

На правах рукописи



Иванова Екатерина Александровна

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗЛОЖЕНИЕ ДРЕВЕСНОГО ОПАДА В СОСНОВЫХ ЛЕСАХ
НА СЕВЕРНОМ ПРЕДЕЛЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ПРИ АЭРОТЕХНОГЕННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ

06.03.02 – Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва-Апатиты – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН и в Институте проблем промышленной экологии Севера – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»

Научный руководитель:

Лукина Наталья Васильевна
доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

Официальные оппоненты:

Бобкова Капитолина Степановна
доктор биологических наук, профессор,
главный научный сотрудник Отдела
лесобиологических проблем Севера
Института биологии Коми научного
центра Уральского отделения Российской
академии наук

Солодовников Антон Николаевич
кандидат биологических наук, научный
сотрудник Лаборатории лесного
почвоведения Института леса Карельского
научного центра Российской академии
наук

Ведущая организация

**Институт физико-химических и
биологических проблем почвоведения
Российской академии наук**

Защита диссертации состоится 30 июня 2022 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 002.054.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Институте лесоведения РАН по адресу: 143030 Московская обл., Одинцовский р-н, с.п. Успенское, ул. Советская, д. 21, тел./факс 8 (495) 634-52-57, электронный адрес root@ilan.ras.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Института лесоведения РАН и на сайте <http://ilan.ras.ru/novosti/> (дата размещения 22.04.2022 г.).

Автореферат разослан «_____» мая 2022 г.

Ученый секретарь
совета Д 002.054.01, к.б.н.



И.А. Уткина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Опад древесных растений как источник органического вещества почв и элементов питания для биоты выступает в роли связующего звена между растениями верхних ярусов леса и почвой и является одним из ключевых компонентов биогеохимических циклов в лесных биогеоценозах. Комплексные исследования содержания химических элементов в опаде с учетом его количества позволяют оценить объемы их поступления в почву, предсказать скорость разложения, в процессе которого соединения элементов высвобождаются и вновь вовлекаются в биогеохимические циклы.

Большая часть исследований в России и за рубежом посвящены изучению влияния природных факторов на формирование опада и процессы его разложения, тогда как воздействие локальных источников аэротехногенного загрязнения рассматривается значительно реже. Воздушное загрязнение вызывает деградацию лесных экосистем, изменения структуры и состава древостоев, снижение их продукционной способности (Ведрова, Мухортова, 2014; Гитарский, 2005; Лукина, Никонов, 1996; Татаринцев и др., 2015; Черненькова и др., 2016; Hale, Robertson, 2016 и др.). Кислотообразующие вещества и тяжелые металлы вызывают повреждения и уменьшение продолжительности жизни ассимилирующих органов хвойных деревьев (Лукина, Никонов, 1998; Ярмишко, Лянгузова, 2013; Lamppu, Huttunen, 2004), снижение активности почвенных микроорганизмов (Лукина и др., 2008; Никонов и др., 2001; Фомичева и др., 2006 и др.).

В центральной части Мурманской области с 30-х годов XX в. функционирует крупнейший в Северной Европе источник аэротехногенного загрязнения – комбинат «Североникель» (г. Мончегорск, АО «Кольская ГМК»), в атмосферных выбросах которого преобладают сернистый газ и тяжелые металлы. Изучение формирования и разложения древесного опада лесов, функционирующих на северном пределе распространения в условиях атмосферного загрязнения, внесет вклад в понимание процессов адаптации лесных экосистем, изменчивости экосистемных функций лесов в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов.

Цель работы: выявить особенности формирования и разложения опада в сосновых лесах на северном пределе распространения, развивающихся в естественных условиях и под действием аэротехногенного загрязнения.

