

УДК 630*114.35:630*181.32(470.22)

РАЗЛОЖЕНИЕ ОПАДА ХВОИ В ПОЧВАХ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР СОСНЫ ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ

© 2022 г. О. Н. Бахмет^а*, М. В. Медведева^б

^аОтдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН,
ул. Пушкинская, д. 11, Петрозаводск, Республика Карелия, 185910 Россия

^бИнститут леса КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, Петрозаводск, Республика Карелия, 185910 Россия

*E-mail: bachmet@mail.ru

Поступила в редакцию 26.10.2021 г.

После доработки 02.12.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Исследования проведены на территории Восточной Фенноскандии, почвы представлены подзолами иллювиально-железистыми песчаными (Podzols). В работе рассмотрены данные по деструкции опада хвои сосны в почвах, находящихся на различных стадиях искусственного лесовосстановления (свежая вырубка, культуры сосны 7-, 15- и 40-летнего возраста). В качестве контроля выбран сосняк брусничный 170-летний, произрастающий на заповедной территории. Исследована эффективность разложения опада хвои сосны в модельном полевом эксперименте, изучено изменение содержания химических элементов, а также биохимических показателей в процессе его минерализации в почве. Проведена оценка эколого-трофической структуры микробного сообщества почв изучаемых экосистем. Установлено, что наибольшие изменения процесса трансформации органического вещества происходят в почвах, находящихся на ранних стадиях лесовосстановления. В почвах, сформировавшихся под культурами сосны более 15 лет, интенсивность минерализационных процессов и содержание трудногидролизуемых элементов снижается, а при достижении 40 лет становится характерной для почв ненарушенных лесных сообществ. Изменения содержания химических элементов отмечено в опаде сосны, экспонированной в почве. Полученные данные можно использовать при мониторинге природной среды.

Ключевые слова: среднетаежная подзона Карелии, свойства почв, культуры сосны, ненарушенные лесные экосистемы, трансформация органического вещества.

DOI: 10.31857/S0024114822030032

В настоящее время бессистемные рубки лесов привели к снижению их природоохранного потенциала, прогрессирующему и преждевременному истощению. Как известно, влияние рубки древостоя на лесное сообщество многофакторное. Изменение гидротермического и трофического режимов вырубаемых лесов приводит к нарушению природного потенциала биосистемы, круговорота питательных веществ, сводит на нет выполнение главной ее функции — биосферной. Одним из действенных способов восстановления лесов, подвергнутых рубке, является создание культур хвойных деревьев. В искусственных экосистемах возможно создание определенной фитоценотической структуры, формирование консортивных связей в лесном сообществе с заранее заданными свойствами (Бабиц, Клевцов, 2012; Бабиц, 2013). Это в конечном итоге позволяет планировать продукционную способность руко-творного древостоя. При этом важно отметить, что принцип неистощимого природопользова-

ния предполагает не только охрану и защиту объектов природы, но и их восстановление.

Как известно, при проведении лесохозяйственных работ происходит изменение различных компонентов экосистемы, в том числе и почв (Дымов и др., 2012). Установлено изменение свойств почв в условиях искусственного лесовозобновления (Бескорвайная и др., 2010; Федоренко и др., 2016). В связи с изменением свойств почв в процессе лесохозяйственного использования возможно изменение природных ритмов поступления-минерализации органического вещества. Как известно, процесс разложения органического вещества в почве зависит от природно-климатических условий. В таежной зоне процесс разложения идет медленнее, чем в более теплых областях (Zhang et al., 2006). Также существует зависимость от влажности почв, поступающих осадков, температуры (Vauramo, Setälä, 2011). Процесс трансформации органического вещества определяется временем экспозиции опада: мак-

симальное разложение отмечено в начальные сроки, затем скорость превращения снижается (Jennifer S. Powers et al., 2009). Продукты разложения опада сосны могут быть основным источником дисперсного органического вещества (Семенов и др., 2019), которое определяет ее плодородие.

Велика роль почвенной биоты в процессах трансформации органического вещества (Dickenson, Pugh, 1974). Методом изоляции микрокосм установлена роль нематод и коллембол в данном процессе (Kotilainen et al., 2004). Микроорганизмы, осуществляя деградацию растительного опада в почве, донируют метаболиты-предшественники стабильного органического вещества почв, способствуя агрегации и прочному химическому связыванию с минеральной почвенной матрицей (Cotrufo et al., 2013). При этом отмечается, что данный процесс приводит к формированию лабильных и стабильных компонентов органического вещества. Последний может быть представлен лигнином, скорость минерализации которого очень низкая (Лопес де Гереню и др., 2021). Он может оказывать каталитическое/ингибирующее влияние на круговорот углерода в экосистеме (Austin, Ballarín, 2010).

Деградация органического вещества в почве зависит от содержания азота (Berg, 2000; Ларионова и др., 2017). В процессе разложения изменяется соотношение биофильных элементов: C/P, C/N и N/P, поэтому их можно использовать для диагностики этого процесса (Хуе-Фенг et al., 2008). Скорость высвобождения серы, фосфора зависит от вида опада, микробиологической активности (McGill, Cole, 1981). Процессы высвобождения C, P, Cu, Ca и K в процессе разложения опада зависят от содержания фосфора (Qualls, Richardson, 2000).

Несмотря на то, что много данных по вопросу биологии разложения растительных остатков в почвах ненарушенных лесных экосистем, необходимо дальнейшее развитие методологии оценки процесса разложения для антропогенно нарушенных почв. Последнее даст правильное представление о направленности почвообразовательного процесса, а также позволит корректно интерпретировать информацию, проводить сравнительный анализ данного процесса в различных условиях фитоценотической среды, возможность создания единой мировой базы данных (Krishnal, 2017). В этой связи целью настоящих исследований было изучение динамики разложения опада сосны в почвах хронологического ряда восстановления лесной экосистемы.

Данная работа имеет общетеоретическое и практическое значение, так как позволяет решить проблему изучения трансформации органического вещества как целенаправленное замедление/ускорение процесса почвовосстановления

под действием лесохозяйственных мероприятий. Полученные данные могут стать основой при создании математической модели круговорота элементов. Также полученные результаты можно использовать при проведении лесохозяйственных работ, оценке экологического потенциала территории, в создании экологического паспорта фитокомплекса. Последнее, как известно, является актуальным в связи с проведением глобальной инвентаризацией лесов бореальной зоны Восточной Фенноскандии (Бореальные леса ..., 2017).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили в среднетаежной подзоне Карелии (62°16' с.ш. и 33°59' в.д.). Изучение состояния почв хронологического ряда лесовосстановления выполнены на пяти пробных площадях (ПП). Особенностью данной работы было соблюдение принципа "выравниваемости" экологических условий, в которых идет формирование почв: единообразия климата, позиций в ландшафте, почвообразующих пород, фитоценоза, рельефа местности. Только соблюдая данное условие можно провести комплексный анализ почв, использовать полученные данные для практических целей.

