

DOI 10.31509/2658-607x-202143-87
УДК 630*114.351:631.484:574.42

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗЛОЖЕНИЕ ДРЕВЕСНОГО ОПАДА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ В ФОНОВЫХ УСЛОВИЯХ И ПРИ АЭРОТЕХНОГЕННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ

© 2021 г.

Е. А. Иванова

*Институт проблем промышленной экологии Севера, ФИЦ КНЦ РАН
Россия, 184209 Мурманская обл., Апатиты, ул. Академгородок, 14а*

E-mail: ea.ivanova@ksc.ru

Поступила в редакцию: 30.06.2021

После доработки: 04.08.2021

Принята к печати: 06.08.2021

В работе приводится обзор российских и зарубежных статей, посвященных изучению процессов формирования и разложения древесного опада в лесных экосистемах под влиянием природных и антропогенных факторов. Анализ работ показал, что пространственная изменчивость (подкروновые и межкروновые пространства) и сезонные особенности формирования древесного опада, его химического состава и процессов разложения изучены недостаточно. Кроме того, большинство исследований как в отечественной науке, так и за рубежом освещает влияние природных факторов на формирование опада и процессы его разложения, тогда как воздействие точечных источников аэротехногенного загрязнения рассматривается редко. Изучение изменчивости размеров, фракционного и химического состава и процессов разложения древесного опада в условиях воздушного промышленного загрязнения является важным для прогноза динамики лесных экосистем в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов и снижения негативного влияния производственных процессов на леса.

Ключевые слова: *лесные биогеоценозы, древесный опад, аэротехногенное загрязнение, фракционный состав, химический состав, разложение растительных остатков, сезонная изменчивость поступления и разложения опада, пространственная вариабельность формирования и разложения опада.*

Опад древесных растений в лесных экосистемах выступает в роли связующего звена между растениями верхних ярусов и почвой как источник органического вещества почв и элементов питания для биоты, является одним из ключевых компонентов биогеохимических циклов в лесных биогеоценозах. За счет особенностей хими-

ческого состава древесный опад участвует в формировании фитогенных зон влияния деревьев, подавляет или же ускоряет рост травянистых растений, влияет на микробную активность, состав почв (Aronte et al., 2013; Chavez-Vergara et al., 2014; Уфимцев, Егорова, 2016; Колмогорова, Уфимцев, 2018; Помогайбин Е., Помогайбин А.,

2018), в процессе разложения способствует изменению состава и обилия почвенных микроорганизмов и беспозвоночных (Рахлеева и др., 2011). Изъятие опада приводит к снижению биологической активности верхних горизонтов почвы, обеднению лесной экосистемы элементами минерального питания, замедлению роста деревьев, снижению почвенного дыхания (Sayer, 2005; Xu et al., 2013; Иванова и др., 2015), тогда как добавление листового опада снижает амплитуду температур в почве, увеличивает доступность азота и алюминия (Loydi et al., 2014), способствует более высоким темпам производства метана (Yavitt, Williams, 2015). Внесение опада в тропических лесах увеличило поступление азота и фосфора в почву (Wood et al., 2009), повысило концентрации нитратов и запасы неорганического азота в почве (Sayer, Tanner., 2010). Подстилка, формирующаяся из неразложившегося опада, действует как физический барьер для появления побегов у видов с мелкими семенами, способствует появлению и укоренению крупносемянных видов, поддерживает микроклимат, благоприятный для травоядных и патогенных микроорганизмов, выступая средой их обитания (Sayer, 2005; Dupuy, Chazdon, 2008).

Количественные и качественные характеристики древесного опада в практическом плане представляют

интерес для оценки уровня радиационного загрязнения (Бондарева, Рубайло, 2016; Комиссаров, Огура, 2017), пожарной опасности на основе накопления горючих материалов (Архипов, 2014; Собачкин и др., 2017), накопления тяжелых металлов древесными растениями на урбанизированных территориях (Копылова, 2012). Активно исследуется возможность использования древесного опада, преимущественно хвойного или листового, в качестве источника целлюлозы (Данилова, Степанова, 2017), сорбционного материала (Алексеева, Степанова, 2015; Силайчева, Степанова, 2016; Шаймарданова и др., 2017; Свергузова и др., 2017), кальциевого удобрения (Петроченко и др., 2015). В математических исследованиях данные о поступлении и разложении растительного опада используются для формирования моделей оценки участия опада в биологическом круговороте, связи с атмосферным CO_2 и климатом (Brovkin et al., 2012; Мироненко, 2017). В частности, данные по динамике листового опада вечнозеленых тропических лесов Панамы, Французской Гвианы и Бразилии использовали для модификации глобальной модели наземной экосистемы, что позволило точнее оценить валовую первичную продуктивность (De Weirtdt et al., 2012). Особенности элементного состава опада деревьев представляют интерес для понимания

закономерностей циклов элементов и почвообразования (Meier et al., 2005; Wood et al., 2006; Wood et al., 2009; Vesterdal et al., 2012; Осипов, 2017).

Параметры древесного опада изучаются преимущественно в фоновых условиях, не затронутых аэротехногенным загрязнением со стороны крупных промышленных предприятий или ТЭЦ. Известно, что воздушное загрязнение вызывает деградацию лесных экосистем, изменения структуры древостоев: гибель хвойных деревьев и замену их мелколиственными породами (Черненко и др., 2016), снижение видового разнообразия и приспособленности растительного сообщества, гибель мохообразных и лишайников (Salemaa et al., 2004; Hale, Robertson, 2016). Кислотообразующие вещества и тяжелые металлы – компоненты выбросов – вызывают повреждения ассимилирующих органов хвойных древесных растений (Лукина, Никонов, 1998; Ярмишко, Лянгузова, 2013), уменьшение продолжительности жизни хвои (Lampri, Huttunen, 2003), практически полное отсутствие семенной продуктивности деревьев и кустарников (Цветков В., Цветков И. 2012). Вместе с тем в лесных экосистемах наблюдается снижение активности почвенных микроорганизмов и изменение численности микромицетов и почвенных беспозвоночных, вследствие чего замед-

ляется разложение органического вещества и увеличивается мощность лесной подстилки (Nieminen et al., 1999; Зенкова, 2000; Полянская и др., 2001; Никонов и др., 2001; Фомичева и др., 2006; Лукина и др., 2008; Воробейчик, Пищулин, 2009, 2016). Накопление Cu и Ni в лесной почве вблизи металлургических предприятий приводит к дефициту основных катионов (обменных Ca, Mg, K) в органическом слое (Derome, Lindroos, 1998). Даже при снижении техногенной нагрузки продолжается гибель древостоя (Воробейчик и др., 2014), величина радиального прироста деревьев в зоне загрязнения остается существенно меньше контрольных и фоновых величин (Черненко и др., 2012). В окрестностях комбината «Североникель» хвойные леса, несмотря на снижение уровня выбросов, остаются в критическом состоянии (Черненко и др., 2011; Lyanguzova et al., 2018). В связи с этим изучение процессов формирования и разложения древесного опада как одного из ключевых звеньев биогеохимических циклов представляет особый интерес для понимания динамики функционирования лесных экосистем при меняющихся техногенных нагрузках.

Цель данной работы: рассмотреть современное состояние изученности процессов формирования и разложения древесного опада в лесных экосистемах.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕВЕСНОГО ОПАДА И ПРОЦЕССОВ ЕГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Международная программа по оценке и мониторингу воздействия загрязнения воздуха на леса (ICP Forests) разработала для участников подробное методическое пособие по отбору и анализу древесного опада (Ukonmaanaho et al., 2016). В переводном руководстве по комплексному мониторингу, включающем в том числе и методики программы ICP Forests, даны рекомендации как для отбора опада, так и по оценке скорости разложения (Руководство..., 2013). В крупных работах дается анализ методов и результатов различных экспериментов в бореальных и умеренных малонарушенных лесах (Berg, McClaugherty, 2008), описываются наиболее распространенные и специфические методы (экологические, химические, микробиологические и др.) всестороннего изучения процессов разложения растительного опада (Methods..., 2005). Изучение литературных источников показало, что методы полевых исследований значительно варьируют в зависимости от климатических особенностей местности, состава древостоев и задач исследования.

В ряде современных работ представлены уже известные и проверен-

ные методики отбора древесного опада. Наиболее часто в качестве опадолуловителей используются ящики (преимущественно с сетчатым дном для отвода воды) и собирающие воронки, расположенных в 1-1.5 м над землей. Для отбора материала непосредственно с поверхности земли применяют шаблоны различной площади (табл.). Кроме того, иногда опад собирают с поверхности и без использования шаблона с учетных площадок (Болдескул и др., 2015; Уфимцев, Егорова, 2016; Колмогорова, Уфимцев, 2018). Preston

Таблица. Примеры наиболее часто используемых типов оборудования для сбора древесного опада

Конструкция	Размеры	Примеры работ
Ящик	0.98 м ²	Базилевич и др., 1978 Брянин, Абрамова, 2017 Абрамова и др., 2018
	1 м ²	Родин и др., 1967 Ермакова, 2009 Боев и др., 2018
	50 на 50 см	Лиханова, 2014 Осипов, 2017 Юсупов и др., 1995
	80 на 80 см	Корáček et al., 2010
Воронка	0.2-0.5 м ²	Ukonmaanaho et al., 2008 Kouki, Hokkanen, 1992 Jonczak, Parzych, 2014 Berg et al., 1999 Stojnić et al., 2019 Иванова, Лукина, 2017
Шаблон	0.031 м ²	Решетникова, 2011 Ведрова, Решетникова, 2014
	100 на 100 см	Бессонова и др., 2017
	0.25 м ²	Nakazato et al., 2021

et al. (2006) одновременно использовали разные конструкции для сбора опада: пластиковые емкости диаметром 27,3 см и высотой 30 см с сетчатым дном и квадратные сетки 1 м², уложенные на подстилку, для захвата веток.

Пространственная вариабельность поступления древесного опада на поверхность почвы рассматривается довольно редко. Встречаются варианты размещения оборудования систематически, но без указания деталей (Ukonmaanaho et al., 2008); в случайном порядке (Dearden et al., 2006; Novák et al., 2014; Боев и др., 2018); равномерно по площадке (Юсупов и др., 1995; Stojnić et al., 2019); по диагоналям на участках (Albrektson, 1988); по прямой на расстоянии 10 м друг от друга (Michoroulos et al., 2020); в две линии (Meier et al., 2005; Ермакова, 2009); равномерной сеткой на площадке (Jonczak, Parzych, 2014); в разных частях склона (Wood et al., 2006; Бессонова и др., 2017). Детальное исследование влияния структуры древостоя выражается в распределении оборудования по типам парцелл (Лукина, Никонов, 1996), в подкروновых и межкروновых пространствах (Иванова, Лукина, 2017). Цандекова О. Л. (2018), исследуя динамику накопления золы в опаде клена ясенелистного, проводила отбор образцов на учетных площадках в различных ус-

ловиях сомкнутости крон с учетом зон влияния деревьев: в несомкнутых древостоях и в древостоях с сомкнутостью крон 50-60% опад отбирали в подкроновой и прикроновой зонах, а в древостое с сомкнутостью крон 100% — в приствольной и межкроновой зонах. Сходным образом в исследовании химического состава опада сосны обыкновенной пробы отбирали в подкроновых, прикроновых (межкроновых) и внешних зонах на пробных площадях в редкостойных (рединах), среднесомкнутых и высокосомкнутых древостоях (Колмогорова, Уфимцев, 2018).

Периодичность отбора материала зависит во многом от климатической зоны, в которой проводится исследование, и может производиться ежемесячно/каждые 2 недели в теплый период и однократно за зимний (Юсупов и др., 1995; Ukonmaanaho et al., 2008; Lenthonen et al., 2008; Ľupek et al., 2015; Брянин, Абрамова, 2017); ежемесячно в течение вегетационного периода без отбора проб за зимний период (Шпаковская, Рожак, 2014); каждые две недели (Wood et al., 2009); только весной и осенью (Лиханова, 2014; Novák et al., 2014; Иванова, Лукина, 2017); трижды в год: весной, в конце лета и осенью (Koráček et al., 2010); или же однократно осенью (Болдескул и др., 2015; Боев и др., 2018). В тропических лесах периоды отбора могли исчисляться днями (De Weirtdt et al., 2012). В масштабных

работах, охватывающих участки, расположенные в различных климатических условиях, периодичность отбора проб может варьировать от 3 до 12 раз в год в зависимости от местонахождения участка (Berg et al., 1999; Berg, Meentemeyer, 2001).

С целью изучения фракционного состава древесного опада после отбора растительный материал сортируют. В зависимости от задач исследования в опаде могли выделяться лишь две части: хвоя и смешанная фракция, состоящая из всех остальных собранных компонентов (семена, шишки, кора и т. д.) (Berg et al., 1999; Berg, Meentemeyer, 2001). Опад также делили на фракции: зеленая, многолетняя хвоя и оставшиеся фракции, увеличивая при этом число периодов отбора (Ukonmaanaho et al., 2008). При отборе опада с поверхности земли кроме фракций древесного опада (хвои/листьев, коры, веток и шишек) могли выделяться такие фракции, как опад карликовых кустарников, моховой опад, лишайники, травы (Юсупов и др., 1995; Preston et al., 2006; Решетникова, 2011; Hilli, 2013; Собачкин и др., 2017; и др.). Встречаются и работы, в которых описывается еще более тщательный учет фракций древесного опада с выделением плодов, почек, семян и сережек и других фракций (Ермакова, 2009;

Шпаковская, Рожак, 2014; Иванова, Лукина, 2017). С точки зрения изучения древесного опада как горизонта L почвенной подстилки возможно также разделение растительного материала на активную (листья, хвоя, труха, семена) и неактивную (шишки, мелкие ветки, кора) фракции (Карпачевский и др., 1980).

Исследования характеристик опада чаще всего посвящены довольно короткому периоду наблюдения – до 4-5 лет, но встречаются и многолетние исследования. В работе Ľurek et al. (2015) использованы данные, полученные в рамках международной программы по оценке и мониторингу воздействия загрязнения воздуха на леса ICP Forests с 1996 по 2011 гг. и исследования финского научно-исследовательского института леса (Metla) с 1960 по 2010 год. Lenthonen et al. (2008) изучали временные ряды для опада хвои, прироста деревьев, опада микростробил (мужских пыльцевых шишек) и суточные данные по погоде за 43 года, с 1961 по 2004 гг. На юго-востоке Финляндии опад хвои сосны обыкновенной отбирали на протяжении 24 лет (1962–1986) (Kouki, Nokkanen, 1992). Длительные наблюдения за параметрами древесного опада представляют ценность для понимания функционирования лесных экосистем в ответ на изменения климата.

Разложение опада

Изучение процессов разложения опада преимущественно проводят на основе полевых экспериментов по инкубированию растительных образцов активных фракций опада (хвоя/листья) непосредственно в древостоях на периоды от 2-3 (Рахлеева и др., 2011; Лиханова, 2014) до 4-6 лет (Moore et al., 2006; Symonds et al., 2013). Встречаются и работы, охватывающие всего один сезон (Абрамова и др., 2018). Периодичность отбора проб варьирует в зависимости от задач исследования, климатических особенностей местности. При более подробном рассмотрении первоначальных стадий разложения интервалы составляли от нескольких дней до месяца (De Marco et al., 2007; Wood et al., 2009; Абрамова и др., 2018). Для общей оценки потерь массы опада и изменения его химических параметров периоды составляли от нескольких месяцев (Рахлеева и др., 2011) и полугодия (Aronte et al., 2013) до года.

В описываемых инкубационных экспериментах для закладки проб опада на разложение используются сетчатые мешочки из инертного материала: нейлона (Рахлеева и др., 2011), пластика (Wood et al., 2009), капрона (Лиханова, 2014), стекловолокна (Ogden, Schmidt, 1997), полипропилена (Moore et al., 2006), терилена (полиэтилен-терефталата) (Berg et al., 1993) с различной величиной отверстий, кото-

рая зависела от размера растительных остатков. Например, листовой опад дуба, березы, робинии, осины и сосны помещали в мешочки с размером ячеек 1.5 на 1.5 мм, а для опада дугласовой пихты мешочки имели размер ячейки 1 на 0.6 мм, чтобы избежать потерь образцов (Van Nevel et al., 2014). В исследованиях, касающихся участия беспозвоночных в разложении опада, возможно использование комбинированного варианта, когда в нижней части мешочка используют сетку с более мелкими ячейками (0.5-1 мм), а в верхней — с более крупными (0.2-1 см) для доступа биоты (Wood et al., 2009; Рахлеева и др., 2011; Slade, Riutta, 2012). Кроме тканевых мешочков встречаются упоминания использования контейнеров 100 на 100 на 5 см (De Marco et al., 2007).

Пространственные особенности разложения опада и изменения его химического состава так же мало изучены, как его количественные характеристики. Примером изучения зон влияния деревьев можно считать работу Е. Л. Воробейчика и П. Г. Пищулина (2011), в которой изучалось разложение чистой целлюлозы в приствольных участках (на расстоянии 0.2-0.4 м от ствола), в середине проекции кроны (1.2-1.8 м), в окне древостоя (3.8-5.3 м) и с противоположной от окна стороны под сомкнутым пологом леса (2-3 м от ствола). Влияние структуры древостоя

также оценивалось при расположении образцов в подкروновых и межкروновых пространствах ельников и сосняков (Lukina et al., 2017, Иванова и др., 2019).