Задачи исследований:

1. Выявить закономерности изменений массы и фракционного состава древесного опада в сосновых лесах на разных стадиях дигрессии с учетом внутрибиогеоценотического варьирования в сезонной и многолетней динамике;
2. Оценить изменения химического состава активной фракции опада сосновых древостоев (хвой сосны) на разных стадиях техногенной дигрессии;
3. Провести сравнительную оценку скорости разложения растительных остатков в еловых и сосновых лесах на разных стадиях техногенной дигрессии.

Научная новизна и практическая значимость.

На основе многолетних наблюдений выявлены изменения массы и фракционного состава древесного надземного опада в сосновых лесах на северном пределе распространения, развивающихся в естественных условиях и под действием аэротехногенного загрязнения. Выявлено влияние качества растительного опада на скорость его разложения на ранних стадиях в сосновых лесах в условиях аэротехногенного загрязнения. Оценено влияние аэротехногенного загрязнения на химический состав опада хвой сосны с учетом внутрибиогеоценотической и сезонной изменчивости. Показано, что при исследовании опада необходимо учитывать внутрибиогеоценотическое варьирование его поступления. Полученные результаты представляют интерес для развития системы мониторинга лесов и исследования динамики состояния лесных экосистем в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов, в том числе изменения климата.

Защищаемые положения:

1. Количество и качество древесного надземного опада в сосновых лесах на северном пределе распространения, как в естественных условиях, так и при аэротехногенном загрязнении, характеризуются значительной многолетней, сезонной и внутрибиогеоценотической изменчивостью.
2. Скорость разложения растительного опада в лесах на северном пределе распространения зависит как от естественных факторов, таких как качество опада и мозаичность лесного покрова, так и от влияния воздушного промышленного загрязнения.

Личный вклад соискателя. Полевые исследования, сбор материала, камеральная обработка проб, анализ и обобщение результатов осуществлялись лично соискателем или при непосредственном его участии.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлены на VI Всероссийской научной конференции по лесному почвоведению с международным участием «Фундаментальные и прикладные вопросы лесного почвоведения» (г. Сыктывкар, 2015 г.); Международной школе-конференции молодых ученых «Климат и эколого-географические проблемы российской Арктики» (г. Апатиты, 2016 г.); XIV и XVI Всероссийских (с международным участием) Ферсмановских научных сессиях (г. Апатиты, 2017, 2019 гг.); XXIX и XXXI Молодежных научных школах-конференциях, посвященных памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии» (г. Петрозаводск, 2018 г.; Санкт-Петербург 2020 г.); VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» (г. Апатиты, 2019 г.); VIII Всероссийской научной конференции с международным участием «Лесные почвы и функционирование лесных экосистем» (г. Москва, 2019 г.); IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Научные основы устойчивого управления лесами» (г. Москва, 2020 г.); IX Всероссийской научной конференции с международным участием «Лесные почвы и изменение климата» (г. Москва, 2021 г.).

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 15 работ, из них 3 в журнале, индексируемом в Scopus и включенном в текущий перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 114 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 глав, 23 иллюстраций, 18 таблиц, 9 выводов. Список цитируемой литературы включает 235 источников, в том числе 101 на иностранном языке.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Лукиной Н.В. за всестороннюю помощь, отзывчивость и понимание. Автор выражает глубокую признательность коллективу лаборатории Наземных

экосистем ИППЭС ФИЦ КНЦ РАН и ЦЭПЛ РАН за помощь в проведении исследований, за поддержку и ценные советы.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В обзоре литературы рассмотрены процессы и факторы формирования и разложения древесного опада, анализируются методики изучения. Показано, что исследования древесного опада в условиях воздействия локальных источников воздушного загрязнения, включающие изучение особенностей пространственной и сезонной изменчивости формирования и разложения опада, немногочисленны. Такие исследования необходимы для достоверной оценки изменчивости экосистемных функций лесов в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на площадках постоянного наблюдения (ППН) Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН в сосняках кустарничково-лишайниковых и лишайниково-кустарничково-зеленомошных. В соответствии с уровнем загрязнения и состоянием растительности ППН представляют различные стадии дигрессионной сукцессии (табл.1-2) и расположены в автоморфных условиях по градиенту загрязнения в ЮЮЗ направлении от комбината «Североникель» на расстоянии 10 км в техногенных редколесьях, в 31 км в дефолирующих лесах и в 175 км – в лесах, формирующихся на фоновых территориях (Лукина, Никонов, 1998).