Почвы, выбранные для исследования, подзолы иллювиально-железистые (Podzols), широко распространены на территории Восточной Фенноскандии (Морозова, 1991). Почвы альфе-гумусового генезиса имеют хорошо дифференцированный профиль, в котором выделяют горизонты О (лесная подстилка), Е (подзолистый горизонт), В (иллювиальный), С (песчаные флювиогляциальные отложения).

При изучении деструкционных процессов особый интерес представляют контрастные экологические условия почвообразования: свежая вырубка — 7 лет—15 лет—40 лет—170 лет. ПП 1 представляет свежую вырубку после проведения сплошной рубки соснового древостоя. Почва — антропогенно нарушенный подзол иллювиально-железистый песчаный, имеет следующее морфологическое строение: Oantr(0—1 см)—Eantr(1—4 см)—BF(4—20 см)—B2(20—57 см)—BC(57—92 см)—C(92 см и далее). Изменение морфологического строения почв выражается во фрагментарном развитии подстилки небольшой мощности. Вследствие действия лесозаготовительной техники в отдельных местах она содрана, поэтому обнажения минеральной толщи прослеживаются повсеместно. Многочисленные вдавления верхних горизонтов почв в нижние, перемешивания, возникающие на фоне действия лесозаготовительной техники, хорошо диагностируются на данном участке. Также можно отметить древесную ветошь, состоящую из опилок, сучьев, веток, лежащую на поверхности почв. Это создает большую пространствен-

ную неоднородность условий, в которых идет формирование почв.

ПП 2 — это участок с культурами сосны 7-летнего возраста. Почва — подзол иллювиально-железистый песчаный, имеет следующее морфологическое строение: О(0–2 см)—Е(2–4 см)—BF(4–14 см)—B2(14–22 см)—BC(22–85 см)—C(85 см и далее). Вследствие изменения качественного состава поступающего в экосистему опада растений — доминирования многолетних трав — ведущими почвообразовательными процессами на данном этапе развития почв становятся дерновый и подзолообразовательный. Последний не выражен, подзолообразовательный процесс носит фрагментарный характер.

ПП 3 — это участок с культурами сосны 15-летнего возраста. Почва — подзол иллювиально-железистый песчаный, имеет следующее морфологическое строение: О(0–3 см)—Е(3–5 см)—BF(5–18 см)—B2(18–60 см)—BC(60–90 см)—C(90 см и далее). На данном этапе формирования древостоя происходит сомкнутость крон сосны, которая создает предпосылки для быстрого восстановления верхнего органогенного горизонта (О). Лесная подстилка хорошо дифференцируется на отдельные подгоризонты (OL и OFH), что является характерным для ненарушенных почв данного типа. Кислотообразуемые продукты минерализации мортмассы, образованной опадом сосны и растений жестколистных кустарничков, древесной ветошью, обуславливают интенсивно идущий подзолообразовательный процесс.

ПП 4 представляет собой участок, на котором произрастают культуры сосны 40 лет. Для данного этапа развития соснового насаждения является характерным усложнение структуры растений на почвенного покрова. Оно выражается в формировании растительных микрогруппировок, характерных для ненарушенного лесного комплекса. Почва — подзол иллювиально-железистый песчаный, имеет следующее морфологическое строение: О(1–4 см)—Е(4–7 см)—BF(7–23 см)—B2(23–57 см)—BC(57–88 см)—C(88 см и далее). Для почв является характерным увеличение мощности горизонтов, накопление собственно органического вещества в иллювиальной толще. Вследствие роста древостоя корнеобитаемая зона становится глубже, более упорядоченной становится и корневая система растений, траектория дальнейшего развития всего древостоя уже прогнозируема.

В качестве контроля была выбрана ПП 5, расположенная на заповедной территории, не испытывающая антропогенного воздействия. Почвы заповедника “Кивач” могут быть эталоном при проведении работ в области лесовосстановления, создании балансовых моделей круговорота вещества в экосистеме, прогностическом мониторинге природной среды. Почва, характеризующая

ненарушенный сосняк брусничный, относится к подзолу иллювиально-железистому песчаному. Строение ее профиля может быть представлено как О(0–5 см)—Е(5–8 см)—BF(8–29 см)—B2(29–52 см)—BC(52–100 см)—C(100 см и далее). В сосняке черничном 170-летнего возраста ведущими почвообразовательными процессам являются подстилконоакпление, подзолообразование, иллювиирование. Горизонты хорошо выражены, более однородны, морфометрические и физико-химические свойства почв более контрастны, что свидетельствует о сформированном почвенном профиле, характерном для зрелых лесных сообществ.

Для характеристики микробного сообщества почв, подвергнутых лесохозяйственным мероприятиям, на каждой пробной площади проводили отбор почв из верхнего генетического горизонта почв — лесной подстилки. Эколого-трофическую структуру микробного сообщества определяли методом предельных разведений с последующим высевом почвенных суспензий на селективные питательные среды согласно традиционным в почвенной микробиологии методике (Методы ..., 1987). Подсчет колоний микроорганизмов проводили на анализаторе колоний Scan 100 (France).

Эффективность разложения опада хвои сосны определяли методом “сетчатых мешочков” (Карпачевский и др., 1980; Германова, Медведева, 2010). Для эксперимента использовали опад хвои сосны, отобранный в конце вегетации растений. Отобранный растительный материал высушивали до постоянной массы при температуре 40°C. Мешочки с высушенным растительным материалом помещали между верхним слоем опада и подстилкой в межкрупном пространстве древостоя. Повторность выполнения опыта 9-кратная. Время экспозиции опыта составило 1 год. В лабораторных условиях по окончании эксперимента образцы высушивали до постоянной массы при 40°C и взвешивали. В качестве критерия интенсивности разложения использовали убыль массы опада хвои сосны. Минерализационные потери в процессе разложения остатков растений оценивали по изменению содержания химических элементов в разлагающемся материале с последующим пересчетом к исходному количеству. Опыт по годичному разложению остатков хвои сосны в этих насаждениях проводился впервые.