МАССА И ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ ДРЕВЕСНОГО ОПАДА: ПРИРОДНЫЕ ФАКТОРЫ И АЭРОТЕХНОГЕННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

Количество и качество древесного опада регулирует накопление углерода, циклы элементов в лесах. В рамках Международной биологической программы проводились работы по оценке массы и фракционного состава опада в таежных лесах европейской части России (Казимиров, Морозова 1973; Забоева, 1975; Манаков, Никонов, 1981). Многочисленные долгосрочные наблюдения по объемам растительного опада в эти же годы проводились за рубежом (Bray, Gorham, 1964; Flower-Ellis, 1985; Kouki, Hokkanen, 1992).

Влияние природных факторов на формирование древесного опада

Среди естественных факторов, влияющих на продукцию древесного опада, отмечается зависимость массы хвойного опада от географической широты: среди участков с аналогичным плодородием количество опада хвой меньше для участков, расположенных на севере (Albrektson, 1988; Berg et al.,

1999). Размеры и состав опада зависят от состава древостоя (Шпаковская, Рожак, 2014), годовичного прироста деревьев, их возраста (Pedersen, Bille-Hansen, 1999). В частности, опад (хвоя, шишки и кора плюс травяная ветошь) в спелом сосняке превышал данный показатель в средневозрастном насаждении (Собачкин и др., 2017). В последние десятилетия на основе данных многолетнего мониторинга оценивались связи надземной биомассы деревьев с опадом (Lenthonen et al., 2008; Ukonmaanaho et al., 2008; Ilvesniemi et al., 2009; Novák et al., 2014). Так, в сосняках северной Финляндии опад хвой сосны обыкновенной зависит от продукции и массового развития хвой, которое происходит 4-6 годами ранее (Lenthonen et al., 2008). Величина опада может зависеть от погодных условий: неблагоприятные климатические факторы, похолодания, недостаток осадков затормаживают развитие листового аппарата растений (Лиханова, 2014). Долгосрочное исследование на юго-востоке Финляндии показало положительную связь количества опада хвой сосны обыкновенной со средней температурой июля и высокими температурами в период с марта по апрель: высокая температура в июле совпала с увеличением количества опада в том же и следующем году (Kouki, Hokkanen, 1992). В молодых дубовых насаждениях обнаружили положительную связь

между годовым количеством опада и суммой осадков, отрицательную — с температурой летом (Novák et al., 2014). Высокий урожай семян и шишек сосны связывают с теплой погодой предыдущих лет (Некрасова, 1957).

Размеры опада проявляют видовую специфичность, а увеличение видового разнообразия приводит к росту продукции опада (Scherer-Lorenzen et al., 2007). Средний годовой опад в ельниках Финляндии был выше, чем в сосняках (Ukonmaanaho et al., 2008), на участке с культурой кедра опада поступало почти втрое больше, чем в ельнике (Решетникова, 2011). Различия в количестве опада сосны Банкса (*Pinus banksiana*) и черной ели (*Picea mariana*), растущих вдоль Бореального лесного трансекта в северной Канаде, связывают с условиями участка (структурой почвы и дренажем) и мощностью подстилки (Preston et al., 2006).

Активная деятельность насекомых-вредителей приводит к изменениям в формировании опада: в зрелых еловых насаждениях на водосборе озера Плешне (Чехия) после заражения короедом количество опада увеличилось (Koráček et al., 2015).

Фракционный состав древесного опада так же, как его общая масса, может зависеть от возраста или видового состава древостоя. В сосняках разно-травно-зеленомошных разного возраста лесостепной зоны во фракционном

составе опада преобладали шишки и хвоя. В средневозрастном насаждении большую часть опада составляла хвоя (52.2%), в спелом древостое доля хвои уменьшалась до 36.7%. Возрастными отличиями древостоев объясняют и участие шишек: в опаде спелого насаждения она выше, чем в средневозрастном (Собачкин и др., 2017). В 40-летних культурах основных лесобразующих пород Сибири под кедром около 90% массы приходится на хвою, под сосной, лиственницей и елью — 40–50%, 20–45% составляют ветви ($d \leq 10$ мм). В березняке и осиннике масса опада соответственно на 70–74% представлена листьями и на 21–29% — ветвями (Решетникова, 2011). Высокие значения массы опада хвои, коры и ветвей могут быть обусловлены также действием опасных погодных явлений — сильными ветрами и метелями (Доклад..., 2015).

Сезонная и пространственная изменчивость формирования древесного опада

Процессы формирования древесного опада — его масса и фракционный состав в сезонной динамике и в зависимости от мозаичности лесного полога — изучены слабо. Известно, что в елово-буковых и пихтово-елово-буковых лесах Украинских Карпат основная часть годового количества опада приходится на октябрь и ноябрь за счет увеличе-

ния в его составе хвои и листьев. При этом динамика поступления хвои имеет вид кривой с двумя пиками в начале и в конце вегетационного сезона и с минимумом в начале осени (Шпаковская, Рожак, 2014). В горелом лесу и контроле максимум поступления опада приходится на октябрь, минимум — на июль (Брянин, Абрамова, 2017). Основная масса листьев березы плосколистной в древостоях хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье) начинает опадать в конце второй декады сентября, с максимумом в течение третьей декады сентября — первой пентады октября, а основная масса листьев рябины сибирской опадает в течение 3-4 недель — с начала второй декады сентября до конца первой декады октября (Ермакова, 2009). В ельниках средней тайги на зимне-весенний период приходится 52-58, на летний — 20-23, на осенний — 22-25% от общей массы опада (Лиханова, 2014). В 40-летних хвойных культурах Сибири масса опада летнее-осеннего периода выше, чем зимнего (Решетникова, 2011). В рамках исследования роли опада в формировании фитогенных полей деревьев на отвалах угольного разреза были выявлены различия фракционного состава опадного горизонта L подстилки в разных зонах: под кронами преобладали хвоя и шишки, тогда как во внешней зоне подстилка почти целиком состо-

яла из опада луговой растительности (Уфимцев, Егорова, 2016).

Антропогенные факторы, влияющие на формирование опада

Пожары как антропогенный фактор приводят к значительным изменениям функционирования лесных экосистем. В постпирогенном лиственничнике в предгорьях хребта Тукуринга (Верхнее Приамурье) поступление опада надземной части растительности было снижено в 2.8 раза по сравнению с контрольным лесом. Кроме того, фракционный состав также характеризовался различиями: в контроле наблюдалось постепенное убывание доли фракций в составе общего количества опада в ряду листья-хвоя-ветви-трава-прочие фракции (33, 26, 21, 11, 9% соответственно), тогда как в послепожарном древостое преобладал опад трав, а убывание доли фракций происходило в обратном порядке: трава-прочие фракции-хвоя-листья-ветви (28, 23, 22, 20, 7% соответственно) (Брянин, Абрамова, 2017). При длительном беспожарном периоде увеличивается соотношение ветки/хвоя в опаде за счет уменьшения опада хвои, что приводит к уменьшению скорости разложения (Dearden et al., 2006).

Воздушное загрязнение тяжелыми металлами и кислотообразующими веществами приводит к повреждению

ям ассимилирующих органов хвойных древесных растений и уменьшению продолжительности жизни хвои — дефолиация деревьев не только в фенологические сроки способствует увеличению количества опада (Niemiinen, Helmisaari, 1996; Rautio et al., 1998; Лукина, Никонов, 1998; Lamppu, Huttunen, 2004; Никонов и др., 2004; Ярмишко, Лянгузова, 2013). С повышением уровня загрязнения уменьшается число женских шишек на дереве (Ставрова, 1990), снижается доля крупных шишек, возрастает численность поврежденных и больных, уменьшается диаметр шишек и средний сырой вес (Цветков В., Цветков И., 2003). В зоне воздействия выбросов комбината «Североникель» уменьшается доля в опаде эпифитных лишайников как чувствительного к воздушному загрязнению элемента биогеоценоза. При этом наблюдаются четкие тенденции к увеличению общей массы опада за счет хвои сосны и коры, несмотря на снижение выбросов за 20 лет, что может быть связано с ослаблением деревьев и преждевременным отмиранием отдельных органов (Иванова, Лукина, 2017).

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДРЕВЕСНОГО ОПАДА

Химический состав свежего древесного опада определяет его качество для организмов-деструкторов, а соот-

ветственно, влияет на скорость разложения и изменение химического состава растительных остатков в процессе минерализации. Так, в работе Н. В. Лихановой (2014) показано, что наиболее интенсивно разлагался опад листьев березы, соотношение С : N которого составляло 35-38, тогда как для хвои ели и сосны этот показатель изменялся от 38 до 43, у ветвей древесных растений — от 43 до 60, у коры — от 105 до 142. Низкое содержание азота и фосфора в хвое приводит к увеличению соотношения С : N, повышающему шанс иммобилизации азота на ранних стадиях разложения (Symonds et al., 2013).

Природные факторы, определяющие химический состав древесного опада

Как количественные характеристики, так и химический состав растительных остатков зависит от различных факторов. Выявлено, что концентрации Mg, N и K уменьшались с увеличением возраста древостоя насаждений бука (Trap et al., 2013). В искусственном насаждении робинии обыкновенной поступление N, K, Mg, P с опадом выше в нижней трети изучаемого склона балки Войсковое (Бессонова и др., 2017). Концентрация Са в опаде хвои и листьев была отрицательно связана с годовым количеством осадков, вероятно из-за вымывания дождем и тающим снегом (Berg et al., 2017).

В многочисленных работах показано, что содержание элементов в опаде зависит от древесной породы (Preston et al., 2006; Ukonmaanaho et al., 2008; Aronte et al., 2013; Jonczak, Parzych, 2014; Боев и др., 2018; Neumann et al., 2018; Becker et al., 2018). Хвоя ели обыкновенной (*Picea abies*) и сосны скрученной (*Pinus contorta*) содержат больше кальция, чем хвоя сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*). Кроме того, концентрации Са в свежем опаде положительно связаны с концентрациями Р, К и Mg: для видов сосны (*Pinus contorta* и *Pinus sylvestris*) содержание Са положительно связано с концентрациями Mg и Mn, сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) отдельно — с содержанием магния (Berg et al., 2017). В ненарушенных 40-летних культурах Сибири соотношение углерода и азота в опаде кедра составило 101, сосны — 98, лиственницы и ели — 87, березы — 76 и осины — 118 (Решетникова, 2011).

Фауна также привносит изменения в химический состав растительных остатков. В хвое, опадающей после усыхания леса вследствие заражения леса короедом, на 1–3 год концентрация N увеличилась, а соотношения C : N и C : P уменьшились, что указывает на разложение эндофитами уже на деревьях. Концентрации Mg, K и P при этом увеличились в общем опаде из-за увеличения доли опада рябины (Koráček et al., 2015).

Сезонная и пространственная изменчивость химического состава древесного опада

Сезонные и пространственные особенности химического состава опада как в России, так и за рубежом изучены довольно слабо. Опад лиственницы, отобранный весной, был на 10% обогащен N и на 40% обеднен Са по сравнению с опадом, отобранным осенью. Изменения соотношений лигнин : N, C : N и C : P по прошествии зимнего сезона свидетельствовали о начале разложения опада (Чульдиене, 2017). По другим данным, содержание азота в общем опаде сосны в условиях породного отвала равномерно возрастало в течение вегетационного периода (Колмогорова, Уфимцев, 2018). В лесах Финляндии наблюдалось два основных периода поступления C и N с опадом сосны обыкновенной в почву: май–октябрь и ноябрь–апрель, причем в первый период поступление было выше с максимумом в сентябре (Portillo-Estrada et al., 2013). В сосняках Польши показано, что содержание Mn, Zn и Ni в опаде хвои сосны в 2007 году было выше осенью, тогда как в 2009 — весной (Jonczak, Parzych, 2014). В условиях породного отвала (на рекультивированных территориях размещения вскрышных пород угольного разреза) содержание общего фосфора в опаде сосны обыкновенной достигало максимума в подкروновых и прикroновых

зонах сомкнутых насаждений (Колмогорова, Уфимцев, 2018). В опаде *Acer pedundo* наибольшее накопление зольного компонента происходит в подкroновой и прикroновой зонах у одиночных деревьев в несомкнутых древостоях по сравнению с другими группами деревьев и с контролем (Цандекова, 2018).

Изменения химического состава древесного опада, вызванные антропогенными факторами

Резкие изменения в функционировании лесных экосистем, вызванные антропогенными факторами, существенно влияют на химический состав древесного опада. В постпирогенном листовенничнике в предгорьях хребта Тукуринга в опаде преобладают органические остатки, обогащенные азотом, но бедные углеродом. В хвое листовенницы на контрольной ПП соотношение С : N приближается к 170; в насаждении, нарушенном пожаром, этот показатель не превышает 110 (Брянин, Абрамова, 2017).

Атмосферное загрязнение приводит к нарушению процессов ретранслокации элементов внутри деревьев (Лукина, Никонов 1996, 1998; Nieminen, Helmisaari, 1996; Rautio et al, 1998; Steinnes et al, 2000; Kiikkilä, 2003; Тарханов, 2009; Ярмишко, Лянгузова, 2013; Сухарева, Лукина, 2014; Vasek et al., 2016). В зоне воздействия Средне-

Уральского медеплавильного завода по сравнению с контрольной зоной с опадом хвои сосны поступало больше Са (Юсупов и др., 1995). Длительное влияние кислотных осадков и насыщение азотом в еловых лесах Чехии вызвало снижение концентраций Са, Mg и Mn и соотношений Са : Al и Mg : Al, увеличение содержания N и соотношения N : Mg в опаде (Koráček et al., 2010). В дефолирующих лесах и техногенных редколесьях в зоне действия комбината «Североникель» зафиксировано ухудшение качества растительного материала: повышение содержания тяжелых металлов Ni и Cu и снижение содержания Са, Mn, K, Mg (Lukina et al., 2017; Иванова и др., 2019), в опаде листьев березы повышалось содержание лигнина при приближении к комбинату (Артемкина, 2018).

РАЗЛОЖЕНИЕ ДРЕВЕСНОГО ОПАДА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Оценка процессов разложения опада находит отражение в многочисленных работах со всего мира. На скорость потерь массы растительных остатков и изменение их химического состава оказывают влияние различные факторы среды: состав древостоя, почвенные условия, погодные, активность микроорганизмов и др. (рис. 1). Современная концепция заключается в том, что доминирующим фактором в широких

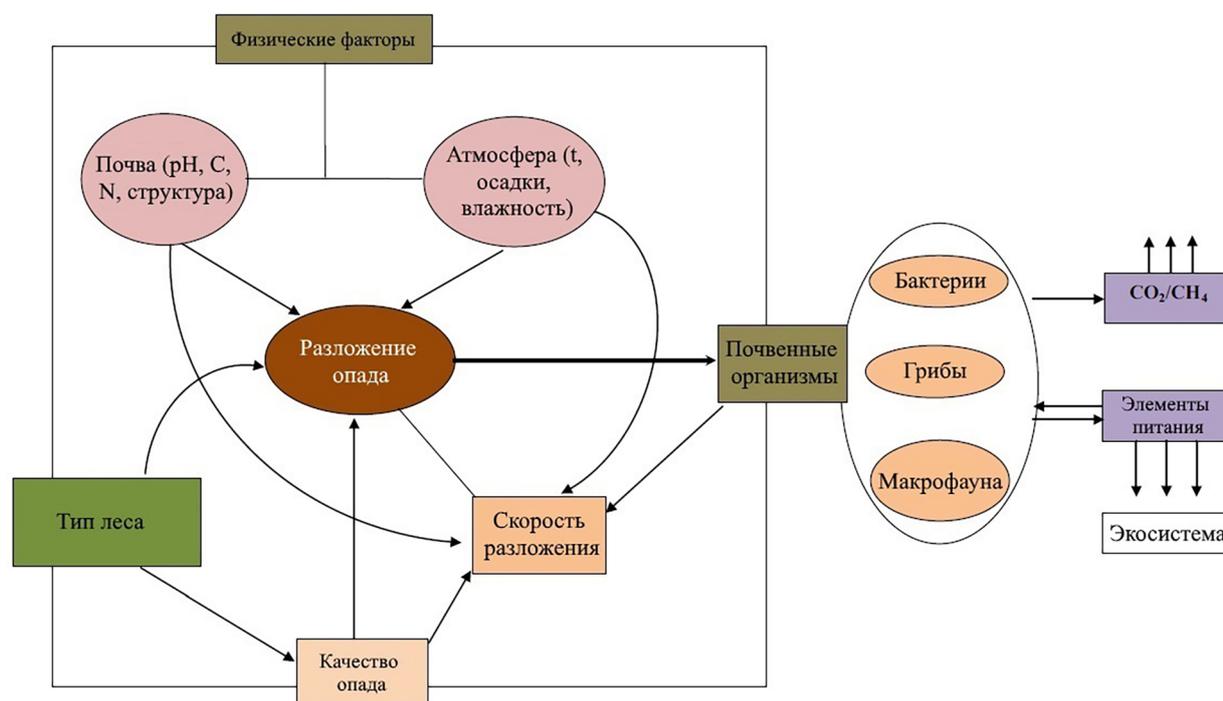


Рисунок 1. Факторы, влияющие на процессы разложения опада (по Krishna, Mohan, 2017)

пространственных масштабах является качество опада, а деятельность организмов-деструкторов регулируется климатом и качеством опада (Bradford et al., 2016).