Таблица 1. Характеристика фитоценозов на площадках постоянного наблюдения (ППН) по результатам картирования и по Ершов, 2021

Фон	Дефолирующие леса	Техногенные редколесья
<i>Тип леса</i>		
Сосняк лишайниково-кустарничково-зеленомошный	Сосняк лишайниково-кустарничковый	Сосновое кустарничковое редколесье
<i>Расстояние от комбината, км</i>		
175	31	10
<i>Состав древостоя</i>		
10С ед. Б, Е	9С1Б	10С ед. Б, Е
<i>Степень дефоляции, %</i>		
13	19	25

Таблица 2. Выпадения поллютантов со снегом и дождем в 1995-2017 гг. на ППН, мг (м²)⁻¹ (по Ершов, 2021)

	Фон	Дефолирующие леса	Техногенные редколесья
<i>Выпадения со снегом</i>			
SO ₄ ²⁻	73.8* ± 52.2**	172.3 ± 88.3	327.2 ± 158.4
Cu	0.2 ± 0.4	1.0 ± 1.4	11.6 ± 13.2
Ni	0.2 ± 0.4	1.8 ± 1.6	19.9 ± 16.5
<i>Выпадения с дождем</i>			
SO ₄ ²⁻	114.2 ± 116.1	481.9 ± 516.9	517.4 ± 412.9
Cu	0.4 ± 0.6	3.1 ± 5.1	13.4 ± 24.1
Ni	0.2 ± 0.4	3.7 ± 5.3	13.9 ± 17.4

Примечание: * – среднее, ** – стандартная ошибка

Сбор опада на площадках производился с учетом методики международной программы ICP-Forests. С 1994 г. опадоуловители на ППН располагались в межкрупных пространствах, с 2013 г. – в межкрупных (МК, 7-8 шт.) и в подкрупных (ПК, 4-6 шт.) пространствах. Опад собирается в хлопковые мешки, закрепленные к нижней части воронки опадоуловителя. Отбор образцов проводится в октябре и июне.

В лабораторных условиях опад разбирался на фракции (хвоя, кора, ветки, шишки, микростробилы и др.) и взвешивался. Для расчета среднегодовых и сезонных значений массы, а также для анализа многолетней динамики массы древесного опада использовались данные до 2012 года, дополненные данными по МК за период 2013-2020 гг. Масса опада с учетом внутрибиогеоценотического варьирования (площади ПК и МК пространств) рассчитывалась за период 2014-2020 гг.

Эксперимент по разложению растительного опада выполнялся лабораторией Наземных экосистем ИППЭС КНЦ РАН в 1997-1999 гг. Для сравнения процессов разложения опада в сосновых и еловых лесах использовали данные сходного эксперимента в еловых лесах 1996-1999 гг. (Lukina et al., 2017) с соблюдением единообразия методов проведения опыта и статической обработки данных экспериментов. На ППН в сосновых лесах в ПК и МК пространствах отбирали образцы опада листьев и хвои древесных видов (*Pinus sylvestris*, *Betula pendula*) и листьев кустарничков (*Vaccinium vitis-idaea*, *Vaccinium myrtillus* и *Empetrum hermaphroditum*), закладывали в пакеты из синтетического материала и размещали в ПК и МК

пространствах в подгоризонт L подстилки в двух повторностях для каждой фракции. Пробы отбирали в октябре через 1 и 2 года (всего 105 пакетов).