В исходном и экспонируемом в почве опаде хвои сосны устанавливали следующие показатели. Зольность определяли согласно прописям (Аринюшкина, 1970), содержание общего азота и углерода определяли на CNH-анализаторе. Валовое содержание макро- (Ca, Mg, P, K) и микро-элементов (Ni, Cu, Zn, Fe) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (спектрофотометр AA-7000, Shimadzu, Япония). Биохими-

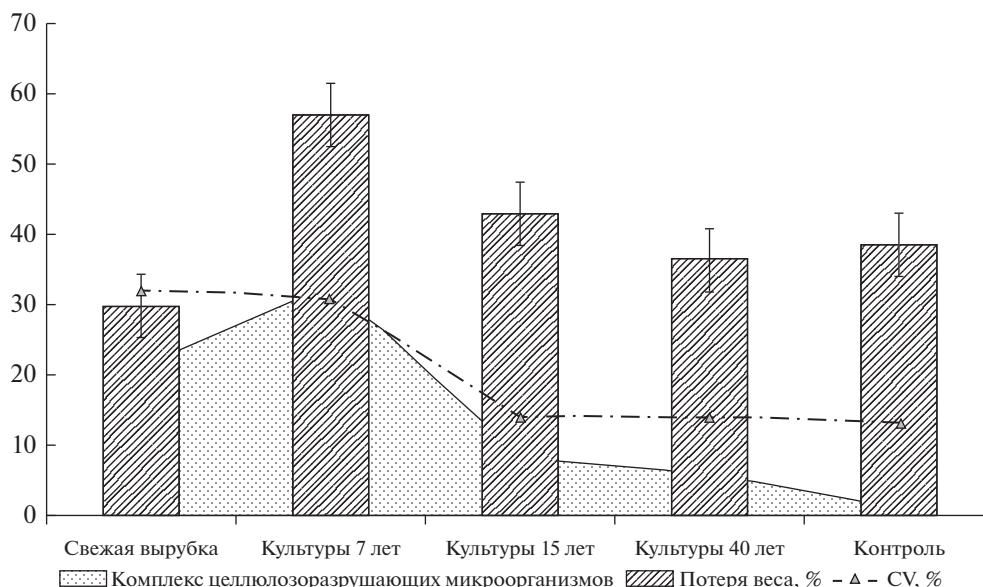


Рис. 1. Изменение численности целлюлозоразрушающих микроорганизмов (тыс. КОЕ/г почвы) в почве и эффективности разложения опада сосны (%), коэффициента вариации (CV) данного показателя в процессе его годичной экспозиции в почве в условиях искусственного лесовосстановления.

ческий состав органического вещества проводили по методике Н.И. Ястрембовича и Ф.Л. Калинина (Ястрембович, Калинин, 1962) в модификации Г.И. Софроновой с соавторами (Софронова и др., 1978). Содержание углеводов пересчитывалось в абсолютно сухое беззольное вещество.

Данные были получены с использованием оборудования ЦКП “Аналитическая лаборатория” ИЛ КарНЦ РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность разложения опада сосны, инкубируемого в почве. Результаты показали, что исследуемые показатели имеют отличия на каждом участке, что связано с влиянием антропогенного воздействия на свойства почв, древостой. Динамика разложения опада хвои сосны и высвобождение элементов питания связаны с накоплением их в процессе роста древостоя и работой микробиоты, осуществляющей процессы трансформации органического вещества. Низкая скорость минерализации опада (<30%) в почвах на участке с полным удалением древостоя, высокий коэффициент вариации (>50%) изучаемого параметра свидетельствуют о резком изменении почвенно-химической обстановки для подстилочных деструкторов, контрастности микроусловий микропроцессов (рис. 1). Как известно, велико влияние лесозаготовительной техники на свойства почв. Сдирание лесной подстилки, обнажение минеральной толщи, формирование турбированных горизонтов почв, а также многочисленные порубочные остатки, вывалы пней и пневый

осмол — вот не полный перечень негативных изменений, которые происходят в почве на фоне стопроцентной вырубке древостоя. Все это “отбрасывает” лесную экосистему назад, создает пессимальные местообитания для биотического блока биогеоценоза и, в конечном итоге, тормозит восстановление свойств почв, формирование природного баланса элементов (Bakhmet, Medvedeva, 2015).

Наиболее высокая скорость минерализации хвойного опада происходит в почвах, сформировавшихся под 7-летними и 15-летними культурами сосны, составляющая 55 и 42% соответственно. “Мягкий” сосновый опад молодого древостоя создает благоприятные трофические условия обитания для зимогенной микробиоты. При этом коэффициент вариации данного показателя довольно высокий (до 55%) на данных участках, что свидетельствует о гетерогенности педоусловий в результате антропогенного воздействия. В почвах, сформировавшихся под 15- и 40-летними культурами сосны и контролем, скорость минерализации опада сосны низкая и составляет <40%. При этом коэффициент вариации данного показателя не высокий, что в целом отражает восстановление педоусловий.

Необходимо также подчеркнуть, что сукцессия растений напочвенного покрова и почв при снятии антропогенного воздействия может проходить в несколько стадий. Первая стадия характеризуется доминированием мертвopoкpoвнoй ассоциаций с фрагментами хвойного опада (свежая вырубка), большой гетерогенностью эдафи-

Таблица 1. Интенсивность высвобождения азота и зольных элементов из опада сосны в процессе его минерализации в почве

Свежий опад, %					Изменение при разложении, % от исходного содержания				
Зольность	С	N	P	K	Зольность	С	N	P	K
Контрольный участок, Сосняк брусничный, пр.пл. 5									
3.58	44.88	0.71	0.14	0.02	120.4	88.3	101.4	128.6	211.1
Свежая вырубка, пр.пл. 1									
3.65	54.6	0.79	0.10	0.07	106.6	84.0	70.9	210.0	185.7
Культуры сосны 7 лет, пр.пл. 2									
1.32	42.16	1.24	0.17	0.15	175.7	98.1	97.6	94.1	206.7
Культуры сосны 15 лет, пр.пл. 3									
1.18	41.20	1.14	0.16	0.12	139.0	99.9	86.0	106.3	275.0
Культуры сосны 40 лет, пр.пл. 4									
1.52	42.21	0.81	0.14	0.08	134.2	96.4	139.5	157.1	325.0

ческих условий. Вторая стадия характеризуется развитием многолетних трав, которые формируют задерненную лесную подстилку (7-летние культуры сосны). На третьей стадии происходит сомкнутость крон сосновых деревьев, затемнение под пологом леса, изменение природной среды. Именно на данной стадии эволюции экосистемы начинает активно формироваться лесная подстилка (15- и 40-летние культуры сосны). В целом, по мере формирования древостоя, круговорот элементов питания растений становится более сбалансированным, трофические связи более «упорядоченными», детритная пищевая цепь укорачивается, древостой переходит в фазу климаксового. В данной фазе развития лесной экосистемы гумусное состояние почв можно охарактеризовать как «зрелое», буферное действие пула углеводов может обеспечивать формирование депо органического вещества.