Влияние природных факторов на процессы разложения древесного опада

Одним из основных факторов, влияющих на скорость разложения, является деятельность почвенной биоты: беспозвоночных, микроорганизмов и грибов (Воробьева, Наумова, 2009). Разложение опада в самом поверхностном горизонте почвы связывают с преобладанием сапротрофных гри-

бов и отсутствием микоризных грибов (Högberg et al., 2017). Однако влияние оказывает также и более крупная почвенная фауна. Slade, Riutta (2012) показали, что 22–41% общей потери массы листового опада приходилось на макрофауну. Дождевые черви увеличивали потерю массы опада для видов с более низким содержанием C : N (Belote, Jones, 2009). В лабораторном эксперименте высокие концентрации Cd, влияя на активность дождевых червей, ингибируют разложение листового опада и приводят к снижению плодородия почвы (Liu et al., 2020).

Минерализация древесного опада зависит от гидротермических условий

почв (Кузнецов, 2010; Кузнецов, Осипов, 2011), положительно связана со средней годовой температурой и годовым количеством осадков (Albrektson, 1988; Pausas, 1997; Portillo-Estrada et al., 2016). На средиземноморских участках разложение стареющей хвои сосны обыкновенной происходило быстрее, чем в континентальных лесах Пиреней, там же наблюдалось более резкое снижение скорости разложения при прореживании древостоев (Blanco et al., 2011). В исследовании влияния на разложение растительных остатков высоты над уровнем моря выявлено, что на процессы разложения влияет в основном качество опада, эти процессы зависят не столько от высоты над уровнем моря, сколько от сочетания конкретных условий, таких как температура, осадки, различные типы лесной подстилки и различные трофические взаимодействия между растениями и микробным сообществом (Marian et al., 2017). Скорость разложения тонких древесных остатков (веток разного диаметра) в масштабном исследовании с участками, расположенными по климатическому градиенту от Северной Финляндии до Центральной Эстонии, увеличивалась с севера на юг (Vavrova et al., 2009).

Поскольку фракционный и химический состав опада зависят от видового состава древостоя, то и процесс его разложения имеет соответствующие

особенности. Показано, что динамика содержания элементов при разложении опада на горе Везувий у четырех различных видов сосны (*Pinus pinea*, *P. laricio*, *P. sylvestris* и *P. nigra*) в основном регулируется их исходным содержанием. Так, опад *P. nigra*, самый богатый азотом, высвобождал N во время разложения. Калий накапливался в опаде *P. sylvestris*, а Mn в опаде *P. nigra* и *P. pinea*, у которых наблюдались наименьшие начальные концентрации K и Mn соответственно (De Marco et al., 2007). Опад хвои ели, характеризующийся более высоким содержанием элементов питания и более узкими отношениями C : N и лигнин : N, в течение двух лет разлагался заметно быстрее, чем опад хвои сосны. При этом опад листьев березы повислой (*Betula pendula*), произрастающей в сосновых лесах и характеризующейся более низким соотношением N : P, разлагается быстрее по сравнению с опадом березы пушистой (*B. pubescens*) в еловых лесах (Иванова и др., 2019). В прибрежных лесах Британской Колумбии опад виноградного клена с более высокими концентрациями N, P, Ca, Mg, K, Fe и Zn разлагался значительно быстрее, чем опад хвойных (Ogden, Schmidt, 1997). Однако же скорость деструкции чистой целлюлозы выше в ельниках-пихтарниках по сравнению с березняками (Воробейчик, Пищулин, 2011). Подчиненные лиственные растения с резко

контрастирующими характеристиками питания и водоотдачи по сравнению с доминирующими вечнозелеными растениями значительно повлияли на разложение подстилки на уровне сообщества, несмотря на их низкую численность (Guo et al., 2020).

Ряд экспериментов в разных типах наземных экосистем показал: процесс разложения зависит от фракционного состава поступающего опада (Бобкова, 2000; Fang et al., 2015). В ненарушенных древостоях 40-летних культур Сибири в годичном цикле разложения максимальной потерей массы характеризуются насаждения древесных видов, ежегодно сбрасывающих листву (хвою): лиственница, осина и береза (Решетникова, 2011; Ведрова, Решетникова, 2014).

Во многих работах показано влияние исходного качества опада, определяемого концентрациями элементов питания, тяжелых металлов, соотношениями элементов, на скорость разложения (Berg, 2000; Wardle et al., 2003; De Marco et al., 2007; Zhang et al., 2008; Berg, McClaugherty, 2008; Rahman et al., 2013; Tu et al., 2014; Lukina et al., 2017; Иванова и др., 2019). Опад с более высоким содержанием азота разлагается быстрее, чем с низкими концентрациями азота и высокими концентрациями лигнина (Wardle et al., 2003). Соответственно этому, стехиометрические отношения C : N и лигнин : N

в растительных остатках оказывают значительное влияние на разложение: чем эти отношения уже, тем скорость разложения выше (Berg, McClaugherty, 2008; Lukina et al., 2017; Иванова и др., 2019). На ранних этапах разложения азот оказывает стимулирующее действие, а на более поздних, напротив, ингибирует скорость разложения, при этом существенное положительное воздействие оказывают Ca и Mn (Berg, 2000; Berg, Meentemeyer, 2001; Davey et al., 2007; Berg, 2014). Некоторые авторы рассматривали избыточное поступление одного из элементов, чаще всего азота. Tu et al. (2014) выяснили, что высокое поступление азота снижает темпы разложения в лесах, а масса неразложившегося опада тесно связана с остаточным лигнином во время процесса разложения в течение периода исследования. На ранних стадиях разложения питательные вещества, такие как азот и фосфор, и водорастворимые органические соединения оказывают наибольшие эффекты, тогда как на более поздних стадиях лигнин является основным детерминантом динамики разложения (Rahman et al., 2013). Внешение минерального азота или смешивание опада разного качества, выраженного в соотношении C : N и содержании N, увеличивало интенсивность минерализации бедных азотом фракций опада и ингибировало выделение CO₂ при разложении опада с высоким

содержанием азота (Bonanomi et al., 2014; Ларионова и др., 2017). В условиях инкубационного эксперимента хлорид и сульфат натрия проявляли ингибирующий эффект на биоту, участвующую в деструкции опада березы, и, напротив, при обработке опада растворами солей железа наблюдалось увеличение минерализационной активности биоты (Смирнова и др., 2017).

Изменение химического состава растительных остатков в ходе разложения

В процессе минерализации растительного материала наблюдаются изменения химического состава. Опад хвои сосны и ели на начальных стадиях разложения (до 165 сут.) выделяет монотерпеновые углеводороды в газовой фазе со скоростью, сопоставимой с выбросами из живой хвои этих деревьев (Isidorov et al., 2010). В ненарушенных древостоях 40-летних культур Сибири по мере разложения растительных остатков содержание углерода, P и K в них уменьшается, а концентрация Mg увеличивается (Решетникова, 2011). Изменения в содержании элементов могут быть связаны между собой. На высокогорных участках Канады от субарктического до прохладно-умеренного в процессе разложения опада ассимилирующих органов деревьев N обычно удерживался в разлагающемся опаде до тех пор, пока не оставалось

около 50% исходного C. Пиковое содержание N в подстилке наблюдалось на уровне от 72 до 99% от исходного оставшегося C с отношениями C : N от 37 до 71. Скорость потери фосфора обратно коррелировала с исходной концентрацией фосфора в опаде, которая варьировалась от 0.02 до 0.13%. Наблюдалась тенденция к более высокому удержанию азота и фосфора при разложении в опаде на участках с более низким соотношением C : N и N : P соответственно (Moore et al., 2006). По мере разложения листового/хвойного опада показано увеличение концентрации Ca, за которым часто следовало снижение. При этом максимальные концентрации кальция положительно связаны с содержанием марганца и отрицательно — с азотом, которые могут оказывать прямое влияние на скорость деструкции (Berg et al., 2017).

Сезонность и пространственная изменчивость разложения древесного опада

Сезонные и пространственные особенности разложения, в свою очередь, во многом зависят от активности почвенных деструкторов и влияния деревьев: в зимний период процесс сильно замедляется (Воробьева, Наумова, 2009). Потери массы опада в ельниках и сосняках были выше между крон деревьев по сравнению с подкороновыми пространствами (Lukina et al., 2017;

Иванова и др., 2019), но скорость деградации чистой целлюлозы выше в ельниках-пихтарниках и березняках под кронами деревьев по сравнению с окнами в древостое (Воробейчик, Пищулин, 2011).

Антропогенные факторы, влияющие на процессы разложения древесного опада

Управление лесами может изменять скорость разложения и круговорота элементов. В буковых и еловых лесах, характеризующихся высокой интенсивностью лесопользования, наблюдались более высокие скорости разложения опада и высвобождения большинства элементов питания, чем в неуправляемых лиственных лесах (Purahong et al., 2014). На плантации китайской сосны (*Pinus tabulaeformis* Carriere) N при разложении опада накапливался до тех пор, пока не достиглось отношение кислотнегидролизуемых остатков к азоту (приблизительно 57-69). При этом прореживание ускоряло разложение бедного азотом опада, а также увеличивало аккумуляцию азота (Chen et al., 2014). На 4-6-летних вырубках после сплошнолесосечной рубки ельников средней тайги за первый год наибольшая скорость деградации наблюдалась у листьев березы, тогда как для хвойных и сосны увеличение темпов разложения наблюдалось на второй год

эксперимента. Компоненты древесного опада, относящиеся к неактивной фракции (ветви, кора, шишки), распадались очень медленно (Лиханова, 2014). В поспирогенном лиственничнике (через 12 лет после пожара) на начальных этапах деградации опада, как и в контрольном, максимальные потери наблюдались в первые 75 дней эксперимента, а скорость разложения в исследуемых лесных экосистемах убывала в ряду: трава-листья-хвоя-ветви (Абрамова и др., 2018).

Наибольшие изменения в процессе деградации опада приносит фактор воздушного промышленного загрязнения. В зоне воздействия аэротехногенных выбросов медеплавильного завода в древостоях южной тайги доля слаборазложившихся валежных стволов была увеличена по сравнению с фоновой территорией, что свидетельствовало о сильном торможении деградации древесных остатков (Бергман, Воробейчик, 2017). Загрязнение почвы тяжелыми металлами (Cu, Pb, Cd, Zn) снизило скорость деградации целлюлозы в ельниках-пихтарниках и березняках в 2.7-5.4 раза (Воробейчик, Пищулин, 2011). Применение дендрохронологического датирования и экспоненциальной модели разложения позволило определить, что загрязнение привело к снижению константы скорости разложения древесины на 16-60% (Dulya et al., 2019). В зоне

воздействия медно-никелевого завода в Садбери (Онтарио) наблюдалось снижение скорости разложения опада (Freedman, Hutchinson, 1980). Там же в период значительного сокращения выбросов по-прежнему наблюдалось снижение скорости разложения опада листьев белой березы (*Betula papyrifera* Marshall), зафиксировано увеличение содержания Cu и Ni в опаде в процессе разложения, что свидетельствовало о том, что поступление в атмосферу Cu и Ni с плавильных заводов в Садбери на момент проведения эксперимента в 1999–2001 оставалось достаточно высокими, чтобы отрицательно влиять на процессы деструкции (Johnson, Hale, 2004). Опад хвои сосны обыкновенной в 0.5 км от медеплавильного завода Оутукумпу в регионе Харьявалта на юго-западе Финляндии имел самые низкие темпы потери массы – 28.1%, тогда как в фоне они составили за все время 37.9%. Кроме того, в зоне воздействия выбросов наблюдалось накопление меди и никеля и уменьшение соотношения углерод/азот за все время (McEnroe, Helmisaari, 2001). В Бельгии на песчаных почвах, загрязненных металлами, наблюдали изменение химического состава в процессе разложения: образцы с изначально низким содержанием металлов обогащались Cd и Zn, а для образцов с высоким наблюдались потери металлов (Van Nevel et al., 2014).

Вблизи комбината «Североникель» в окрестностях г. Мончегорска выявлено снижение темпов деструкции листьев березы (Kozlov, Zvereva, 2015); в еловых и сосновых лесах отмечалось снижение скорости разложения опада, связанное со снижением его качества: повышенным исходным содержанием тяжелых металлов Ni и Cu, низким содержанием элементов питания и расширением соотношения лигнин : N, C : N в опаде. Кроме того, в процессе разложения растительные остатки в ельниках и сосняках более интенсивно по сравнению с фоном теряли Ca, Mn, K и Mg и накапливали лигнин, Al, Fe, Ni и Cu (Lukina et al., 2017; Иванова и др., 2019).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Древесный опад выступает в роли связующего звена между древесной растительностью и почвой. Данные о содержании элементов в опаде с учетом его количества позволяют оценить объемы их поступления в почву и предсказать скорость разложения, в процессе которого элементы высвобождаются и вновь вовлекаются в биогеохимические циклы. В последние десятилетия активно исследовались факторы, влияющие на процессы формирования и разложения опада с учетом продуцирующих (-го) видов. При всей изученности количественных и качествен-

ных характеристик древесного опада и процессов его разложения и минерализации недостаточно изучены особенности пространственной и сезонной изменчивости этих параметров и процессов. Недостаточно исследований посвящены изучению древесного опада в условиях воздействия точечных источников воздушного загрязнения – предприятий металлургического комплекса, ТЭЦ, АЭС и других. Для понимания процессов адаптации лесных экосистем к изменениям климата, изменчивости экосистемных функций лесов необходимы исследования изменчивости размеров, фракционного состава, химического состава и процессов разложения древесного опада с учетом сезонной и пространственной вариабельности (мозаичности лесного покрова) в условиях комбинированно-

го действия природных и антропогенных факторов, в том числе атмосферного загрязнения. Это позволит совершенствовать прогнозы дальнейших изменений в лесных экосистемах и выработать рекомендации по оптимизации производственных процессов для уменьшения влияния на лесные экосистемы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнялось в рамках Государственного задания Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН № 0226-2018-0111 (АААА-А18-118021490070-5) и частично по Договору № Д-1087.2021 «Комплексные исследования лесов Российской Арктики с целью повышения их продуктивности и сохранения экосистемных функций».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова Е. Р., Брянин С. В., Кондратова А. В. Разложение опада в постпирогенных лиственничниках хребта Тукурингра (Верхнее Приамурье) // Сибирский лесной журнал. 2018. № 2. С. 71–77.
- Алексеева А. А., Степанова С. В. Применение листового опада в качестве сорбционного материала для ликвидации аварийных нефтяных разливов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. Сорбционная очистка от вредных примесей. 2015. № 7. С. 9–13.
- Артемкина Н. А. Содержание лигнина и целлюлозы в опаде и подстилке ненарушенных и подверженных техногенному загрязнению северо-таежных сосновых лесов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 418–421.
- Архипов Е. В. Динамика накопления лесных горючих материалов в сосновых лесах Казахского мелкосопочника // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 9 (119). С. 64–68.

- Базилевич Н. И., Титлянова А. А., Смирнов В. В., Родин Л. Е., Нечаева Н. Т., Левин Ф. И. Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах / под ред. А. А. Роде. М.: Мысль, 1978. 185 с.
- Бергман И. Е., Воробейчик Е. Л. Влияние выбросов медеплавильного завода на формирование запаса и разложение крупных древесных остатков в елово-пихтовых лесах // Лесоведение. 2017. № 1. С. 24–38.
- Бессонова В. П., Немченко М. В., Ткач В. В. Запас макроэлементов (Р, К, Са, Mg) и азота в опаде и подстилке в противоэрозионном насаждении *Robinia pseudoacacia* L. // Вестник Донского государственного аграрного университета. 2017. Вып. № 1 (23.1). Ч. 1. Сельскохозяйственные науки. С. 42–50.
- Бобкова К. С. Роль лесной подстилки в функционировании хвойных экосистем Европейского Севера // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. 2000. № 9 (35) URL: <https://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/00-35/05.html> (дата обращения 21.07.2021).
- Боев В. А., Барановская Н. В., Боев В. В. Ртуть в листовом опаде подтаежных лесов на фоновой территории // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 8. С. 124–131.
- Болдескул А. Г., Кудрявцева Е. П., Аржанова В. С. Роль древесных видов в процессах функционирования ландшафтов чернопихтово-широколиственных лесов Южного Приморья // Сибирский экологический журнал. 2015. № 3. С. 355–362.
- Бондарева Л. Г., Рубайло А. И. Новые данные уровня загрязнения аэрозольными выпадениями трития в ближней зоне влияния горно-химического комбината ГК Росатома // Доклады академии наук. 2016. Т. 467. № 1. С. 67–70.
- Брянин С. В., Абрамова Е. Р. Опад фитомассы в постпирогенных лиственныхниках Зейского заповедника (Верхнее Приамурье) // Сибирский лесной журнал. 2017. № 2. С. 93–101.
- Ведрова Э. Ф., Решетникова Т. В. Масса подстилки и интенсивность ее разложения в 40-летних культурах основных лесообразующих пород Сибири // Лесоведение. 2014. № 1. С. 42–50.
- Воробейчик Е. Л., Пищулин П. Г. Влияние отдельных деревьев на pH и содержание тяжелых металлов в лесной подстилке в условиях промышленного загрязнения // Почвоведение. 2009. № 8. С. 927–939.
- Воробейчик Е. Л., Пищулин П. Г. Влияние деревьев на скорость деструкции целлюлозы в почвах в условиях промышленного загрязнения // Почвоведение. 2011. № 5. С. 597–610.