Химический состав определяли для образцов эксперимента по разложению 1997-1999 гг. и для образцов опада хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) 2014-2017 гг. (ПК и МК для каждого из сезонов отбора, всего 99 шт.). Матрицу данных по химическому составу опада хвои сосны 2014-2017 гг. дополнили результатами анализа исходного состава опада хвои, отобранной в сентябре 1997 года для эксперимента по разложению.

Концентрации элементов, определяли методами атомно-абсорбционной спектрометрии (Ca, Mg, K, Al, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni), Кьельдаля (N), Тюрина ($C_{орг}$), колориметрии (P) (Воробьева, 1998), содержание лигнина – путем обработки пробы 72%-ной H_2SO_4 после предварительного кипячения в растворе ЦТАБ (10 грамм цетилтриметиламмония бромида в 1 л 0.5M H_2SO_4) (Rowland, Roberts, 1994).

Процессы разложения оценивали через потери массы образцов, коэффициент обогащения (КО) для каждого элемента и потери элементов и лигнина с учетом темпов потери массы.

Статистический анализ данных по массе опада выполнялись в MS Excel, U-тест Манна-Уитни – в Statistica 7.0 и 13.3. Влияние воздушного загрязнения (через стадии дигрессии), сезонной изменчивости (теплый/холодный периоды года) и внутрибиогеоценотического варьирования (ПК/МК пространства) на химический состав опада сосны оценивали по величине коэффициента детерминации R^2 . Для идентификации основных факторов разложения опада, использовали метод главных компонент (PCA). Обработка данных по химическому составу опада хвои сосны, оценка влияния формации лесов (еловые и сосновые) и воздушного загрязнения на потери массы, потери элементов при разложении производились с помощью V-критерия (Husson et al., 2017) в среде статистического программирования R (R CoreTeam..., 2017).

ГЛАВА 3. МАССА И ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ ДРЕВЕСНОГО ОПАДА В СОСНОВЫХ ЛЕСАХ

Общая масса надземного опада и масса основных фракций (кора, ветки, шишки) по среднегодовым значениям в 1995-2020 гг. в МК пространствах сосняков фоновых условий достоверно выше ($p < 0.05$), чем в дефолирующих лесах и

техногенных редколесьях, поскольку в фоновых условиях возраст древостоя и древесная фитомасса выше (табл. 3).

Таблица 3. Среднегодовые значения массы фракций древесного опада в сосновых лесах на разных стадиях дигрессии за период 1995-2020 гг. в МК пространствах, кг га⁻¹год⁻¹ (n=2-26)

	Фон	Дефолирующие леса	Техногенные редколесья
Хвоя сосны	412.5* ± 26.5**	339.1 ± 28.9	337.2 ± 28.4
Кора сосны	109.4 ± 5.0	63.0 ± 5.2	57.2 ± 4.5
Ветки сосны	32.4 ± 4.7	10.2 ± 1.5	20.1 ± 3.5
Шишки сосны	75.1 ± 13.1	35.8 ± 5.5	53.7 ± 10.2
Микростробилы	12.0 ± 1.6	9.8 ± 1.9	3.2 ± 1.0
Семена сосны	0.8 ± 0.2	1.3 ± 0.4	1.6 ± 0.5
Листья берёзы	3.9 ± 0.9	17.7 ± 2.0	35.5 ± 6.9
Семена берёзы	0.1 ± 0.1	0.2 ± 0.2	0.7 ± 0.5
Хвоя ели	0.1 ± 0.02	0.3 ± 0.1	4.2 ± 0.6
Эпифитные лишайники	3.3 ± 0.6	0.1 ± 0.1	-
Листья ивы	-	1.1 ± 1.0	3.4 ± 1.2
Неидент. остатки	10.6 ± 1.0	9.2 ± 0.7	17.9 ± 1.6
Общая масса опада	656.9 ± 31.3	483.0 ± 35.6	528.5 ± 35.1

Примечание: * – среднее, ** – стандартная ошибка, «-» – нет значения

На стадиях техногенной дигрессии достоверно увеличивается вклад листьев берёзы: в дефолирующих лесах это связано с большей представленностью берёзы, в техногенных редколесьях – с усыханием берёзы в 2006-2012 гг. В условиях загрязнения по сравнению с фоновыми уменьшается доля эпифитных лишайников как чувствительного к воздушному загрязнению компонента биоразнообразия в биогеоценозах.