Изменение содержания элементов питания в опаде сосны инкубируемого в почве. Интенсивность высвобождения азота и зольных элементов из опада сосны в процессе его минерализации в почве представлено в табл. 1. В целом необходимо отметить низкую зольность (до 4%), содержание NPK в опаде сосны. Это является характерным для опада хвойных деревьев, адаптированных к неблагоприятным условиям. Содержание С в опаде высокое и составляет до 55%, однако он входит в состав трудногидролизующих углеводов, минерализация которых в почвах заторможена.

Содержание микроэлементов (Fe, Cu, Zn, Ni), щелочноземельных металлов в исследуемом опаде сосны низкое (табл. 2).

Как известно, почвообразующие породы Карелии бедны по содержанию щелочных и щелочноземельных металлов. Это находит отражение в

химическом составе опада хвойных деревьев, содержание которых низкое, что подтверждает генетическую связь различных компонентов, слагающих биогеоценоз. На фоне антропогенного воздействия нарушается рециклирование элементов, однако оно восстанавливается до природного по мере развития древостоя. Содержание золы в опаде древостоя старше 40 лет более высокое по сравнению с молодыми деревьями. Тенденция снижения в содержании изучаемых биогенных элементов (С, N, P, K) в опаде сосны четко прослеживается в ряду 7 лет > 15 лет > 40 лет > > 170 лет = свежая вырубка. При этом химический состав опада отражает общий план строения древостоя: наибольшее содержание элементов отмечено в опаде молодого леса, в более старовозрастных насаждениях содержание биогенных веществ снижается.

При лесовосстановительных мероприятиях прослеживаются закономерные тенденции изменения в содержании отдельных химических элементов в процессе минерализации опада сосны. Прежде всего отмечается возрастание зольности, что связано с резкой потерей органической массы в процессе его минерализации. Быстрое высвобождение беззольной части опада происходит под действием гидролитических ферментов, активность которых в лесных подстилках высокая. При этом наибольшие показатели отмечали на участках 7- и 20-летнего древостоев. Высвобождение углерода из опада сосны происходит медленно, что связано с его участием в формировании структуры хвои, образованием волокон, трудногидролизующих соединений. Отмечается уменьшение в содержании углерода в опаде сосны, экспонируемого в почве контрольного участка. Наибольшие потери фосфора произошли на участках 7 и 15-летних культур. В отношении калия замет-

Таблица 2. Интенсивность высвобождения макро- и микроэлементов из опада в процессе его годовичного разложения в почве

Свежий опад, мг/кг						Изменение при разложении, % от исходного содержания					
Cu	Zn	Ni	Fe	Ca	Mg	Cu	Zn	Ni	Fe	Ca	Mg
Контрольный участок, Сосняк брусничный, пр.пл. 5											
2.62	65.2	1.19	51.5	5000	627	153.05	57.1	334.5	132.4	71.3	60.8
Свежая вырубка, пр.пл. 1											
2.58	54.6	1.21	92.5	5270	486	142.3	67.0	332.2	101.9	106.6	111.9
Культуры сосны 7 лет, пр.пл. 2											
3.71	32.1	1.92	92.3	2218	366	71.70	100.3	91.7	66.2	64.1	78.7
Культуры сосны 15 лет, пр.пл. 3											
3.21	28.2	0.91	64.8	1826	455	79.13	103.5	118.7	83.6	88.7	66.4
Культуры сосны 40 лет, пр.пл. 4											
3.61	41.2	0.94	72.4	2150	318	78.12	63.3	193.6	88.6	80.2	107.2

ного различия на отдельных участках не выявили, что связано с его высокой миграционной способностью, участием в почвообразующих процессах. Интересно отметить, что содержание всех исследуемых элементов в опаде, экспонируемом в почве, высокое в 40-летнем сосняке. Возможно, что именно на этой стадии происходит переход древостоя в состояние “стабилизации”, сомкнутость крон хвойных деревьев, изменение условий их произрастания. Доминирующие деревья становятся “дирижерами” развития микроорганизмов, определяя стратегию их развития. На более поздних этапах восстановительной сукцессии соснового древостоя интенсивность высвобождения элементов при минерализации опада имеет более однотипный характер, меньше зависит от пула элементов питания, а следовательно, более устойчив к неблагоприятным факторам среды. В этот период сложились темп и ритм высвобождения элементов, свойственные естественным фитоценозам.

Важным показателем направленности трансформации органического вещества в опаде является соотношение биофильных элементов C/N, C/P. Результаты показали, что в опаде сосны значение отношения C/N, C/P было наиболее благоприятным на участках 7- и 15-летних культур, составляющее 35, 250 соответственно. В опаде деревьев 40 лет и свежей вырубке это соотношение было больше 50 и 300 соответственно.

В опаде, экспонируемом в почве, произошло изменение показателя C/N, C/P, что свидетельствует об активном участии элементов в круговороте веществ, постсинтетических процессах. При этом оптимальные значения данных показателей для подстилочных деструкторов отмечали на участках с 7- и 15-летними культурами сосны, что подтверждало вышесказанное об интенсивно происходящих процессах минерализации органического вещества на данных участках.

Изменение в содержании макро- и микроэлементов в опаде сосны, инкубируемом в почве, представлено в табл. 2. Как видно из приведенных результатов, содержание исследуемых элементов в опаде низкое, четкого различия на отдельных участках не отмечали. Тенденция возрастания щелочных элементов Ca, Mg в опаде хвои старовозрастных деревьев прослеживается, что может быть связано с дефицитом фосфора, отмеченным выше. Также отмечали возрастание цинка в опаде сосны по мере увеличения возраста растений.

По мере минерализации опада в почве содержание химических элементов становится другим. Наиболее высокие показатели отмечены в опаде сосны, инкубируемом в свежей вырубке, что обусловлено интенсивным вовлечением их в процессы почвообразования. Установили возрастание меди, никеля, железа в опаде сосны, инкубируемом в почвах старовозрастных древостоев и свежей вырубке.