- Воробейчик Е. Л., Пищулин П. Г. Промышленное загрязнение снижает роль деревьев в формировании структуры полей концентраций тяжелых металлов в лесной подстилке // Экология. 2016. № 5. С. 323–334.
- Воробейчик Е. Л., Трубина М. Р., Хантемирова Е. В., Бергман И. Е. Многолетняя динамика лесной растительности в период сокращения выбросов медеплавильного завода // Экология. 2014. № 6. С. 448–458.
- Воробьева И. Г., Наумова А. Н. Интенсивность процесса деструкции растительного опада в почвах сухих местообитаний // Продуктивность и устойчивость лесных почв: М-лы III междунар. конф., г. Петрозаводск, 7–11 сентября 2009 г. Петрозаводск: Изд-во Карельского НЦ РАН, 2009. С. 192–195.
- Данилова Е. Г., Степанова С. В. Переработка березового опада с целью получения товарного продукта (целлюлозы) // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 7. С. 37–40.
- Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2014 году. Мурманск: Министерство природных ресурсов и экологии Мурманской области, 2015. 177 с.
- Ермакова О. Д. Структура и динамика опада листопадных пород в древостоях северного макросклона хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 1 (3). С. 377–380.
- Забоева И. В. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар: Коми книжное изд-во, 1975. 344 с.
- Зенкова И. В. Структура сообществ беспозвоночных животных в лесных подзолах Кольского полуострова: Дисс. ... канд. биол. наук (спец. 03.02.08). Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2000. 156 с.
- Иванова А. Е., Николаева В. В., Марфенина О. Е. Изменение целлюлозолитической активности городских почв в связи с изъятием растительного опада (на примере Москвы) // Почвоведение. 2015. № 5. С. 562–570.
- Иванова Е. А., Лукина Н. В. Варьирование массы и фракционного состава древесного опада в сосняках кустарничково-лишайниковых при аэротехногенном загрязнении // Лесоведение. 2017. № 5. С. 47–58
- Иванова Е. А., Лукина Н. В., Данилова М. А., Артемкина Н. А., Смирнов В. Э., Ершов В. В., Исаева Л. Г. Влияние аэротехногенного загрязнения на скорость разложения растительных остатков в сосновых лесах на северном пределе распространения // Лесоведение. 2019. № 6. С. 533–546.
- Казимиров Н. И., Морозова Р. М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука, 1973. 175 с.
- Карпачевский Л. О., Воронин А. Д., Дмитриев Е. А., Строганова М. Н., Шоба С. А.

- Почвенно-биогеоценотические исследования в лесных биогеоценозах. М.: изд-во Московского университета, 1980. 160 с.
- Колмогорова Е. Ю., Уфимцев В. И.* Некоторые особенности химического состава опада сосны обыкновенной, произрастающей в условиях породного отвала // Успехи современного естествознания. 2018. № 11. Ч. 2. С. 267–272.
- Комиссаров М. А., Огура Ш.* Распределение и миграция радиоцезия в склоновых ландшафтах через 3 года после аварии на АЭС Фукусима-1 // Почвоведение. 2017. № 7. С. 886–896.
- Копылова Л. Ю.* Накопление тяжелых металлов в древесных растениях на урбанизированных территориях восточного Забайкалья. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. (спец. 03.02.08). Улан-Удэ, 2012. 24 с.
- Кузнецов М. А.* Влияние условий разложения и состава опада на характеристики и запас подстилки в среднетаежном чернично-сфагновом ельнике // Лесоведение. 2010. № 6. С. 54–60.
- Кузнецов М. А., Осипов А. Ф.* Растительный опад как компонент биологического круговорота углерода в заболоченных хвойных сообществах средней тайги // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 9. С. 10–12.
- 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.
- Лиханова Н. В.* Роль растительного опада в формировании лесной подстилки на вырубках ельников средней тайги // Известия вузов. Лесной журнал. 2014. № 3. С. 52–66.
- Лукина Н. В., Никонов В. В.* Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения: в 2-х ч. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996 Ч. 1. 213 с.; Ч. 2. 192 с.
- Лукина Н. В., Никонов В. В.* Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 1998. 316 с.
- Лукина Н. В., Полянская Л. М., Орлова М. А.* Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 342 с.
- Манатов К. Н., Никонов В. В.* Биологический круговорот минеральных элементов и почвообразование в ельниках Крайнего Севера. Л.: Наука, 1981. 196 с.
- Мироненко Л. М.* Особенности биологического круговорота в древостоях некоторых лесообразующих пород Северной Евразии: математическое исследование // Пятая национальная научная конференция с международным участием «Математическое моделирование в экологии» ЭкоМат-Мод-2017. г. Пущино, 16–20 октября

- 2017 г. Пущино: ИФХиБПП РАН, 2017. С. 125–127.
- Некрасова Т. П. Семенные годы и проблема прогноза урожая у хвойных древесных пород // Труды по лесному хозяйству. Западно-Сибирский филиал АН СССР. Новосибирск: НТО-Леспром, Новосибирское отделение, 1957. Вып. 3. С. 185–191.
- Никонов В. В., Лукина Н. В., Безель В. С., Бельский Е. А., Беспалова А. Ю., ..., Яценко-Хмелевская М. А. Рассеянные элементы в бореальных лесах. М.: Наука, 2004. 616 с.
- Никонов В. В., Лукина Н. В., Полянская Л. М., Паникова А. Н. Особенности распространения микроорганизмов в Al-Fe-гумусовых подзолах северотаежных еловых лесов: природные и техногенные аспекты // Микробиология. 2001. Т. 70. № 3. С. 319–328.
- Осипов А. Ф. Запасы и потоки органического углерода в экосистеме спелого сосняка черничного средней тайги // Сибирский лесной журнал. 2017. № 2. С. 70–80.
- Петроченко К. А., Куровский А. В., Бабенко А. С., Якимов Ю. Е. Вермикомпост на основе листового опада – перспективное кальциевое удобрение // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2015. № 2 (30). С. 20–34.
- Полянская Л. М., Никонов В. В., Лукина Н. В., Паникова А. Н., Звягинцев В. Г. Микроорганизмы Al-Fe-гумусовых подзолов сосняков лишайниковых в условиях аэротехногенного загрязнения // Почвоведение. 2001. № 2. С. 215–226.
- Помогайбин Е. А., Помогайбин А. В. Влияние деревьев рода *Juglans L.* на целлюлозоразрушающую активность почвы в условиях дендрария ботанического сада Самарского университета // Самарский научный вестник. 2018. Т. 7. № 1 (22). С. 105–109.
- Рахлеева А. А., Семенова Т. А., Стриганова Б. Р., Терехова В. А. Динамика зоомикробных комплексов при разложении растительного опада в ельниках Южной тайги // Почвоведение. 2011. № 1. С. 44–55.
- Решетникова Т. В. Лесные подстилки как депо биогенных элементов // Вестник КрасГАУ. 2011. № 12. С. 74–81.
- Родин Л. Е., Ремезов Н. П., Базилович Н. И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1967. 145 с.
- Руководство по комплексному мониторингу. Перевод с английского. М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2013. 153 с.
- Свергузова С. В., Сапронова Ж. А., Священченко А. В. Использование листового опада каштанов для извлечения ионов никеля из растворов // Сб. докл. III Международ. науч.-тех. конф. «Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды».

- Белгород, 14–15 ноября 2017 г. Белгород: Изд-во «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», 2017. С. 84–89.
- Силайчева М. В., Степанова С. В. Изучение возможности многократного использования кленового опада в качестве сорбционного материала для очистки модельной воды от ионов железа (II) // Достижения вузовской науки. Экология и науки о земле. 2016. № 23. С. 230–235.
- Смирнова Н. В., Тиунов А. В., Нечаева Т. В., Худяев С. А., Крутень В. С., Любечанский И. И. Влияние солей натрия и железа на минерализацию опада березы в инкубационном эксперименте // Сб. материалов Всеросс. науч. конф. с междунар. участием, посвященной 110-летию выдающегося организатора науки и первого директора ИПА СО РАН Р. В. Ковалева «Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века». Новосибирск, 4–8 декабря 2017 г. / отв. ред. А. И. Сысо. Томск: Изд. дом Томского государственного университета, 2017. Ч. I. С. 254–257.
- Собачкин Р. С., Ковалева Н. М., Петренко А. Е., Собачкин Д. С. Структура горючих материалов в сосняках разного возраста Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2017. № 6. С. 431–436.
- Ставрова Н. И. Влияние атмосферного загрязнения на семеношение хвойных пород // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. С. 115–121.
- Сухарева Т. А., Лукина Н. В. Минеральный состав ассимилирующих органов хвойных деревьев после снижения уровня атмосферного загрязнения на Кольском полуострове // Экология. 2014. № 2. С. 97–104.
- Тарханов С. Н. Поврежденность хвойных древостоев устья и дельты Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 1–3. С. 394–399.
- Уфимцев В. И., Егорова И. Н. Роль растительного опада в формировании фитогенных полей сосны обыкновенной на техногенных элювиях Кузбасса // Успехи современного естествознания. 2016. № 4. С. 116–120.
- Фомичева О. А., Полянская Л. М., Никонов В. В., Лукина Н. В., Орлова М. А., Исаева Л. Г. Численность и биомасса почвенных микроорганизмов в старовозрастных коренных еловых лесах северной тайги // Почвоведение. 2006. № 12. С. 1469–1478.
- Цандекова О. Л. Динамика накопления золы в опаде *Asper pedundo* L. в условиях нарушенных пойменных фитоценозов // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. № 12. С. 148–152.
- Цветков В. Ф., Цветков И. В. Лес в условиях аэротехногенного загрязнения. Архангельск: Кн. изд-во, 2003. 354 с.

- Цветков В. Ф., Цветков И. В. Промышленное загрязнение окружающей среды и лес. Архангельск: Изд-во Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова, 2012. 312 с.
- Черненкова Т. В., Королева Н. Е., Боровичев Е. А., Мелехин А. В. Изменение организации лесного покрова макросклонов к озеру Имандра в условиях техногенного загрязнения // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 12. С. 3–24.
- Черненкова Т. В., Бочкарев Ю. Н., Фридрих М., Беттгер Т. Воздействие природно-антропогенных факторов на радиальный прирост деревьев Кольского Севера // Лесоведение. 2012. № 4. С. 3–15.
- Чульдиене Д., Алейниковиене Ю., Мурашкиене М., Марозас В., Армолайтис К. Распад и сохранность органических соединений и питательных элементов в листовом опаде после зимнего сезона под лесопосадками лиственницы европейской, бука обыкновенного и дуба красного в Литве // Почвоведение. 2017. № 1. С. 53–63.
- Шаймарданова А. Ш., Степанова С. В., Шайхиев И. Г. Исследование возможности многократного использования листового опада в качестве сорбционного материала по отношению к ионам железа // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. № 7. С. 164–172.
- Шпаковская И. М., Рожак В. П. Динамика древесного опада в лесных экосистемах Стрийско-Санской Верховины (Украинские Карпаты) // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2014. Вып. 1. С. 175–179.
- Юсупов И. А., Залесов С. В., Шавнин С. А., Луганский Н. А. Особенности динамики и структуры древесного опада в сосновых молодняках в зоне действия аэропромвыбросов на Среднем Урале // Леса Урала и хозяйство в них: сб. науч. тр. Екатеринбург: Изд-во УГЛТА. 1995. Вып. 18. С. 59–74.
- Ярмишко В. Т., Лянгузова И. В. Многолетняя динамика параметров и состояния хвои *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения на Европейском Севере // Известия СПбЛТА. 2013. № 2 (203). С. 30–46.
- Albrektson A. Needle litterfall in stands of *Pinus sylvestris* L. in Sweden, in relation to site quality, stand age, and latitude // Scandinavian Journal of Forest Research. 1988. No. 3. P. 333–342.
- Aponte C., García L. V., Marañón T. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 309. P. 36–46.
- Becker H., Aosaar J., Varik M., Morozov G., Aun K., Mander Ü., Soosaar K., Uri V. Annual net nitrogen mineralization and litter flux in well-drained downy birch, Norway spruce and Scots pine

- forest ecosystems // *Silva Fennica*. 2018. Vol. 52. No. 4. Article 10013.
- Belote R. T., Jones R. H.* Tree leaf litter composition and nonnative earthworms influence plant invasion in experimental forest floor mesocosms // *Biological Invasions*. 2009. Vol. 11. Iss. 4. P. 1045–1052.
- Berg B.* Decomposition patterns for foliar litter – A theory for influencing factors // *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. Vol. 78. P. 222–232.
- Berg B.* Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils // *Forest Ecology and Management*. 2000. Vol. 133. P. 13–22.
- Berg B., Albrektson A., Berg M. P., Cortina J., Johansson M.-B., Gallardo A., Mgadeira M., Pausas J., Kiratz W., Vallejo R., McClaugherty C.* Amounts of litter fall in some pine forests in European transect, in particular Scots pine // *Annals of Forest Science*. 1999. Vol. 56. P. 625–639.
- Berg B., Berg M. P., Bottner P., Box E., Brey Meyer A., Ca de Anta R., Couteaux M., Escudero A., Gallardo A., Kratz W., Madeira M., Mälkönen E., McClaugherty C., Meentemeyer V., Muñoz F., Piussi P., Remacle J., Vi de Santo A.* Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality // *Biogeochemistry*. 1993. Vol. 20. Iss. 3. P. 127–159.
- Berg B., Johansson M.-B., Liu C., Faituri M., Sanborn P., Vesterdal L., Ni X., Hansen K., Ukonmaanaho L.* Calcium in decomposing foliar litter – A synthesis for boreal and temperate coniferous forests // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 403. P. 137–144.
- Berg B., McClaugherty C.* Plant litter – decomposition, humus formation, carbon sequestration, 2nd ed. Edt.: B. Berg, C. McClaugherty. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 340 p.
- Berg B., Meentemeyer V.* Litter fall in some European coniferous forests as dependent on climate: a synthesis // *Canadian Journal of Forest Research*. 2001. Vol. 31. P. 292–301.
- Blanco J. A., Bosco Imbert J., Castillo F. J.* Thinning affects *Pinus sylvestris* needle decomposition rates and chemistry differently depending on site conditions // *Biogeochemistry*. 2011. Vol. 106. Iss. 3. P. 397–414.
- Bonanomi G., Capodilupo M., Incerti G., Mazzoleni S.* Nitrogen transfer in litter mixture enhances decomposition rate, temperature sensitivity, and C quality changes // *Plant Soil*. 2014. Vol. 381. Iss. 1–2. P. 307–321.
- Bradford M. A., Berg B., Maynard D. S., Wieder W. R., Wood S. A.* Understanding the dominant controls on litter decomposition // *Journal of Ecology*. 2016. No. 104. Iss. 1. P. 229–238.
- Bray J. R., Gorham E.* Litter production in forests of the world // *Advances in Ecological Research*. London: Academic Press. 1964. Vol. 2. P. 101–157.

