complete harvesting in a southern boreal forest in Finland, *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, Vol. 38, No. 9, pp. 2414–2421.
- Shorohova E., Kapitsa E., Vanha-Majamaa I., Decomposition of stumps in a chronosequence after clear-felling vs. clear-felling with prescribed burning in a southern boreal forest in Finland, *Forest Ecology and Management*, 2008, Vol. 255, No. 10, pp. 3606–3612.
- Shorohova E.V., Kapitsa E.A., Fragmentatsiya i razlozhenie elovoi kory v lesakh yuzhnoi i srednei taigi (Fragmentation and decomposition of spruce bark in the southern and middle taiga), *Lesovedenie*, 2007, No. 5, pp. 22–26.
- Shorokhova E.V., Shorokhov A.A., Kharakteristika klassov razlozheniya drevesnogo detrita eli, berezy i osiny v el'nikakh podzony srednei taigi (Features of the woody debris decomposition classes of spruce, birch and aspen in spruce forests of subdomain of middle taiga), *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva*, 1999, No. 1, pp. 17–23.
- Solomatova E.A., Pochvy elovykh lesov Vostochnoi Fennoskandii (Soils of spruce forests in eastern Fennoscandia), In: *Ekologiya i geografiya pochv (Ecology and geography of soils)* Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2009, pp. 66–90.
- Ståhl G., Ringvall A., Fridman J., Assessment of coarse woody debris – a methodological overview, In: *Ecology of woody debris in boreal forests* Lund: Wiley-Blackwell, 2001, pp. 137–149 (280 p.).
- Tarasov M.E., Birdsey R.A., Decay rate and potential storage of coarse woody debris in Leningrad region, In: *Ecology of woody debris in boreal forests* Lund: Wiley-Blackwell, 2001, pp. 137–149 (280 p.).
- Werkelin J., Lindberg D., Boström D., Skrifvars B.-J., Hupa M., Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples, *Biomass and Bioenergy*, 2011, Vol. 35, No. 1, pp. 725–733.
- Wilhelm G.E., Über die Zersetzung von Buchen- und Fichtenrinde unter natürlichen Bedingungen¹, *European Journal of Forest Pathology*, 1976, Vol. 6, No. 2, pp. 80–91.