Динамика изменения биохимических показателей в процессе разложения опада сосны в почве. В изучаемом хронологическом ряду лесовосстановления происходит закономерное с точки зрения сукцессии соснового древостоя изменение в содержании растворимых углеводов, крахмала, гемицеллюлозы и целлюлозы (табл. 3).

Максимальное содержание водорастворимых сахаров, крахмала отмечено в опаде сосны 7-летних культур. Высокое содержание лабильных гемицеллюлоз также выявили на данном участке. Снижение стабильной фракции гемицеллюлозы и целлюлозы было ниже по сравнению с контролем, изменение фракционного состава полисахаридов также выявили. При этом необходимо отметить, что численность и активность целлюлолитических микроорганизмов, относящихся к к-стратегам, здесь наиболее высокая. Однако это не

Таблица 3. Содержание углеводов в опаде хвои сосны, инкубируемой в почве хронологического ряда вырубок

Растворимые углеводы					Крахмал	Гемицеллюлоза		Сумма углеводов	Целлюлоза
моносахариды		дисахариды	олигосахариды	сумма		лабильная	стабильная		
глюкоза	фруктоза								
Контрольный участок, Сосняк брусничный, пр.пл. 5									
$\frac{0.72}{15.28}$	Не обн.	$\frac{5.01}{36.53}$	$\frac{1.82}{26.37}$	$\frac{7.55}{32.05}$	$\frac{1.18}{34.75}$	$\frac{5.3}{61.13}$	$\frac{35.8}{59.25}$	$\frac{49.83}{54.75}$	$\frac{19.61}{57.32}$
Свежая вырубка, пр.пл. 1									
$\frac{0.44}{100}$	Не обн.	$\frac{4.02}{52.99}$	$\frac{1.41}{58.16}$	$\frac{5.87}{50.26}$	$\frac{1.22}{66.39}$	$\frac{4.8}{67.50}$	$\frac{37.6}{56.25}$	$\frac{49.49}{56.88}$	$\frac{18.21}{61.72}$
Культуры сосны 7 лет, пр.пл. 2									
$\frac{0.98}{100}$	$\frac{0.72}{100}$	$\frac{8.14}{8.85}$	$\frac{3.22}{11.18}$	$\frac{12.34}{8.75}$	$\frac{6.45}{100}$	$\frac{14.2}{95.92}$	$\frac{26.1}{71.34}$	$\frac{59.81}{55.71}$	$\frac{8.81}{47.79}$
Культуры сосны 15 лет, пр.пл. 3									
$\frac{0.62}{11.29}$	$\frac{0.63}{100}$	$\frac{3.25}{28.31}$	$\frac{1.92}{100}$	$\frac{5.79}{17.10}$	$\frac{1.39}{100}$	$\frac{7.7}{71.17}$	$\frac{34.4}{93.66}$	$\frac{49.91}{77.52}$	$\frac{13.64}{62.46}$
Культуры сосны 40 лет, пр.пл. 4									
$\frac{0.70}{11.43}$	Не обн.	$\frac{4.01}{36.16}$	$\frac{1.78}{34.83}$	$\frac{6.49}{33.13}$	$\frac{1.42}{22.54}$	$\frac{4.8}{55.21}$	$\frac{38.2}{83.32}$	$\frac{50.91}{72.58}$	$\frac{23.83}{68.07}$

В числителе — исходное содержание углеводов в хвое сосны, в знаменателе — процент от исходного содержания

противоречит полученным данным, а напротив, еще раз подтверждает дублированность процессов трансформации органического вещества в почве, а также улучшение азотного питания микроорганизмов (Звягинцев, 1987). Как известно, не все участники целлюлозолитического комплекса способны осуществлять гидролиз целлюлозы. Трансформация целлюлозы происходит при активном потреблении азота, что усиливает конкуренцию за субстрат не только со стороны микроорганизмов гидролитического комплекса, но и корнями растений, осваивающими новую территорию.

Скорость минерализации углеводов в опаде сосны в исследуемых древостоях не одинакова. На участке, подвергнутом 100-процентному удалению древостоя, не выявили замедление процессов утилизации гомо- и гетерополисахаридов, несмотря на резкое изменение педохимических условий. Нивелирование негативного влияния на первом этапе происходит, возможно, за счет большего прогрева почв при удалении деревьев, порубочные остатки и корневой опад способствуют развитию микроорганизмов, осуществляющих более глубокую минерализацию органического вещества. Высокую скорость превращения растворимых углеводов, крахмала выявили в опаде сосны, экспонируемого в почвах, сформировавшихся под молодыми 7-летними культурами сосны. Это, возможно, связано с “эффектом последствия” оставленных в почве гниющих дре-

весных остатков, многочисленные потеки органической массы которых обнаруживали повсеместно в почве.

Результаты микробиологических исследований показали, что диапазон численности микроорганизмов не выходит за границы природной вариабельности, характерной для микробных сообществ почв данной природно-климатической зоны (рис. 2). Присутствуют все важнейшие эколого-трофические группы в микробоценозе: гидролитики, олиготрофы, копитрофы. Заметное снижение их численности на наиболее нарушенных участках диагностирует увеличение степени вовлечения гумуса в круговорот веществ, его минерализацию. Можно отметить что, несмотря на изменение условий их существования, они способны к мобилизации энергетических ресурсов для синтеза прогумусовых веществ, осуществлять трансформацию органических и минеральных соединений, поддерживая гомеостаз всей экосистемы. Однако на данном этапе развития фитоценоза острая конкуренция за субстрат со стороны микроорганизмов может привести к резкому снижению жизнеспособного состояния хвойных деревьев, снижению их продуктивности, ослаблению, поэтому необходим мониторинг, проведение лесохозяйственных мероприятий, направленных на оптимизацию их состояния. Последнее имеет большое значение для формирования устойчивости всего биогеоценоза.