- Brovkin V., van Bodegom P. M., Kleinen T., Wirth C., Cornwell W. K., Cornelissen J. H. C., Kattge J.* Plant-driven variation in decomposition rates improves projections of global litter stock distribution // *Biogeosciences*. 2012. Vol. 9. Iss. 1. P. 565–576.
- Chavez-Vergara B., Merino A., Vázquez-Marrufo G., García-Oliva F.* Organic matter dynamics and microbial activity during decomposition of forest floor under two native neotropical oak species in a temperate deciduous forest in Mexico // *Geoderma*. 2014. Vol. 235–236. P. 133–145.
- Chen X., Page-Dumroese D., Lv R., Wang W., Li G., Liu Y.* Interaction of initial litter quality and thinning intensity on litter decomposition rate, nitrogen accumulation and release in a pine plantation // *Silva Fennica*. 2014. Vol. 48. No. 4. Article 1211.
- Davey M. P., Berg B., Emmett B. A., Rowland P.* Decomposition of oak leaf litter is related to initial litter Mn concentrations // *Canadian Journal of Botany*. 2007. Vol. 85. Iss. 1. P. 16–24.
- De Marco A., Vittozzi P., Rutigliano F. A., Virzo de Santo A.* Nutrient dynamics during decomposition of four different pine litters [in:] *Proceedings of the international workshop MEDPINE 3: conservation, regeneration and restoration of Mediterranean pines and their ecosystems* (eds. V. Leone, R. Lovreglio). Bari: CIHEAM, 2007. P. 73–77.
- De Weirdt M., Verbeeck H., Maignan F., Peylin P., Poulter B., Bonal D., Ciais P., Steppe K.* Seasonal leaf dynamics for tropical evergreen forests in a process-based global ecosystem model // *Geoscientific Model Development*. 2012. Vol. 5. Iss. 5. P. 1091–1108.
- Dearden F. M., Dehlin H., Wardle D. A., Nilsson M.-C.* Changes in the ratio of twig to foliage in litterfall with species composition, and consequences for decomposition across a long term chronosequence // *Oikos*. 2006. Vol. 115. Iss. 3. P. 453–462.
- Derome J., Lindroos A.-J.* Effects of heavy metal contamination on macronutrient availability and acidification parameters in forest soil in the vicinity of the Harjavalta Cu-Ni smelter, SW Finland // *Environmental Pollution*. 1998. Vol. 99. Iss. 2. P. 225–232.
- Dulya O. V., Bergman I. E., Kukarskih V. V., Vorobeichik E. L., Smirnov G. Yu., Mikryukov V. S.* Pollution-induced slowdown of coarse woody debris decomposition differs between two coniferous tree species // *Forest Ecology and Management*. 2019. Vol. 448. P. 312–320.
- Dupuy J. M., Chazdon R. L.* Interacting effects of canopy gap, understory vegetation and leaf litter on tree seedling recruitment and composition in tropical secondary forests // *Forest Ecology and Management*. 2008. Vol. 255. P. 3716–3725.

- Fang X., Zhao L., Zhou G., Huang W., Liu J.* Increased litter input increases litter decomposition and soil respiration but has minor effects on soil organic carbon in subtropical forests // *Plant Soil*. 2015. Vol. 392. P. 139–153.
- Flower-Ellis J. G. K.* Litterfall in an age series of Scots pine stands: Summary of results for the period 1973–1983. Department of Ecology and Environmental Research. Swedish University of Agricultural Sciences. 1985. Rep. 19. P. 75–94.
- Freedman B., Hutchinson T. C.* Effects of smelter pollutants on forest leaf litter decomposition near a nickel–copper smelter at Sudbury, Ontario // *Canadian Journal of Botany*. 1980. Vol. 58. No. 15. P. 1722–1736.
- Guo C., Cornelissen J. H. C., Tuo B., Ci H., Yan E.-R.* Non-negligible contribution of subordinates in community-level litter decomposition: Deciduous trees in an evergreen world // *Journal of Ecology*. 2020. Vol. 108. Iss. 4. P. 1713–1724.
- Hale B., Robertson P.* Plant community and litter composition in temperate deciduous woodlots along two field gradients of soil Ni, Cu and Co concentrations // *Environmental Pollution*. 2016. Vol. 212. P. 41–47.
- Hilli S.* Significance of litter production of forest stands and ground vegetation in the formation of organic matter and storage of carbon in boreal coniferous forests [in:] *Forest condition monitoring in Finland – National report* (Eds. P. Merilä, S. Jortikka). The Finnish Forest Research Institute, 2013. URL: <http://www.metla.fi/metinfo/forest-condition/projects/litter.htm> (June 21, 2021)
- Högberg P., Näsholm T., Franklin O., Högberg M. N.* Tamm Review: On the nature of the nitrogen limitation to plant growth in Fennoscandian boreal forests // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 403. P. 161–185.
- Ilvesniemi H., Levula J., Ojansuu R., Kolari P., Kulmala L., Pumpanen J., Launiainen S., Vesala T., Nikinmaa E.* Long-term measurements of the carbon balance of a boreal Scots pine dominated forest ecosystem // *Boreal Environment Research*. Helsinki. 2009. Vol. 14. P. 731–753.
- Isidorov V. A., Smolewska M., Purzyńska-Pugacewicz A., Tyszkiewicz Z.* Chemical composition of volatile and extractive compounds of pine and spruce leaf litter in the initial stages of decomposition // *Biogeosciences*. 2010. Vol. 7. Iss. 9. P. 2785–2794.
- Johnson D., Hale B.* White birch (*Betula papyrifera* Marshall) foliar litter decomposition in relation to trace metal atmospheric inputs at metal-contaminated and uncontaminated sites near Sudbury, Ontario and Rouyn-Noranda, Quebec, Canada // *Environmental Pollution*. 2004. Vol. 127. Iss. 1. P. 65–72.
- Jonczak J., Parzych A.* The content of heavy metals in the soil and litterfall in a beech-pine-spruce stand in northern Poland //

- Archives of environmental protection. 2014. Vol. 40. No. 4. P. 67–77.
- Kiikkilä O.* Heavy-metal pollution and remediation of forest soil around the Harjavalta Cu-Ni smelter, in SW Finland // *Silva Fennica*. 2003. Vol. 37. No. 3. P. 399–415.
- Kopáček J., Cudlín P., Fluksová H., Kaňa J., Pícek T., Šantrůčková H., Svoboda M., Vaněk D.* Dynamics and composition of litterfall in an unmanaged Norway spruce (*Picea abies*) forest after bark-beetle outbreak // *Boreal Environment Research*. 2015. Vol. 20. No. 3. P. 305–323.
- Kopáček J., Cudlín P., Svoboda M., Chmelikova E., Kaňa J., Pícek T.* Composition of Norway spruce litter and foliage in atmospherically acidified and nitrogen-saturated Bohemian Forest stands, Czech Republic // *Boreal Environment Research*. 2010. Vol. 15. No. 4. P. 413–426.
- Kouki J., Hokkanen Y.* Long-term needle litterfall of a Scots pine *Pinus sylvestris* stand: relation to temperature factors // *Oecologia*. 1992. No. 89. P. 176–181.
- Kozlov M., Zvereva E.* Decomposition of birch leaves in heavily polluted industrial barrens: relative importance of leaf quality and site of exposure // *Environmental Science & Pollution Research*. 2015. Vol. 22. Iss. 13. P. 9943–9950.
- Krishna M. P., Mohan M.* Litter decomposition in forest ecosystems: a review // *Energy, Ecology and Environment*. 2017. V. 2. Iss. 4. P. 236–249.
- Lamppu J., Huttunen S.* Relations between Scots pine needle element concentrations and decreased needle longevity along pollution gradients // *Environmental Pollution*. 2003. Vol. 122. Iss. 1. P. 119–126.
- Lenthonen A., Lindholm M., Hokkanen T., Salminen H., Jalkanen R.* Testing dependence between growth and needle litterfall in Scots pine – a case study in northern Finland // *Tree Physiology*. Canada: Heron Publishing—Victoria. 2008. Vol. 28. P. 1741–1749.
- Liu C., Duan C., Meng X., Yue M., Zhang H., Wang P., Xiao Y., Hou Z., Wang Y., Pan Y.* Cadmium pollution alters earthworm activity and thus leaf-litter decomposition and soil properties // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 267. Article 115410.
- Loydi A., Lohse K., Otte A., Donath T. W., Eckstein R. L.* Distribution and effects of tree leaf litter on vegetation composition and biomass in a forest–grassland ecotone // *Journal of Plant Ecology*. 2014. Vol. 7. Iss. 3. P. 264–275.
- 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. Iss. 24. P. 19874–19887.
- Lyanguzova I., Yarmishko V., Gorshkov V., Stavrova N., Bakkal I.* Impact of Heavy Metals on Forest Ecosystems of the European North of Russia [in:] Heavy Metals (eds. H. E. D. M. Saleh, R. F. Aglan). IntechOpen, 2018. P. 92.
- Marian F., Sandmann D., Krashevskaya V., Maraun M., Scheu S.* Leaf and root litter decomposition is discontinued at high altitude tropical montane rainforests contributing to carbon sequestration // Ecology and Evolution. 2017. Vol. 7. Iss. 16. P. 6432–6443.
- McEnroe N. A., Helmisaari H.-S.* Decomposition of coniferous forest litter along a heavy metal pollution gradient, south-west Finland // Environmental Pollution. 2001. Vol. 113. Iss. 1. P. 11–18.
- Meier I. C., Leuschner Ch., Hertel D.* Nutrient return with leaf litter fall in *Fagus sylvatica* forests across a soil fertility gradient // Plant Ecology. 2005. Vol. 177. Iss. 1. P. 99–112.
- Methods to study litter decomposition. A practical guide (eds. M. A. S. Graça, F. Bärlocher, M. O. Gessner) Springer, 2005. 329 p.
- Michopoulos P., Bourletsikas A., Kaoukis K.* Fluxes, stocks and availability of nitrogen in evergreen broadleaf and fir forests: similarities and differences // Journal of Forestry Research. 2020. 8 p.
- Moore T. R., Trofymow J. A., Prescott C. E., Fyles J., Titus B. D., CIDET working group.* Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing foliar litter in Canadian forests // Ecosystems. 2006. Vol. 9. No. 1. P. 46–62.
- Nakazato R. K., Lourenço I. S., Esposito M. P., Lima M. E. L., Ferreira M. L., Campos R. de O. A., Rinaldi M. C. S., Domingos M.* Trace metals at the tree-litter-soil- interface in Brazilian Atlantic Forest plots surrounded by sources of air pollution // Environmental Pollution. 2021. Vol. 268. Part A. Article 115797.
- Neumann M., Ukonmaanaho L., Johnson J., Benham S., Vesterdal L., Novotný R., Verstraeten A., Lundin L., Thimonier A., Michopoulos P., Hasenauer H.* Quantifying carbon and nutrient input from litterfall in European forests using field observations and modeling // Global Biogeochemical Cycles. 2018. Vol. 32. No. 5. P. 784–798.
- Nieminen T. M., Derome J., Helmisaari H.-S.* Interactions between precipitation and Scots pine canopies along a heavy-metal pollution gradient // Environmental Pollution 1999. Vol. 106. Iss. 1. P. 129–137.
- Nieminen T., Helmisaari H.-S.* Nutrient retranslocation in the foliage of *Pinus sylvestris* L. growing along a heavy metal pollution gradient // Tree Physiology. 1996. Vol. 16. Iss. 10. P. 825–831.
- Novák J., Dušek D., Slodičák M.* Quantity and quality of litterfall in young oak

- stands // *Journal of Forest Science*. 2014. Vol. 60. No. 6. P. 219–225.
- Ogden A. E., Schmidt M. G. Litterfall and soil characteristics in canopy gaps occupied by vine maple in a coastal western hemlock forest // *Canadian Journal of Soil Science*. 1997. Vol. 77. Iss. 4. P. 703–711.
- Pausas J. G. Litter fall and litter decomposition in *Pinus sylvestris* forests of the eastern Pyrenees // *Journal of Vegetation Science*. 1997. Vol. 8. P. 643–650.
- Pedersen L. B., Bille-Hansen J. A comparison of litterfall and element fluxes in even aged Norway spruce, sitka spruce and beech stands in Denmark // *Forest Ecology & Management*. 1999. Vol. 114. P. 55–70.
- Portillo-Estrada M., Korhonen J., Pihlatie M., Pumpanen J., Frumau A., Morillas L., Tosens T., Niinemets Ü. Inter- and intra-annual variations in canopy fine litterfall and carbon and nitrogen inputs to the forest floor in two European coniferous forests // *Annals of Forest Science*. 2013. Vol. 70. Iss. 4. P. 367–379.
- Portillo-Estrada M., Pihlatie M., Korhonen J. F. J., Levula J., Frumau A. K. F., Ibrom A., Lembrechts J. J., Morillas L., Horváth L., Jones S. K., Niinemets Ü. Climatic controls on leaf litter decomposition across European forests and grasslands revealed by reciprocal litter transplantation experiments // *Biogeosciences*. 2016. Vol. 13. P. 1621–1633.
- Preston C. M., Bhatti J. S., Flanagan L. B., Norris C. Stocks, chemistry, and sensitivity to climate change of dead organic matter along the Canadian boreal forest transect case study // *Climate Change*. 2006. Vol. 74. P. 233–251.
- Purahong W., Kapturska D., Pecyna M. J., Schulz E., Schloter M., Buscot F., Hofrichter M., Krüger D. Influence of Different Forest System Management Practices on Leaf Litter Decomposition Rates, Nutrient Dynamics and the Activity of Ligninolytic Enzymes: A Case Study from Central European Forests // *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9. Iss. 4. P. 1–11.
- Rahman M. M., Tsukamoto J., Rahman M. M., Yoneyama A., Mostafa K. M. Lignin and its effects on litter decomposition in forests ecosystems // *Chemistry & Ecology*. 2013. Vol. 29. Iss. 6. P. 540–553.
- Rautio P., Huttunen S., Lamppu J. Effects of sulphur and heavy metal deposition on foliar chemistry of Scots pines in Finnish Lapland and on the Kola Peninsula // *Chemosphere*. 1998. Vol. 36. Iss. 4. P. 979–984.
- Salemaa M., Derome J., Helmisaari H.-S., Nieminen T., Vanha-Majamaa I. Element accumulation in boreal bryophytes, lichens and vascular plants exposed to heavy metal and sulfur deposition in Finland // *Science of the Total Environment*. 2004. Vol. 324. Iss. 1–3. P. 141–160.
- Sayer E. J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems // *Biological Reviews*. 2005. Vol. 80. P. 1–31.

- Sayer E. J., Tanner E. V. J. Experimental investigation of the importance of litterfall in lowland semi-evergreen tropical forest nutrient cycling // *Journal of Ecology*. 2010. Vol. 98. No. 5. P. 1052–1062.
- Scherer-Lorenzen M., Bonilla J. L., Potvin C. Tree species richness affects litter production and decomposition rates in a tropical biodiversity experiment // *Oikos*. 2007. Vol. 116. Iss. 12. P. 2108–2124.
- Slade E. M., Riutta T. Interacting effects of leaf litter species and macrofauna on decomposition in different litter environments // *Basic and Applied Ecology*. 2012. Vol. 13. Iss. 5. P. 423–431.
- Steinnes E., Lukina N., Nikonov V., Aamlid D., Røyset O. A gradient study of 34 elements in the vicinity of a copper-nickel smelter in the Kola Peninsula // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2000. Vol. 60. Iss. 1. P. 71–88.
- Stojnić S., Kebert M., Drekić M., Galić Z., Kesić L., Tepavac A., Orlović S. Heavy Metals Content in foliar litter and branches of *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L. observed at two ICP Forests monitoring plots // *Southeast European forestry*. 2019. Vol. 10. No. 2. P. 151–157.
- Symonds J., Morris D. M., Kwiaton M. M. Effects of harvest intensity and soil moisture regime on the decomposition and release of nutrients from needle and twig litter in northwestern Ontario // *Boreal environment research*. 2013. Vol. 18. No. 5. P. 401–413.
- Trap J., Hättenschwiler S., Gattin I., Aubert M. Forest ageing: an unexpected driver of beech leaf litter quality variability in European forests with strong consequences on soil processes // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 302. P. 338–345.
- Tu L-h., Hu H-l., Chen G., Peng Y., Xiao Y-l., Hu T-x., Zhang J., Li X-w., Liu L., Tang Y. Nitrogen addition significantly affects forest litter decomposition under high levels of ambient nitrogen deposition // *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9. Iss. 2. P. 1–9.
- Ťupek B., Mäkipää R., Heikkinen J., Peltoniemi M., Ukonmaanaho L., Hokkanen T., Nöjd P., Nevalainen S., Lindgren M., Lehtonen A. Foliar turnover rates in Finland – comparing estimates from needle-cohort and litterfall-biomass methods // *Boreal Environment Research*. 2015. Vol. 20. No. 2. P. 283–304.
- Ukonmaanaho L., Merila P., Nöjd P., Nieminen T. M. Litterfall production and nutrient return to the forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland // *Boreal Environment Research*. 2008. Vol. 13 (Suppl. B). P. 67–91.
- Ukonmaanaho L., Pitman R., Bastrup-Birk A., Breda N., Rautio P. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests // Part XIII: Sampling and Analysis of Litterfall. UNECE ICP For-

- ests Programme Co-ordinating Centre, Eberswald. 2016. 15 p.
- Vacek S., Vacek Z., Bílek L., Simon J., Remeš J., Hůnová I., Král J., Putalová T., Mikeska M. Structure, regeneration and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands with respect to changing climate and environmental pollution // *Silva Fennica*. 2016. Vol. 50. No. 4. Article 1564.
- Van Nevel L., Mertens J., Demey A., De Schrijver A., De Neve S., Tack F. M. G., Verheyen K. Metal and nutrient dynamics in decomposing tree litter on a metal contaminated site // *Environmental Pollution*. 2014. Vol. 189. P. 54–62.
- Vavrova P., Penttila T., Laiho R. Decomposition of Scots pine fine woody debris in boreal conditions: Implications for estimating carbon pools and fluxes // *Forest Ecology and Management*. 2009. Vol. 257. Iss. 2. P. 401–412.
- Vesterdal L., Elberling B., Christiansen J. R., Callesen I., Schmidt I. K. Soil respiration and rates of soil carbon turnover differ among six common European tree species // *Forest Ecology and Management*. 2012. Vol. 264. P. 185–196.
- Wardle D. A., Nilsson M.-C., Zackrisson O., Gallet C. Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest // *Soil Biology and Biochemistry*. 2003. Vol. 35. Iss. 6. P. 827–835.
- Wood T. E., Lawrence D., Clark D. A. Determinants of leaf litter nutrient cycling in a tropical rain forest: soil fertility versus topography // *Ecosystems*. 2006. No. 9. P. 700–710.
- Wood T. E., Lawrence D., Clark D. A., Chazdon R. L. Rain forest nutrient cycling and productivity in response to large-scale litter manipulation // *Ecology*. 2009. Vol. 90. No. 1. P. 109–121.
- Xu S., Liu L. L., Sayer E. J. Variability of above-ground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes: a meta-analysis of litterfall-manipulation experiments // *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10. Iss. 11. P. 7423–7433.
- Yavitt J. B., Williams C. J. Conifer litter identity regulates anaerobic microbial activity in wetland soils via variation in leaf litter chemical composition // *Geoderma*. 2015. Vol. 243–244. P. 141–148.
- Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors // *Journal of Plant Ecology*. 2008. Vol. 1. Iss. 2. P. 85–93.

REFERENCES

- Abramova E. R., Bryanin S. V., Kondratova A. V., Razlozhenie opada v postpirogennykh listvennichnikakh khrebta Tukuringra (Verkhnee Priamur'e) (Litter decomposition in the post-fire larch forests of the Tukuringra Range (Upper Priamurie)), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2018, No 2, pp. 71–77.

- Albrektson A., Needle litterfall in stands of *Pinus sylvestris* L. in Sweden, in relation to site quality, stand age, and latitude, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1988, No 3, pp. 333–342.
- Alekseeva A. A., Stepanova S. V., Primenenie listovogo opada v kachestve sorbtionnogo materiala dlya likvidatsii avariynykh neftyanykh razlivov (Use of leaf litter as sorption material for elimination of accidental oil spills), *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse. Sorbtionnaya ochistka ot vrednykh primesei*, 2015, No 7, pp. 9–13.
- Aponte C., García L. V., Marañón T., Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence, *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 309, pp. 36–46.
- Arkhipov E. V., Dinamika nakopleniya lesnykh goryuchikh materialov v sosnovykh lesakh Kazakhskogo melkosopohnika (The dynamics of forest fuel material accumulation in the pine forests of the Kazakh Hummocks), *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, No 9 (119), pp. 64–68.
- Artemkina N. A., Soderzhanie lignina i tsellyulozy v opade i podstilke nenarushennykh i podverzhennykh tekhnogennomu zagryazneniyu severotaezhnykh sosnovykh lesov (The content of lignin and cellulose in the litter of undisturbed and technogenic polluted northern taiga forests), *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN. Apatity: Izd-vo Geologicheskogo instituta FITs KNTs RAN*, 2018, No 15, pp. 418–421.
- Bazilevich N. I., Titlyanova A. A., Smirnov V. V., Rodin L. E., Nechaeva N. T., Levin F. I., *Metody izucheniya biologicheskogo krugovorota v razlichnykh prirodnnykh zonakh* (Methods for studying the biological cycle in various natural zones), Moscow: Mysl', 1978, 185 p.
- Becker H., Aosaar J., Varik M., Morozov G., Aun K., Mander Ü., Soosaar K., Uri V., Annual net nitrogen mineralization and litter flux in well-drained downy birch, Norway spruce and Scots pine forest ecosystems, *Silva Fennica*, 2018, Vol. 52, No 4, Article 10013.
- Belote R. T., Jones R. H., Tree leaf litter composition and nonnative earthworms influence plant invasion in experimental forest floor mesocosms, *Biological Invasions*, 2009, Vol. 11, Iss. 4, pp. 1045–1052.
- Berg B., Albrektson A., Berg M. P., Cortina J., Johansson M.-B., Gallardo A., Mgadeira M., Pausas J., Kiratz W., Vallejo R., McClaugherty C., Amounts of litter fall in some pine forests in European transect, in particular Scots pine, *Annals of Forest Science*, 1999, Vol. 56, pp. 625–639.
- Berg B., Berg M. P., Bottner P., Box E., Breyer A., Ca de Anta R., Couteaux M., Escudero A., Gallardo A., Kratz W., Madeira M., Mälkönen E., McClaugherty C., Meentemeyer V., Muñoz F.,

- Piussi P., Remacle J., Vi de Santo A., Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality, *Biogeochemistry*, 1993, Vol. 20, Iss. 3, pp. 127–159.
- Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils, *Forest Ecology and Management*, 2000, Vol. 133, pp. 13–22.
- Berg B. Decomposition patterns for foliar litter e A theory for influencing factors, *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, Vol. 78, pp. 222–232.
- Berg B., Johansson M.-B., Liu C., Faituri M., Sanborn P., Vesterdal L., Ni X., Hansen K., Ukonmaanaho L., Calcium in decomposing foliar litter – A synthesis for boreal and temperate coniferous forests, *Forest Ecology and Management*, 2017, Vol. 403, pp. 137–144.
- Berg B., McClaugherty C., *Plant litter – decomposition, humus formation, carbon sequestration*, 2nd Edn. Edited by: B. Berg, C. McClaugherty, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, 340 p.
- Berg B., Meentemeyer V., Litter fall in some European coniferous forests as dependent on climate: a synthesis, *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, Vol. 31, pp. 292–301.
- Bergman I. E., Vorobeichik E. L., Vliyanie vybrosov medeplavil'nogo zavoda na formirovanie zapasa i razlozhenie krupnykh drevesnykh ostatkov v elovo-pikhtovykh lesakh (The effect of the cooper plant on the growing stock and decomposition of coarse woody debris in the spruce and fir woodland), *Lesovedenie*, 2017, No 1. pp. 24–38.
- Bessonova V. P., Nemchenko M. V., Tkach V. V., Zapas makroelementov (P, K, Ca, Mg) i azota v opade i podstilke v protiverozionnom nasazhdenii *Robinia pseudoacacia* L. (Stock of macroelements (P, K, Ca, Mg) and of nitrogen in litter fall and bedding in the antierosion stands *Robinia pseudoacacia* L.), *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2017, Iss. 1 (23.1), Part. 1, Sel'skokhozyaistvennye nauki, pp. 42–50.
- Blanco J. A., Bosco Imbert J., Castillo F. J., Thinning affects *Pinus sylvestris* needle decomposition rates and chemistry differently depending on site conditions, *Biogeochemistry*, 2011. Vol. 106. Iss. 3. pp. 397–414.
- Bobkova K. S., Rol' lesnoj podstilki v funkcionirovanii hvoynyh ekosistem Evropejskogo Severa (The role of forest litter in the functioning of coniferous ecosystems in the European North), *Vestnik Instituta biologii Komi NC UrO RAN*, 2000, No 9 (35), available at: <https://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/00-35/05.html> (June 21, 2021)
- Boev V. A., Baranovskaya N. V., Boev V. V., Rtut' v listovom opade podtaezhnykh lesov na fonovoi territorii (Mercury in leaf litter of subtaiga forests on the natural territory), *Izvestiya Tomsk-*

- ogo politekhnicheskogo universiteta. *Inzhiniring georesurov*, 2018, Vol. 329, No 8, pp. 124–131.
- Boldeskul A. G., Kudryavtseva E. P., Arzhanova V. S., Rol' drevesnykh vidov v protsessakh funktsionirovaniya landshaftov chernopikhtovo-shirokolistvennykh lesov Yuzhnogo Primor'ya (Role of arboreal species in the functioning of landscapes of fir-broadleaved forests in the southern part of Primorskii Krai), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2015, No 3. pp. 355–362.
- Bonanomi G., Capodilupo M., Incerti G., Mazzoleni S., Nitrogen transfer in litter mixture enhances decomposition rate, temperature sensitivity, and C quality changes, *Plant Soil*, 2014, Vol. 381. Iss. 1-2. pp. 307–321.
- Bondareva L. G., Rubailo A. I., Novye dannye urovnya zagryazneniya aerol'nymi vypadeniyami tritiya v blizhnei zone vliyaniya gorno-khimicheskogo kombinata GK Rosatoma (New data on the level of contamination with tritium aerosol fallout in the nearest influence zone of the mining-chemical combine of the Rosatom State Corporation), *Doklady akademii nauk*, 2016, Vol. 467, No 1, pp. 67–70.
- Bradford M. A., Berg B., Maynard D. S., Wieder W. R., Wood S. A., Understanding the dominant controls on litter decomposition, *Journal of Ecology*, 2016, No 104, Iss. 1, pp. 229–238.
- Bray J. R., Gorham E., Litter production in forests of the world, *Advances in Ecological Research*, Academic Press, London, 1964, Vol. 2, pp. 101–157.
- Brovkin V., van Bodegom P. M., Kleinen T., Wirth C., Cornwell W. K., Cornelissen J. H. C., Kattge J., Plant-driven variation in decomposition rates improves projections of global litter stock distribution, *Biogeosciences*, 2012, Vol. 9, Iss. 1, pp. 565–576.
- Bryanin S. V., Abramova E. R., Opad fitomassy v postpirogennykh listvennikakh Zeiskogo zapovednika (Verkhnee Priamur'e) (Phytomass of litter fall in postfire larch forests of Zeisky nature reserve (Upper Priamurie)), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No 2, pp. 93–101.
- Chavez-Vergara B., Merino A., Vázquez-Marufo G., García-Oliva F., Organic matter dynamics and microbial activity during decomposition of forest floor under two native neotropical oak species in a temperate deciduous forest in Mexico, *Geoderma*, 2014, Vol. 235–236, pp. 133–145.
- Chen X., Page-Dumroese D., Lv R., Wang W., Li G., Liu Y., Interaction of initial litter quality and thinning intensity on litter decomposition rate, nitrogen accumulation and release in a pine plantation, *Silva Fennica*, 2014, Vol. 48, No 4. Article 1211.
- Chernen'kova T. V., Bochkarev Yu. N., Fridrikh M., Bettger T., Vozdeistvie prirod-

- no-antropogennykh faktorov na radial'nyi prirost derev'ev Kol'skogo Severa (The impact of natural and anthropogenic factors on radial tree growth on the northern Kola Peninsula), *Lesovedenie*, 2012, No 4, pp. 3-15.
- Chernen'kova T. V., Koroleva N. E., Borovich E. A., Melekhin A. V., *Izmenenie organizatsii lesnogo pokrova makrosklonov k ozeru Imandra v usloviyakh tekhnogenogo zagryazneniya* (Change of the forest cover on the slopes oriented towards Lake Imandra under industrial pollution), *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2016, No 12, pp. 3-24.
- Chul'diene D., Aleinikoviene Yu., Murashkiene M., Marozas V., Armolaitis K., *Raspad i sokhrannost' organicheskikh soedinenii i pitatel'nykh elementov v listvennom opade posle zimnego sezona pod lesoposadkami listvennitsy evropeiskoi, buka obyknovennogo i duba krasnogo v Litve* (Decomposition and preservation of organic compounds and nutrients in the foliar litter after the winter season under the forest plantations of european larch, european beech and red oak in Lithuania), *Pochvovedenie*, 2017, No 1, pp. 53-63.
- Danilova E. G., Stepanova S. V., *Pererabotka berezovogo opada s tsel'yu polucheniya tovarnogo produkta (tsel'yulozy)* (Processing of birch litter to obtain a commercial product (cellulose)), *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, Vol. 20, No 7, pp. 37-40.
- Davey M. P., Berg B., Emmett B. A., Rowland P., *Decomposition of oak leaf litter is related to initial litter Mn concentrations*, *Canadian Journal of Botany*, 2007, Vol. 85, Iss. 1, pp. 16-24.
- De Marco A., Vittozzi P., Rutigliano F. A., Virzo de Santo A. *Nutrient dynamics during decomposition of four different pine litters*. In: Leone V. (ed.), Lovreglio R. (ed.). *Proceedings of the international workshop MEDPINE 3: conservation, regeneration and restoration of Mediterranean pines and their ecosystems*, Bari: CIHEAM, 2007, pp. 73-77.
- De Weirdt M., Verbeeck H., Maignan F., Peylin P., Poulter B., Bonal D., Ciais P., Steppe K., *Seasonal leaf dynamics for tropical evergreen forests in a process-based global ecosystem model*, *Geoscientific Model Development*, 2012, Vol. 5, Iss. 5, pp. 1091-1108.
- Dearden, F. M., Dehlin, H., Wardle, D. A., Nilsson, M.-C., *Changes in the ratio of twig to foliage in litterfall with species composition, and consequences for decomposition across a long term chronosequence*, *Oikos*, 2006, Vol. 115, Iss. 3, pp. 453-462.
- Derome J., Lindroos A.-J., *Effects of heavy metal contamination on macronutrient availability and acidification parameters in forest soil in the vicinity of the Harjavalta Cu-Ni smelter, SW Finland*,

- Environmental Pollution*, 1998, Vol. 99, Iss. 2, pp. 225–232.
- Dulya O. V., Bergman I. E., Kukarskih V. V., Vorobeichik E. L., Smirnov G. Yu., Mikryukov V. S., Pollution-induced slowdown of coarse woody debris decomposition differs between two coniferous tree species, *Forest Ecology and Management*, 2019, Vol. 448, pp. 312–320.
- Dupuy J. M., Chazdon R. L., Interacting effects of canopy gap, understory vegetation and leaf litter on tree seedling recruitment and composition in tropical secondary forests, *Forest Ecology and Management*, 2008, Vol. 255, pp. 3716–3725.
- Ermakova O. D. Struktura i dinamika opa-da listopadnykh porod v drevostoyakh severnogo makrosklona khrebta Khamar-Daban (Yuzhnoe Pribaikal'e) (Structure and dynamics of deciduous trees debris forest stands of northern macroslope of Khamar-Daban ridge (South Pribaikalye)), *Izvestiya Samar-skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2009, Vol. 11, No 1 (3), pp. 377–380.
- Fang X., Zhao L., Zhou G., Huang W., Liu J., Increased litter input increases litter decomposition and soil respiration but has minor effects on soil organic carbon in subtropical forests, *Plant Soil*, 2015, Vol. 392, pp. 139–153.
- Flower-Ellis J. G. K., Litterfall in an age series of Scots pine stands: Summary of results for the period 1973–1983, *Department of Ecology and Environmental Research, Swedish University of Agricultural Sciences*, 1985, Report 19, pp. 75–94.
- Fomicheva O. A., Polyanskaya L. M., Nikonov V. V., Lukina N. V., Orlova M. A., Isaeva L. G., Chislennost' i biomassa pochvennykh mikroorganizmov v staro-vozrastnykh korennykh elovykh lesakh severnoi taigi (Population and biomass of soil microorganisms in old-growth primary spruce forests in the northern taiga), *Pochvovedenie*, 2006, No 12, pp. 1469–1478.
- Freedman B., Hutchinson T. C., Effects of smelter pollutants on forest leaf litter decomposition near a nickel–copper smelter at Sudbury, Ontario, *Canadian Journal of Botany*, 1980, Vol. 58, No 15, pp. 1722–1736.
- Guo C., Cornelissen J. H. C., Tuo B., Ci H., Yan E.-R., Non-negligible contribution of subordinates in community-level litter decomposition: Deciduous trees in an evergreen world, *Journal of Ecology*, 2020, Vol. 108, Iss. 4, pp. 1713–1724.
- Hale B., Robertson P., Plant community and litter composition in temperate deciduous woodlots along two field gradients of soil Ni, Cu and Co concentrations, *Environmental Pollution*, 2016, Vol. 212, pp. 41–47.
- Hilli S., Significance of litter production of forest stands and ground vegetation in the formation of organic matter and storage of carbon in boreal coniferous forests [in:] *Forest condition monitoring in Finland – National report* (Eds.