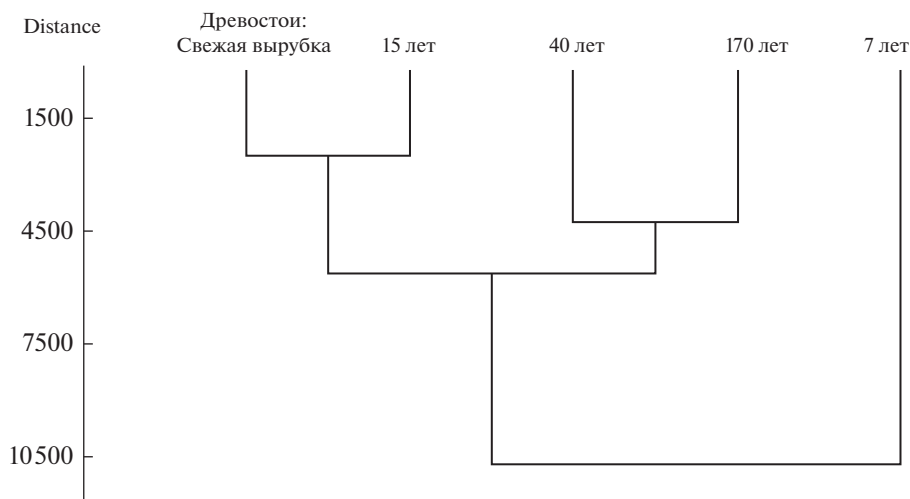


Рис. 2. Изменение микробиально-биохимических показателей в пространстве факторов среды.

Математико-статистический анализ выполненный на основе кластерного анализа показал, что деструкция хвойного опада зависит от стадии восстановления экосистемы (рис. 3). Наиболее выраженные изменения микробиально-биохимических свойств почв наблюдаются на участках 7-летней вырубке, тенденция однонаправленных изменений на свежей и 15-летней вырубке прослеживается. Вырубки 40- и 170-летние имеют также сходные эдафические условия, что подтверждает высказанное о стабилизации экосистемы и переход в устойчивое состояние древостоя с 40 лет. Разложение опада сосны идет менее интенсивно именно на участках, где произрастает данный древостой.

В целом конвергенция процесса трансформации органического вещества в почвах антропогенно трансформированных экосистем с ненарушенными почвами альфе-гумусового генезиса свидетельствует о возможном управлении их трофическим режимом. Это предполагает мероприятия по оптимизации состояния микробиоты для увеличения внутреннего потенциала лесной экосистемы, устойчивости к антропогенному воздействию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение свойств почв и происходящих в них процессов на фоне лесохозяйственных мероприятий приводит к нарушению темпа и направленности трансформации органического вещества. Наиболее выраженные изменения отмечаются в почвах, подвергшихся максимальному антропогенному воздействию — на свежей вырубке. Выявили снижение эффективности деструкции опада сосны, высвобождения элементов минерального питания, микробиологической активности

почв. По мере роста древостоя интенсивность минерализационных процессов увеличивается, достигая наибольших значений в почвах, сформировавшихся под 7-летними культурами сосны. В почвах, сформировавшихся под 15-летними культурами сосны, трансформация органической массы носит более устойчивый характер, отмечается стабилизация процессов выщелачивания макро- и микроэлементов. По прошествии 40 лет после вырубки древостоя интенсивность биотрансформации опада сосны и высвобождение элементов в процессе его минерализации в почвах замедляются и приобретают черты, характерные для почв нетронутых сосновых древостоев заповедных территорий. В связи с тем, что индикация состояния почв, находящихся в условиях искусственного облесения, может быть дана только на основании комплексных исследований, дальнейшая работа предполагает сопряженное изучение формирования гумусного состояния почв и состояния микроорганизмов, участвующих в этом процессе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Предоставленный материал был получен при выполнении государственного задания КарНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ариунушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 491 с.
- Бабич Н.А., Клевцов Д.Н. Запасы энергии в культурах сосны // Лесной вестник. 2012. № 1. С. 38–41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zapasy-energii-v-kulturah-sosny> (дата обращения: 29.11.2021)
- Бабич Н.А. Актуальные проблемы лесовосстановления на Европейском Севере России в рамках перехода к интенсивной модели ведения лесного хозяйства // Известия вузов. Лесной журн. 2013. № 2(332). С. 74–83.