- P. Merilä, S. Jortikka), The Finnish Forest Research Institute, 2013, available at: <http://www.metla.fi/metinfo/forest-condition/projects/litter.htm> (June 21, 2021)
- Högberg P., Näsholm T., Franklin O., Tamm Review: On the nature of the nitrogen limitation to plant growth in Fennoscandian boreal forests, *Forest Ecology and Management*, 2017, Vol. 403, pp. 161–185.
- Ilvesniemi H., Levula J., Ojansuu R., Kolari P., Kulmala L., Pumpanen J., Launiainen S., Vesala T., Nikinmaa E., Long-term measurements of the carbon balance of a boreal Scots pine dominated forest ecosystem, *Boreal Environment Research*, Helsinki, 2009, Vol. 14, pp. 731–753.
- Isidorov V. A., Smolewska M., Purzyńska-Pugacewicz A., Tyszkiewicz Z., Chemical composition of volatile and extractive compounds of pine and spruce leaf litter in the initial stages of decomposition, *Biogeosciences*, 2010, Vol. 7, Iss. 9, pp. 2785–2794.
- Ivanova A. E., Nikolaeva V. V., Marfenina O. E., Изменение тsellyulozoliticheskoj активности городских почв в связи с изъятием растительного опада (на примере Москвы) (Changes in the cellulolytic activity of urban soils induced by the removal of plant litter (using Moscow as an example)), *Pochvovedenie*, 2015, No 5, pp. 562–570.
- Ivanova E. A., Lukina N. V., Danilova M. A., Artemkina N. A., Smirnov V. E., Ershov V. V., Isaeva L. G., Vliyanie aerotekhnogenogo zagryazneniya na skorost' razlozheniya rastitel'nykh ostatkov v sosnovykh lesakh na severnom predele rasprostraneniya (The effect of air pollution on the rate of decomposition of plant litter at the northern limit of pine forests), *Lesovedenie*, 2019, No 6, pp. 533–546.
- Ivanova E. A., Lukina N. V., Var'irovanie massy i fraktsionnogo sostava drevesnogo opada v sosnyakakh kustarnichkovolishainikovykh pri aerotekhnogenom zagryaznenii (Variation of mass and fraction composition of tree litter in dwarf shrub-lichen pine forests under aerial technogenic pollution), *Lesovedenie*, 2017, No 5, pp. 47–58.
- Johnson D., Hale B., White birch (*Betula papyrifera* Marshall) foliar litter decomposition in relation to trace metal atmospheric inputs at metal-contaminated and uncontaminated sites near Sudbury, Ontario and Rouyn-Noranda, Quebec, Canada, *Environmental Pollution*, 2004, Vol. 127, Iss. 1, pp. 65–72.
- Jonczak J., Parzych A., The content of heavy metals in the soil and litterfall in a beech-pine-spruce stand in northern Poland, *Archives of Environmental Protection*, 2014, Vol. 40, No 4, pp. 67–77.
- Karpachevskii L. O., Voronin A. D., Dmitriev E. A., Stroganova M. N., Shoba S. A., *Pochvenno-biogeotsenoticheskie issledovaniya v lesnykh biogeotsenozakh* (Soil biogeocenotic studies in forest biogeo-

- cenoses), Moscow: izd-vo Moskovskogo universiteta, 1980, 160 p.
- Kazimirov N. I., Morozova R. M., *Biologicheskii krugovorot veshchestv v el'nikakh Karelii* (The biological cycle of substances in the spruce forests of Karelia), Leningrad: Nauka, 1973, 175 p.
- Kiikkilä O., Heavy-metal pollution and remediation of forest soil around the Harjavalta Cu-Ni smelter, in SW Finland, *Silva Fennica*, 2003, Vol. 37, No 3, pp. 399-415.
- Kolmogorova E. Yu., Ufimtsev V. I., Nekotorye osobennosti khimicheskogo sostava opada sosny obyknovennoi, proizrastayushchei v usloviyakh porodnogo otvala (Some peculiarities of the chemical composition of Scotch pine debris, growing under conditions of coal pit), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2018, No 11, Part. 2, pp. 267-272.
- Komissarov M. A., Ogura Sh., Raspredelenie i migratsiya radiotseziya v sklonovykh landshaftakh cherez 3 goda posle avarii na AES Fukusima-1 (Distribution and migration of radiocesium in sloping landscapes three years after the Fukushima-1 nuclear accident), *Pochvovedenie*, 2017, No 7, pp. 886-896.
- Kopáček J., Cudlín P., Fluksová H., Kaňa J., Pícek T., Šantrůčková H., Svoboda M., Vaněk D., Dynamics and composition of litterfall in an unmanaged Norway spruce (*Picea abies*) forest after bark-beetle outbreak, *Boreal Environment Research*, 2015, Vol. 20, No 3, pp. 305-323.
- Kopáček J., Cudlín P., Svoboda M., Chmelikova E., Kaňa J., Pícek T., Composition of Norway spruce litter and foliage in atmospherically acidified and nitrogen-saturated Bohemian Forest stands, Czech Republic, *Boreal Environment Research*, 2010, Vol. 15, No 4, pp. 413-426.
- Kopylova L. Yu., *Nakoplenie tyazhelykh metallov v drevesnykh rasteniyakh na urbanizirovannykh territoriyakh vostochnogo Zabaikal'ya. Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* (Peculiarities of heavy metals accumulation by woody plants in urban territories of Eastern Zabaikalie. Extended abstract of candidate's biol. sci. thesis), Ulan-Ude, 2012, 24 p.
- Kouki J., Hokkanen Y., Long-term needle litterfall of a Scots pine *Pinus sylvestris* stand: relation to temperature factors, *Oecologia*, 1992, No 89, pp. 176-181.
- Kozlov M., Zvereva E., Decomposition of birch leaves in heavily polluted industrial barrens: relative importance of leaf quality and site of exposure, *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, Vol. 22, Iss. 13, pp. 9943-9950.
- Krishna M. P., Mohan M., Litter decomposition in forest ecosystems: a review, *Energy, Ecology and Environment*, 2017, Vol. 2, Iss. 4, pp. 236-249.
- Kuznetsov M. A., Osipov A. F., Rastitel'nyi opad kak komponent biologicheskogo krugovorota ugleroda v zabolochennykh

- khvoinykh soobshchestvakh srednei taigi (Plant litter as a component of the biological carbon cycle of wet coniferous communities in the middle taiga), *Vestnik Instituta biologii Komi NTs Ural'skogo otdeleniya RAN*, Izd-vo Instituta biologii Komi NTs UrO RAN, 2011, No 9, pp. 10–12.
- Kuznetsov M. A., Vliyanie uslovii razlozheniya i sostava opada na kharakteristiki i zapas podstilki v srednetaezhnom chernichno-sfagnovom el'nike (Effect of decomposition conditions and fall-off composition on litter reserves and characteristics in a bilberry-sphagnum spruce forest of middle taiga), *Lesovedenie*, 2010, No 6, pp. 54–60.
- Lamppu J., Huttunen S., Relations between Scots pine needle element concentrations and decreased needle longevity along pollution gradients, *Environmental Pollution*, 2003, Vol. 122, Iss. 1, pp. 119–126.
- Larionova A. A., Kvitkina A. K., Bykhovets S. S., Lopes-de-Gerenyu V. O., Kolyagin Yu. 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.
- Lenthonen A., Lindholm M., Hokkanen T., Salminen H., Jalkanen R., Testing dependence between growth and needle litterfall in Scots pine – a case study in northern Finland, *Tree Physiology*, Heron Publishing—Victoria, Canada, 2008, Vol. 28, pp. 1741–1749.
- Likhanova N. V., Rol' rastitel'nogo opada v formirovanii lesnoi podstilki na vyrubkakh el'nikov srednei taigi (The role of tree waste in the litter layer formation in cutting areas of middle taiga spruce forests), *Izvestiya VUZov. Lesnoi zhurnal*, 2014, No 3, pp. 52–66.
- Liu C., Duan C., Meng X., Yue M., Zhang H., Wang P., Xiao Y., Hou Z., Wang Y., Pan Y., Cadmium pollution alters earthworm activity and thus leaf-litter decomposition and soil properties, *Environmental Pollution*, 2020, Vol. 267, Article 115410.
- Loydi A., Lohse K., Otte A., Donath T. W., Distribution and effects of tree leaf litter on vegetation composition and biomass in a forest–grassland ecotone, *Journal of Plant Ecology*, 2014, Vol. 7, Iss. 3, pp. 264–275.
- Lukina N. V., Polyanskaya L. M., Orlova M. A., *Pitalatel'nyi rezhim pochv severotaezhnykh lesov* (Nutrient regime of soils of the north taiga forests), Moscow: Nauka, 2008, 342 p.
- Lukina N. V., Nikonov V. V., *Biogekhimicheskie tsikly v lesakh Severa v usloviyakh aerotekhnogennogo zagryazneniya* (Biogeochemical cycles in the Northern forest ecosystems subjected to air pollution), Apatity: Izd-vo Kol'skogo nauch. tsentra RAN, 1996, Part 1, 213 p., Part 2, 192 p.

- Lukina N. V., Nikonov V. V., *Pitatel'nyi rezhim lesov severnoi taigi: prirodnye i tekhnogennye aspekty* (Nutrient status of north taiga forests: natural regularities and pollution-induced changes), Apatity: Izd-vo Kol'skogo nauch. tsentra RAN, 1998, 316 p.
- 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, Iss. 24, pp. 19874–19887.
- Lyanguzova I., Yarmishko V., Gorshkov V., Stavrova N., Bakkal I., Impact of Heavy Metals on Forest Ecosystems of the European North of Russia [in:] *Heavy Metals* (eds. H. E. D. M. Saleh, R. F. Aglan), IntechOpen, 2018, p. 92.
- Manakov K. N., Nikonov V. V., *Biologicheskii krugovorot mineral'nykh elementov i pochvoobrazovanie v el'nikakh Krainego Severa* (The biological cycle of minerals and soil formation in the spruce forests of the Far North), Leningrad: Nauka, 1981, 196 p.
- Marian F., Sandmann D., Krashevskaya V., Maraun M., Scheu S., Leaf and root litter decomposition is discontinued at high altitude tropical montane rainforests contributing to carbon sequestration, *Ecology and Evolution*, 2017, Vol. 7, Iss. 16, pp. 6432–6443.
- McEnroe N. A., Helmisaari H.-S. Decomposition of coniferous forest litter along a heavy metal pollution gradient, southwest Finland, *Environmental Pollution*, 2001, Vol. 113, Iss. 1, pp. 11–18.
- Meier I. C., Leuschner Ch., Hertel D. Nutrient return with leaf litter fall in *Fagus sylvatica* forests across a soil fertility gradient, *Plant Ecology*, 2005, Vol. 177, Issue 1, pp. 99–112.
- Methods to study litter decomposition. A practical guide* (Eds. M. A. S. Graça, F. Bärlocher, M. O. Gessner). Springer, 2005, 329 p.
- Michopoulos P., Bourletsikas A., Kaoukis K., Fluxes, stocks and availability of nitrogen in evergreen broadleaf and fir forests: similarities and differences, *Journal of Forestry Research*, 2020, 8 p.
- Ministerstvo prirodnnykh resursov i ekologii Murmanskoi oblasti* (The Ministry of Natural Resources and Ecology of the Murmansk region), Murmansk, 2015, 177 p.
- Mironenko L. M., Osobennosti biologicheskogo krugovorota v drevostoyakh nekotorykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoi Evrazii: matematicheskoe issledovanie (Features of biological cycle in stands of some Northern Eurasia forming tree species: mathematical research), *Pyataya natsional'naya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Matematicheskoe modelirovanie v ekologii" EkoMatMod-2017* (5th National Science Conference with International

- Participation "Mathematical Modeling in Ecology" EcoMatMod-2017), Pushchino, 16-20 October 2017, Pushchino: IFKHiBPP RAN, 2017, pp. 125-127.
- Moore T. R., Trofymow J. A., Prescott C. E., Fyles J., Titus B. D., CIDET working group, Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing foliar litter in Canadian forests, *Ecosystems*, 2006, Vol. 9, No. 1, pp. 46-62.
- Nakazato R. K., Lourenço I. S., Esposito M. P., Lima M. E. L., Ferreira M. L., Campos R. de O. A., Rinaldi M. C. S., Domingos M., Trace metals at the tree-litter-soil- interface in Brazilian Atlantic Forest plots surrounded by sources of air pollution, *Environmental Pollution*, 2021, Vol. 268, Part A, Article 115797.
- Nekrasova T. P., Semennye gody i problema prognoza urozhaev u khvoinykh drevesnykh porod (Seminal years and the problem of crop forecast for coniferous tree species), *Trudy po lesnomu khozyaistvu*, Zapadno-sibirskii filial AN SSSR, Novosibirskoe obshchestvo NTOLesprom, 1957, Issue 3, pp. 185-191.
- Neumann M., Ukonmaanaho L., Johnson J., Benham S., Vesterdal L., Novotný R., Verstraeten A., Lundin L., Thimonier A., Michopoulos P., Hasenauer H. Quantifying carbon and nutrient input from litterfall in European forests using field observations and modeling, *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, Vol. 32, No 5, P. 784-798.
- Nieminen T. M., Derome J., Helmisaari H.-S. Interactions between precipitation and Scots pine canopies along a heavy-metal pollution gradient, *Environmental Pollution*, 1999, Vol. 106, Iss. 1, pp. 129-137.
- Nieminen, T., Helmisaari H.-S. Nutrient retranslocation in the foliage of *Pinus sylvestris* L. growing along a heavy metal pollution gradient, *Tree Physiology*, 1996, Vol. 16, Iss. 10, pp. 825-831.
- Nikonov V. V., Lukina N. V., Bezel' V. S., Bel'skii E. A., Besspalova A. Yu., ..., & Yatsenko-Khmelevskaya M. A., *Rasseyannye elementy v boreal'nykh lesakh* (Scattered elements in boreal forests), Moscow: Nauka, 2004, 616 p.
- Nikonov V. V., Lukina N. V., Polyanskaya L. M., Panikova A. N., Osobennosti rasprostraneniya mikroorganizmov v Al-Fe-gumusovykh podzolakh severotaezhnykh elovykh lesov: prirodnye i tekhnogennye aspekty (Features of the microorganisms distribution in Al-Fe-humus podzols under northern taiga spruce forests: natural and technogenic aspects), *Mikrobiologiya*, 2001, Vol. 70, No 3, pp. 319-328.
- Novák J., Dušek D., Slodičák M., Quantity and quality of litterfall in young oak stands, *Journal of Forest Science*, 2014, Vol. 60, No 6, pp. 219-225.
- Ogden A. E., Schmidt M. G., Litterfall and soil characteristics in canopy gaps occupied by vine maple in a coastal western hemlock forest, Canadian

- Journal of Soil Science*, 1997, Vol. 77, Iss. 4, pp. 703–711.
- Osipov A. F., Zapasy i potoki organicheskogo ugleroda v ekosisteme spelogo sosnyaka chernichnogo srednei taigi (Stocks and fluxes of organic carbon in the ecosystem of mature bilberry pine forest of the middle taiga), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No 2, pp. 70–80.
- Pausas J. G., Litter fall and litter decomposition in *Pinus sylvestris* forests of the eastern Pyrenees, *Journal of Vegetation Science*, 1997, Vol. 8, pp. 643–650.
- Pedersen L. B., Bille-Hansen J., A comparison of litterfall and element fluxes in even aged Norway spruce, sitka spruce and beech stands in Denmark, *Forest Ecology & Management*, 1999, Vol. 114, pp. 55–70.
- Petrochenko K. A., Kurovskii A. V., Babenko A. S., Yakimov Yu. E., Vermikompost na osnove listovogo opada – perspektivnoe kal'tsievoe udobrenie (Leaf litter-based vermicompost as promising calcium fertilizer), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 2015, No 2 (30), pp. 20–34.
- Polyanskaya L. M., Nikonov V. V., Lukina N. V., Panikova A. N., Zvyagintsev V. G., Mikroorganizmy Al-Fe-gumusovykh podzolov sosnyakov lishainikovykh v usloviyakh aerotekhnogenogo zagryazneniya (Microorganisms of Al-Fe-humus podzols of lichen pine forests under conditions of aerotechnogenic contamination), *Pochvovedenie*, 2001, No 2, pp. 215–226.
- Pomogaibin E. A., Pomogaibin A. V. Vliyanie derev'ev roda *Juglans L.* na tsellyulozorazrushayushchuyu aktivnost' pochvy v usloviyakh dendrariya botanicheskogo sada Samarskogo universiteta (*Juglans L.* genus trees influence on cellulolytic soil activity in Samara University Botanical Garden Dendrarium), *Samarskii nauchnyi vestnik*, 2018, Vol. 7, No 1 (22), pp. 105–109.
- Portillo-Estrada M., Korhonen J., Pihlatie M., Pumpanen J., Frumau A., Morillas L., Tosens T., Niinemets Ü. Inter- and intra-annual variations in canopy fine litterfall and carbon and nitrogen inputs to the forest floor in two European coniferous forests, *Annals of Forest Science*, 2013, Vol. 70, Iss. 4, pp. 367–379.
- Portillo-Estrada M., Pihlatie M., Korhonen J. F. J., Levula J., Frumau A. K. F., Ibrom A., Lembrechts J. J., Morillas L., Horváth L., Jones S. K., Niinemets Ü., Climatic controls on leaf litter decomposition across European forests and grasslands revealed by reciprocal litter transplantation experiments, *Biogeosciences*, 2016, Vol. 13, pp. 1621–1633.
- Preston C. M., Bhatti J. S., Flanagan L. B., Norris C. Stocks, chemistry, and sensitivity to climate change of dead organic matter along the Canadian boreal forest transect case study, *Climate Change*, 2006, Vol. 74, pp. 233–251.
- Purahong W., Kapturska D., Pecyna M. J., Schulz E., Schloter M., Buscot F., Hofrichter M., Krüger D., Influence of

- Different Forest System Management Practices on Leaf Litter Decomposition Rates, Nutrient Dynamics and the Activity of Ligninolytic Enzymes: A Case Study from Central European Forests, *PLoS ONE*, 2014, Vol. 9, Iss. 4, pp. 1–11.
- Rahman M. M., Tsukamoto J., Rahman M. M., Yoneyama A., Mostafa K. M., Lignin and its effects on litter decomposition in forests ecosystems, *Chemistry & Ecology*, 2013, Vol. 29, Iss. 6, pp. 540–553.
- Rakhleeva A. A., Semenova T. A., Striganova B. R., Terekhova V. A., Dinamika zoomikrobnnykh kompleksov pri razlozhenii rastitel'nogo opada v el'nikakh Yuzhnoi taigi (Dynamics of zoomicrobial complexes upon decomposition of plant litter in spruce forests of the southern taiga), *Pochvovedenie*, 2011, No 1, pp. 44–55.
- Rautio P., Huttunen S., Lamppu J., Effects of sulphur and heavy metal deposition on foliar chemistry of Scots pines in Finnish Lapland and on the Kola Peninsula, *Chemosphere*, 1998a, Vol. 36, Iss. 4, pp. 979–984.
- Reshetnikova T. V., Lesnye podstilki kak depo biogennykh elementov (Forest litters as the biogenic element depo), *Vestnik KrasGAU*, 2011, No 12, pp. 74–81.
- Rodin L. E., Remezov N. P., Bazilevich N. I., *Metodicheskie ukazaniya k izucheniyu dinamiki i biologicheskogo krugovorota v fitotsenozakh* (Guidelines for the study of the dynamics and biological cycle in plant communities), Leningrad: Nauka, 1967, 145 p.
- Rukovodstvo po kompleksnomu monitoringu* (Integrated Monitoring Manual), Moscow: FGBU «IGKE Rosgidrometa i RAN», 2013, 153 p.
- Salemaa M., Derome J., Helmisaari H.-S., Nieminen T., Vanha-Majamaa I., Element accumulation in boreal bryophytes, lichens and vascular plants exposed to heavy metal and sulfur deposition in Finland, *Science of the Total Environment*, 2004, Vol. 324, Iss. 1–3, pp. 141–160.
- Sayer E. J., Tanner E. V. J., Experimental investigation of the importance of litter-fall in lowland semi-evergreen tropical forest nutrient cycling, *Journal of Ecology*, 2010, Vol. 98, No 5, pp. 1052–1062.
- Sayer E. J., Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems, *Biological Reviews*, 2005, Vol. 80, pp. 1–31.
- Scherer-Lorenzen M., Bonilla J. L., Potvin C., Tree species richness affects litter production and decomposition rates in a tropical biodiversity experiment, *Oikos*, 2007, Vol. 116, Iss. 12, pp. 2108–2124.
- Shaimardanova A. Sh., Stepanova S. V., Shaikhiev I. G., Issledovanie vozmozhnosti mnogokratnogo ispol'zovaniya listovogo opada v kachestve sorbtionnogo materiala po otnosheniyu k ionam zheleza (Study of reusability of leaf litter as a sorption material in

- relation to iron ions), *Izvestiya VUZov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2017, Vol. 7, No 7, pp. 164–172.
- Shpakovskaya I. M., Rozhak V. P., Dinamika drevesnogo opada v lesnykh ekosistemakh Striisko-Sanskoj Verkhoviny (Ukrainskie Karpaty) (The tree litter dynamics in forest ecosystems of the Striysko-Sanskoy Verkhovyna (Ukrainian Carpathians)), *Zhurnal nauchnykh publikatsii aspirantov i doktorantov*, 2014, Iss. 1, pp. 175–179.
- Silaicheva M. V., Stepanova S. V., Izuchenie vozmozhnosti mnogokratnogo ispol'zovaniya klenovogo opada v kachestve sorbtionnogo materiala dlya ochistki model'noi vody ot ionov zheleza (II) (Study of possibility of maple litter multiple use as a sorption material for purifying model water from iron (II) ions), *Dostizheniya vuzovskoi nauki. Ekologiya i nauki o zemle*, 2016, No 23, pp. 230–235.
- Slade E. M., Riutta T., Interacting effects of leaf litter species and macrofauna on decomposition in different litter environments, *Basic and Applied Ecology*, 2012, Vol. 13, Iss. 5, pp. 423–431.
- Smirnova N. V., Tiunov A. V., Nechaeva T. V., Khudyaev S. A., Kruten' V. S., Lyubchanskii I. I., Vliyanie solei natriya i zheleza na mineralizatsiyu opada berezy v inkubatsionnom eksperimente (Influence of sodium and iron salts on the mineralization of birch litter in an incubation experiment), *Sb. materialov Vseross. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashchennoi 110-letiyu vydayushchegosya organizatora nauki i pervogo direktora IPA SO RAN R. V. Kovaleva "Pochvennyye resursy Sibiri: vyzovy XXI veka"* (Book of Proc. of All-Russian Science Conference with International Participation, Dedicated to the 110th Anniversary of the Outstanding Organizer of Science and the First Director of the IPA SB RAS R. V. Kovalev "Soil Resources of Siberia: Challenges of the XXI Century"), Novosibirsk, 4–8 December 2017, Tomsk: Izd. dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017, Part 1, pp. 254–257.
- Sobachkin R. S., Kovaleva N. M., Petrenko A. E., Sobachkin D. S., Struktura goryuchikh materialov v sosnyakakh raznogo vozrasta Krasnoyarskoi lestepi (The structure of forest fuels in variously aged pine woodlands of forest-steppe domain in Krasnoyarsk), *Lesovedenie*, 2017, No. 6, pp. 431–436.
- Stavrova N. I. Vliyanie atmosfernogo zagryazneniya na semenoshenie khvoinykh porod (The impact of atmospheric pollution on seed productivity of conifers), In: *Lesnye ekosistemy i atmosferno zagryaznenie* (Forest ecosystems and aerial pollution), Leningrad: Nauka, 1990, pp.115–121 (200 p.)
- Steinnes E., Lukina N., Nikonov V., Aamlid D., Røyset O. A gradient study of 34 elements in the vicinity of a copper-nickel

- smelter in the Kola Peninsula, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, Vol. 60, Iss. 1, pp. 71–88.
- Stojnić S., Kebert M., Drekić M., Galić Z., Kesić L., Tepavac A., Orlović S., Heavy Metals Content in foliar litter and branches of *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L. observed at two ICP Forests monitoring plots, *Southeast European forestry*, 2019, Vol. 10, No 2, pp. 151–157.
- Sukhareva T. A., Lukina N. V., Mineral'nyi sostav assimiliruyushchikh organov khvoinykh derev'ev posle snizheniya urovnya atmosfernogo zagryazneniya na Kol'skom poluostrove (Mineral composition of assimilative organs of conifers after reduction of atmospheric pollution in the Kola peninsula), *Ekologiya*, 2014, No 2, pp. 97–104.
- Sverguzova S. V., Sapronova Zh. A., Svyatchenko A. V., Ispol'zovanie listovogo opada kashtanov dlya izvlecheniya ionov nikelya iz rastvorov (Using chestnut leaf litter to extract nickel ions from solutions), *Sb. dokl. III Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. «Energo- i resurso-sberegayushchie ekologicheski chistye khimiko-tekhnologicheskie protsessy zashchity okruzhayushchei sredy»* (Book of papers of the III International Scientific Conference “Energy- and resource-saving environmentally friendly chemical-technological processes of environmental protection”), Belgorod, 14–15 November 2017, Belgorod: Izd-vo “Belgorodskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet im. V. G. Shukhova”, 2017, pp. 84–89.
- Symonds J., Morris D. M., Kwiaton M. M., Effects of harvest intensity and soil moisture regime on the decomposition and release of nutrients from needle and twig litter in northwestern Ontario, *Boreal Environment Research*, 2013, Vol. 18, No 5, pp. 401–413.
- Tarkhanov S. N., Povrezhdennost' khvoinykh drevostoev ust'ya i del'ty Severnoi Dviny v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya (Damaged coniferous forest stands of Northern Dvina mouth and deltas in conditions of atmospheric pollution), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2009, Vol. 11, No 1–3, pp. 394–399.
- Trap J., Hättenschwiler S., Gattin I., Aubert M., Forest ageing: an unexpected driver of beech leaf litter quality variability in European forests with strong consequences on soil processes, *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 302, pp. 338–345.
- Tsandekova O. L., Dinamika nakopleniya zoly v opade *Acer negundo* L. v usloviyakh narushennykh poimennykh fitotsenozov (Dynamics of accumulation of ash in litter *Acer negundo* L. under conditions of disturbed floodplain phytocenoses), *Byulleten' nauki i praktiki*, 2018, Vol. 4, No 12, pp. 148–152.
- Tsvetkov V. F., Tsvetkov I. V., *Les v usloviyakh aerotekhnogenogo zagryazneniya* (Forest in conditions of aerial technogenic pollution), Arkhangel'sk, 2003, 354 p.

- Tsvetkov V. F., Tsvetkov I. V., *Promyshlennoe zagryaznenie okruzhayushchei sredy i les* (Industrial pollution of environment and forest), Arkhangel'sk: IPTs SAFU, 2012, 312 p.
- Tu L-h., Hu H-l., Chen G., Peng Y., Xiao Y-l., Hu T-x., Zhang J., Li X-w., Liu L., Tang Y., Nitrogen addition significantly affects forest litter decomposition under high levels of ambient nitrogen deposition, *PLoS ONE*, 2014, Vol. 9, Iss. 2. P. 1–9.
- Āupek B., Mäkipää R., Heikkinen J., Peltoniemi M., Ukonmaanaho L., Hokkanen T., Nöjd P., Nevalainen S., Lindgren M., Lehtonen A., Foliar turnover rates in Finland – comparing estimates from needle-cohort and litterfall-biomass methods, *Boreal Environment Research*, 2015, Vol. 20, No 2, pp. 283–304.
- Ufimtsev V. I., Egorova I. N., Rol' rastitel'nogo opada v formirovanii fitogennykh polei sosny obyknovennoi na tekhnogennykh elyuviyakh Kuzbassa (Role of the vegetable debris in formation of phytogenous fields of the scots pine on technogenic eluviums of Kuzbass), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, No 4, pp. 116–120.
- Ukonmaanaho L., Merila P., Nöjd P., Nieminen T. M. Litterfall production and nutrient return to the forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland, *Boreal Environment Research*, 2008, Vol. 13 (suppl. B), pp. 67–91.
- Ukonmaanaho L., Pitman R., Bastrup-Birk A., Breda N., Rautio P. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests In: *Part XIII: Sampling and Analysis of Litterfall, UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre*, Eberswald, 2016, 15 p.
- Vacek S., Vacek Z., Bilek L., Simon J., Remeš J., Hůnová I., Král J., Putalová T., Mikeska M., Structure, regeneration and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands with respect to changing climate and environmental pollution, *Silva Fennica*, 2016, Vol. 50, No 4, Article 1564.
- Van Nevel L., Mertens J., Demey A., De Schrijver A., De Neve S., Tack F. M. G., Verheyen K., Metal and nutrient dynamics in decomposing tree litter on a metal contaminated site, *Environmental Pollution*, 2014, Vol. 189, pp. 54–62.
- Vavrova P., Penttila T., Laiho R., Decomposition of Scots pine fine woody debris in boreal conditions: Implications for estimating carbon pools and fluxes, *Forest Ecology and Management*, 2009, Vol. 257, Iss. 2, pp. 401–412.
- Vedrova E. F., Reshetnikova T. V., Massa podstilki i intensivnost' ee razlozheniya v 40-letnikh kul'turakh osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Sibiri (Litter mass and intensity of litter decomposition in 40-year old plantations of the main forest forming species of Siberia), *Lesovedenie*, 2014, No 1, pp. 42–50.
- Vesterdal L., Elberling B., Christiansen J. R., Callesen I., Schmidt I. K., Soil respira-

- tion and rates of soil carbon turnover differ among six common European tree species, *Forest Ecology and Management*, 2012, Vol. 264, pp. 185–196.
- Vorobeichik E. L., Pishchulin P. G., Promyshlennoe zagryaznenie snizhaet rol' derev'ev v formirovanii struktury polei kontsentratsii tyazhelykh metallov v lesnoi podstilke (Industrial pollution reduces the effect of trees on forming the patterns of heavy metal concentration fields in forest litter), *Ekologiya*, 2016, No 5, pp. 323–334.
- Vorobeichik E. L., Pishchulin P. G., Vliyanie derev'ev na skorost' destruktssii tsellyulozy v pochvakh v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya (Effect of trees on the decomposition rate of cellulose in soils under industrial pollution), *Pochvovedenie*, 2011, No 5, pp. 597–610.
- Vorobeichik E. L., Pishchulin P. G., Vliyanie ot del'nykh derev'ev na pH i sodержание tyazhelykh metallov v lesnoi podstilke v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya (Effect of individual trees on the pH and the content of heavy metals in forest litters upon industrial contamination), *Pochvovedenie*, 2009, No 8, pp. 927–939.
- Vorobeichik E. L., Trubina M. R., Khantemirova E. V., Bergman I. E., Mnogoletnyaya dinamika lesnoi rastitel'nosti v period sokrashcheniya vybrosov medeplavil'nogo zavoda (Long-term dynamic of forest vegetation after reduction of copper smelter emissions), *Ekologiya*, 2014, No 6, pp. 448–458.
- Vorob'eva I. G., Naumova A. N., Intensivnost' protsessy destruktssii rastitel'nogo opada v pochvakh sukhikh mestoobitanii (Intensity of waste degradation in dry habitat soils), *III international forest soil science conference: Productivity and resistance of forest soils, Proc. Conf.*, Petrozavodsk, 7–11 September, 2009, pp. 192–195.
- Wardle D. A., Nilsson M.-C., Zackrisson O., Gallet C., Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest, *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, Vol. 35, Iss. 6, pp. 827–835.
- Wood T. E., Lawrence D., Clark D. A., Determinants of leaf litter nutrient cycling in a tropical rain forest: soil fertility versus topography, *Ecosystems*, 2006, No 9, pp. 700–710.
- Wood T. E., Lawrence D., Clark D. A., Chazdon R. L. Rain forest nutrient cycling and productivity in response to large-scale litter manipulation, *Ecology*, 2009, Vol. 90, No 1, pp. 109–121.
- Xu S., Liu L. L., Sayer E. J., Variability of above-ground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes: a meta-analysis of litterfall-manipulation experiments, *Biogeosciences*, 2013, Vol. 10, Iss. 11, pp. 7423–7433.
- Yarmishko V. T., Lyanguzova I. V., Mnogoletnyaya dinamika parametrov i sostoyaniya khvoi *Pinus sylvestris* L. v usloviyakh aerotekhnogenogo za-

- gryazneniya na Evropeiskom Severe (Long-term dynamics of parameters and state of *Pinus sylvestris* L. needles in the conditions of aerial technogenic pollution in the European North), *Izvestiya SPbLTA*, Saint-Petersburg: SPbGLTU, 2013, No 2 (203), pp. 30–46.
- Yavitt J. B., Williams C. J., Conifer litter identity regulates anaerobic microbial activity in wetland soils via variation in leaf litter chemical composition, *Geoderma*, 2015, Vol. 243–244. pp. 141–148.
- Yusupov I. A., Zalesov S. V., Shavnin S. A., Luganskii N. A., Osobennosti dinamiki i struktury drevesnogo opada v sosnovykh molodnyakakh v zone deistviya aeropromvybrosov na Srednem Urale (Features of the dynamics and structure of tree litter in young pine stands in the area of air pollution in the Middle Ural), *Lesy Urala i khozyaistvo v nikh: sb. nauch. tr.*, 1995, Iss. 18, pp. 59–74.
- Zaboeva I. V., *Pochvy i zemel'nye resursy Komi ASSR* (Soils and land resources of Komi ASSR), Syktyvkar: Komi kn. izd-vo, 1975, 344 p.
- Zenkova I. V., *Struktura soobshchestv bespozvonochnykh zhivotnykh v lesnykh podzolakh Kol'skogo poluostrova. Diss. kand. biol. nauk* (The structure of invertebrate communities in the forest podzols of the Kola Peninsula. Candidate's biol. sci. thesis), Apatity, 2000, 156 p.
- Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G., Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors, *Journal of Plant Ecology*, 2008, Vol. 1, Iss. 2, pp. 85–93.

TREE LITTER PRODUCTION AND DECOMPOSITION IN FOREST ECOSYSTEMS UNDER BACKGROUND CONDITIONS AND INDUSTRIAL AIR POLLUTION

E. A. Ivanova

*Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS
Akademgorodok st. 14a, Apatity, Murmansk region, 184209, Russia*

E-mail: ea.ivanova@ksc.ru

Received 30 June 2021

Revised 04 August 2021

Accepted 16 August 2021

The paper provides an overview of Russian and foreign articles devoted to the study of the tree litter production and decomposition in forest ecosystems subjected to natural and anthropogenic factors. The spatial variability (below crown and between crown spaces) and the seasonal features of the tree litter production, its chemical composition and decomposition processes are poorly studied. In addition, most of the works, both in native and foreign countries science, highlight the influence of natural factors on the litter production and the processes of its decomposition, while the impact of point sources of industrial air pollution is rarely considered. The study of the variability of the size, fractional and chemical composition and processes of decomposition of tree litter under conditions of industrial air pollution is important for predicting the dynamics of forest ecosystems subjected to the combined action of natural and anthropogenic factors and reducing the negative impact of production processes on forests.

Key words: *forest ecosystems, tree litter, industrial air pollution, fractional composition, chemical composition, litter decomposition, litter production and decomposition seasonal variability, litter production and decomposition spatial variability*

Рецензент: к. б. н. Земсков Ф. И.