- Безкоровайная И.Н., Антонов Г.И., Иванов В.В., Семейкин Д.А. Биологическая активность почв после сплошных рубок в сосняках Красноярской лесостепи // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. 27. № 3–4. С. 238–242.
- Бореальные леса: состояние, динамика, экосистемные услуги: тезисы докладов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 60-летию Института леса Карельского научного центра РАН. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 338 с.
- Германова Н.И., Медведева М.В. Учебно-методическое пособие по исследованию микробоценозов естественных и антропогенно нарушенных почв. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 64 с.
- Дымов А.А., Лантева Е.М., Милановский Е.Ю. Изменение почв и почвенного органического вещества в процессе естественного лесовозобновления после рубки сосняка бруснично-зеленомошного // Лесной вестник. 2012. С. 67–71.
- Звягинцев Д.Г. Почва и микроорганизмы. М.: МГУ, 1987. 256 с.
- Карпачевский Л.О., Воронин А.Д., Дмитриев Е.А., Строганова М.Н., Шоба С.А. Почвенно-биогеоценозические исследования в лесных биогеоценозах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 160 с.
- Ларионова А.А., Квиткина А.К., Быховец С.С., Лопес-де-Гереню В.О., Колягин Ю.Г., Каганов В.В. Влияние азота на минерализацию и гумификацию лесных опадов в модельном эксперименте // Лесоведение. 2017. № 2. С. 128–139.
- Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Галибина Н.А., Капица Е.А., Шорохова Е.В. Влияние температуры и минеральных добавок азота и фосфора на процессы разложения и состав почвенно-коровых субстратов // Почвоведение. 2021. № 1. С. 45–59.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21010081>
- Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: МГУ, 1987. 267 с.
- Морозова Р.М. Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 184 с.
- Семенов В.М., Паутова Н.Б., Лебедева Т.Н., Хромычкина Д.П., Семенова Н.А., Лопес де Гереню В.О. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве в модельном эксперименте // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1172–1184.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113>
- Софронова Г.И., Трубино Г.И., Шредерс С.М., Макаревский М.Ф. К методике количественного определения углеводов в вегетативных органах сосны обыкновенной // Физиолого-биохимические исследования сосны на Севере. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1978. С. 119–133.
- Федорец Н.Г., Солодовников А.Н., Ткаченко Ю.Н. Водно-физические и агрохимические показатели почв базисных питомников Карелии // Успехи современного естествознания. 2016. № 8. С. 139–144.
- Ястрембович Н.И., Калинин Ф.Л. Определение углеводов и растворимых соединений азота в одной навеске растительного материала // Науч. тр. Укр акад. с.-х. наук. 1962. Вып. 23. С. 119–126.
- Austin A., Ballaré C. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems // PNAS. 2010. V. 107. № 10. P. 4619–4622.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0909396107>
- Bakhmet O., Medvedeva M. Variations in soil properties upon artificial reforestation in Karelia // Contemporary Problems of Ecology. V. 8. № 7. 2015. P. 838–844.
<https://doi.org/10.1134/S1995425515070033>
- Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils // Forest Ecology and Management. 2000. № 133. P. 13–22.
- Cotrufo F., Soong J., Horton A., Campbe E., Haddix M., Wall D., Parton W. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss // Nature Geosciences. 2015. V. 8. P. 776–781.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2520>
- Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Denef K., Paul E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? Global Change Biology. 2013. V. 19. № 4. P. 988–995.
- Dickenson C.H., Pugh G.J.F. Biology of plant litter decomposition. United states Edition published by Academic press INC. London and N.Y. 1974. V. 1. 133 p.
- Powers J.S., Montgomery R., Adair E., Brearley F., DeWalt S., Castanho C., Chave J., Deinert E., Ganzhorn J., Gilbert M., González-Iturbe J., Bunyavejchewin S., Grau H.R., Harms K., Hiremath A., Iriarte-Vivar S., Manzane E., Oliveira A.A., Poorter L., Ramanamanjato J.-B., Carl Salk, Varela A., Weiblen G.D., Lerdau M.T. Decomposition in tropical forests: a pan-tropical study of the effects of litter type, litter placement and mesofaunal exclusion across a precipitation gradient // J. Ecology. 2009. V. 97. № 4. P. 801–811.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01515.x>
- Kotilainen T., Setälä H., Alatalo I., Vuorisalo T., Saloniemi I. Impacts of chitinase-transformed silver birch on leaf decomposition and soil organism. // European J. Soil Biology. 2004. № 40. P. 155–161.
<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2005.03.001>
- Krishnal M. Litter decomposition in forest ecosystems: a review // Energy, Ecology and Environment. 2017. № 2(4). P. 236–249.
<https://doi.org/10.1007/s40974-017-0064-9>
- McGill W.B., Cole C.V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S, and P through soil organic matter // Geoderma. 1981. V. 26. P. 267–286.
- Qualls R., Richardson C. Phosphorus enrichment affects litter decomposition, immobilization and soil microbial phosphorus in wetland mesocosms // Soil Sci. Soc. Am. J. 2000. V. 64. № 2. P. 799–808.
- Vauramo S., Setälä H. Decomposition of labile and recalcitrant litter types under different plant communities in urban soils // Urban Ecosyst. 2011. № 14. P. 59–70.
<https://doi.org/10.1007/s11252-010-0140-9>
- Xue-Feng Li, Shi-Jie Han, Yan-Ling Hu, Yu-Tao Zhao. Decomposition of litter organic matter and its relations to C, N and P release in secondary conifer and broadleaf mixed forest in Changbai Mountains // The J. Applied Ecology. 2008. V. 19. P. 564–570.
- Zhang R.Q., Sun Z.J., Wang C., Ge Y., Li Y.L., Qiao Y.H., Pang J.Z., Zhang L.D. Eco-process of leaf litter decomposition in tropical rain forest in Xishuangbanna, China. I. Decomposition dynamic of mixed leaf litters. J Plant Ecol (Chin Vers). 2006. № 30. P. 780–790.

Pine Needles Litter Decomposition in Soils of the Eastern Fennoscandia's Pine Plantations

O. N. Bakhmet^{1, *} and M. V. Medvedeva²

¹*Department of Multidisciplinary Scientific Research, Karelian Research Centre of the RAS, Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, 185910 Russia*

²*Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the RAS, Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, 185910 Russia*

*E-mail: bakhmet@mail.ru

The studies were carried out in the Eastern Fennoscandia, with soils being represented by iron sandy podzols. The paper considers data on the pine needle litter decomposition in soils at various stages of artificial reforestation (fresh felling, 7-, 15-, and 40-year-old pine crops). A 170-year-old cowberry pine forest growing in a protected area was chosen as a control. The study included assessing the efficiency of pine needle litter decomposition in a model field experiment, as well as the change in the chemical elements content and biochemical parameters, as the process of litter's mineralization in the soil went on. The ecological and trophic structure of the soil microbial community was also assessed in each of the ecosystems. It has been established that the greatest changes in the organic matter transformation process occur in soils at the early stages of reforestation. In soils that have been formed under pine cultures older than 15 years, the intensity of mineralization processes and the content of hardly hydrolysable elements decreased, and upon reaching 40 years it became similar to the soils of undisturbed forest communities. Changes in the chemical elements content were noted in the pine litter exposed in the soil. The data obtained can be used in monitoring the natural environment.

Keywords: Karelian middle taiga, soil properties, pine crops, undisturbed forest ecosystems, organic matter transformation.

REFERENCES

- Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Handbook on chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 1970, 487 p.
- Austin A., Ballarín C., Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems, *PNAS*, 2010, Vol. 107, No. 10, pp. 4619–4622. doi/10.1073/pnas.0909396107
- Babich N.A., Aktual'nye problemy lesovosstanovleniya na Evropeiskom Severe Rossii v ramkakh perekhoda k intensivnoi modeli vedeniya lesnogo khozyaistva (Topical issues of reforestation in the European north of Russia in the context of switching to the intensive model of forest management), *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2013, No. 2(332), pp. 74–83.
- Babich N.A., Klevtsov D.N., Zapasy energii v kul'turakh sosny (Reserve of energy in pine cultures), *Lesnoi vestnik*, 2012, No. 1, pp. 38–41. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/zapasy-energii-v-kulturah-sosny> (November 29, 2021).
- Bakhmet O., Medvedeva M., Variations in soil properties upon artificial reforestation in Karelia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2015, Vol. 8, No. 7, pp. 838–844. doi 10.1134/S1995425515070033
- Berg B., Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils, *Forest Ecology and Management*, 2000, No. 133, pp. 13–22.
- Bezkorovainaya I.N., Antonov G.I., Ivanov V.V., Semenyakin D.A., Biologicheskaya aktivnost' pochv posle nesploshnykh rubok v sosnyakh Krasnoyarskoi lesostepi (Biological activity of soils after partial felling in pine forests of the Krasnoyarsk forest-steppe), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2010, Vol. 27, No. 3–4, pp. 238–242.
- Boreal'nye lesa: sostoyanie, dinamika, ekosistemnye usluzhi*, (Boreal forest: Health, dynamics and ecosystem services), Petrozavodsk: KarNTs RAN., Proc. of All-Russian Sci. Conf. with international participation, dedicated to the 60th anniversary of the Forest Institute of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2017, 338 p.
- Cotrufo F., Soong J., Horton A., Campbe E., Haddix M., Wall D., Parton W., Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss, *Nature Geosciences*, 2015, Vol. 8, pp. 776–781. doi.org/10.1038/ngeo2520
- Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Denef K., Paul E., The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?, *Global Change Biolog.*, 2013, Vol. 19, No. 4, pp. 988–995.
- Dickenson C.H., Pugh G.J.F., *Biology of plant litter decomposition*, London, N.Y.: Academic press INC, 1974, Vol. 1, 133 p.
- Dymov A.A., Lapteva E.M., Milanovskiy E.Y., Izmenenie pochv i pochvennogo organicheskogo veshchestva v protsesse estestvennogo lesovozobnovleniya posle rubki sosnyaka brusnichno-zelenomoshnogo (Soil and soil organic matter changes during natural reforestation after felled cowberry-green moss pine forest), *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoi vestnik*, 2012, No. 2(85), pp. 67–72.
- Fedorets N.G., Solodovnikov A.N., Tkachenko Y.N., Vodno-fizicheskie i agrokhimicheskie pokazateli pochv bazisnykh pitomnikov Karelii (Hydrophysical and agrochemical characteristics of soils in permanent nurseries in Karelia), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, No. 8, pp. 139–144.

- Germanova N.I., Medvedeva M.V., *Uchebno-metodicheskoe posobie po issledovaniyu mikrobootsenozov estestvennykh i antropogenno narushennykh pochv* (Study guide for the examination of natural and anthropogenically disturbed soils microbiocenoses), Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2010, 64 p.
- Karpachevskii L.O., Voronin A.D., Dmitriev E.A., Stroganova M.N., Shoba S.A., *Pochvenno-biogeotsenoticheskie issledovaniya v lesnykh biogeotsenozakh* (Soil and biogeocenotic studies in forest biogeocenoses), Moscow: Izd-vo MGU, 1980, 160 p.
- Kotilainen T., Setälä H., Alatalo I., Vuorisalo T., Saloniemi I., Impacts of chitinase-transformed silver birch on leaf decomposition and soil organism, *European J. Soil Biology*, 2004, No. 40, pp. 155–161.
doi 10.1016/j.ejsobi.2005.03.001
- Krishnal M., Litter decomposition in forest ecosystems: a review, *Energy, Ecology and Environment*, 2017, No. 2(4), pp. 236–249.
doi 10.1007/s40974-017-0064-9
- Larionova A.A., Kvitkina A.K., Bykhovets S.S., Lopes-De-Gerenyu V.O., Kolyagin Y.G., Kaganov V.V., Vliyanie azota na mineralizatsiyu i gumifikatsiyu lesnykh opadov v model'nom eksperimente (The contribution of nitrogen to mineralization and humification of forest litter in simulation study), *Lesovedenie*, 2017, No. 2, pp. 128–139.
- Lopes De Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Galibina N.A., Shorohova E.V., Kapitsa E.A., The effects of temperature and mineral nitrogen and phosphorus on the decay processes and composition of soil–bark substrates, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 1, pp. 49–62.
DOI 10.1134/S1064229321010087
- McGill W.B., Cole C.V., Comparative aspects of cycling of organic C, N, S, and P through soil organic matter, *Geoderma*, 1981, Vol. 26, pp. 267–286.
- Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii*, (Methods of soil biology and biochemistry), Moscow: MGU, 1987, 267 p.
- Morozova R.M., *Lesnye pochvy Karelii* (Forest soils in Karelia), Leningrad: Nauka, 1991, 184 p.
- Powers J.S., Montgomery R., Adair E., Brearley F., DeWalt S., Castanho C., Chave J., Deinert E., Ganzhorn J., Gilbert M., González-Iturbe J., Bunyavejchewin S., Grau H.R., Harms K., Hiremath A., Iriarte-Vivar S., Manzano E., Oliveira A.A., Poorter L., Ramanamanjato J.-B., Carl Salk, Varela A., Weiblen G. D., Lerdau M.T., Decomposition in tropical forests: a pan-tropical study of the effects of litter type, litter placement and mesofaunal exclusion across a precipitation gradient, *J. Ecology*, 2009, Vol. 97, No. 4, pp. 801–811.
doi 10.1111/j.1365-2745.2009.01515.x
- Qualls R.G., Richardson C., Phosphorus enrichment affects litter decomposition, immobilization and soil microbial phosphorus in wetland mesocosms; *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, Vol. 64, No. 2, pp. 799–808.
- Semenov V.M., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Khromykhina D.P., Semenova N.A., Lopes De Gerenyu V.O., Plant residues decomposition and formation of active organic matter in the soil of the incubation experiments, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 10, pp. 1183–1194.
DOI 1110.1134/S1064229319100119
- Sofronova G.I., Trubino G.I., Shreders S.M., Makarevskii M.F., K metodike kolichestvennogo opredeleniya uglevodov v vegetativnykh organakh sosny obyknovennoi (On the method of quantitative determination of carbohydrates in the vegetative organs of Scotch pine), In: *Fiziologo-biokhimicheskie issledovaniya sosny na Severe* (Physiological and biochemical studies of pine in the North), Petrozavodsk: KarNTs RAN, 1978., pp. 119–133.
- Vauramo S., Setälä H., Decomposition of labile and recalcitrant litter types under different plant communities in urban soils, *Urban Ecosyst*, 2011, No. 14, pp. 59–70.
doi 10.1007/s11252-010-0140-9
- Xue-Feng Li, Shi-Jie Han, Yan-Ling Hu, Yu-Tao Zhao, Decomposition of litter organic matter and its relations to C, N and P release in secondary conifer and broadleaf mixed forest in Changbai Mountains, *The J. Applied Ecology*, 2008, Vol. 19, pp. 564–570.
- Yastrembovich N.I., Kalinin F.L., Opređenje uglevodov i rastvorimyykh soedinenii azota v odnoi naveske rastitel'nogo materiala (Determination of carbohydrates and soluble nitrogen compounds in one sample of plant material), *Nauch. tr. Ukr akad. s.-kh. nauk*, 1962, Vol. 23, pp. 119–126.
- Zhang R.Q., Sun Z.J., Wang C., Ge Y., Li Y.L., Qiao Y.H., Pang J.Z., Zhang L.D., Eco-process of leaf litter decomposition in tropical rain forest in Xishuangbanna, China. I. Decomposition dynamic of mixed leaf litters, *J. Plant Ecol (Chin Vers)*, 2006, No. 30, pp. 780–790.
- Zvyagintsev D.G., *Pochva i mikroorganizmy* (Soil and microorganisms), Moscow: MGU, 1987, 256 p.