Результаты корреляционного анализа с учетом всех ППН на всех стадиях дигрессии, показали, что размер общего опада сосняков в период исследования в наибольшей степени был отрицательно связан с объемом выбросов соединений Ni и SO₂ комбинатом «Североникель».

Сравнение показателя отношения опада хвои к ее приросту в 1995 и 2015 гг. выявило значительное его увеличение в техногенном редколесье в течение двадцати лет, а также возрастание отношения опада хвои к общей массе хвои на стадиях дигрессии за

20 лет, что свидетельствуют о преобладании процесса дефолиации над продукцией в этих древостоях.

Многолетняя динамика демонстрирует четкие тенденции к увеличению общей массы, а также основных фракций (хвоя и кора сосны) древесного опада в условиях загрязнения, что при снижении выбросов (Цветков В., Цветков И., 2012) связано с ослаблением деревьев и преждевременным отмиранием отдельных органов, с другой стороны – с повышением возраста древостоев (рис. 1). В техногенном редколесье наблюдается увеличение массы листьев березы в период 2006-2012 гг. с последующим снижением, что может свидетельствовать об усыхании берёзы.

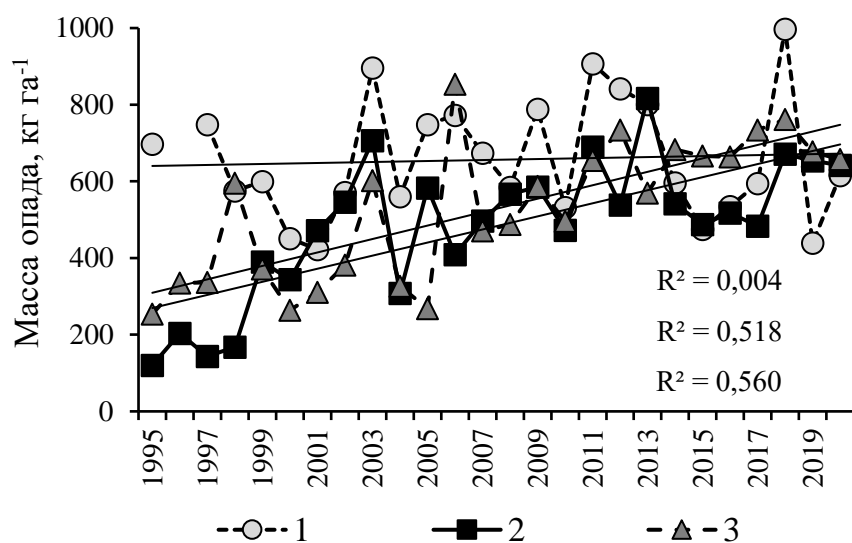


Рисунок 1. Многолетняя динамика общей массы древесного опада сосновых лесов в межкрупных пространствах на разных стадиях техногенной дигрессии (1995-2020 гг.): 1 – фон, 2 – дефолирующие леса, 3 – техногенные редколесья

Сезонная изменчивость поступления древесного опада. Количество поступающего древесного опада в сосновых лесах проявляет выраженную сезонную изменчивость. Как в фоновых условиях, так и в условиях аэротехногенного загрязнения, в теплый период в опаде преобладают хвоя, кора и шишки сосны, в холодное время года – хвоя и кора сосны (рис. 2). В холодный период года доля коры и ветвей сосны больше, чем в теплый, что, возможно, связано с механическим воздействием снега: ветви обламываются под снеговыми массами.

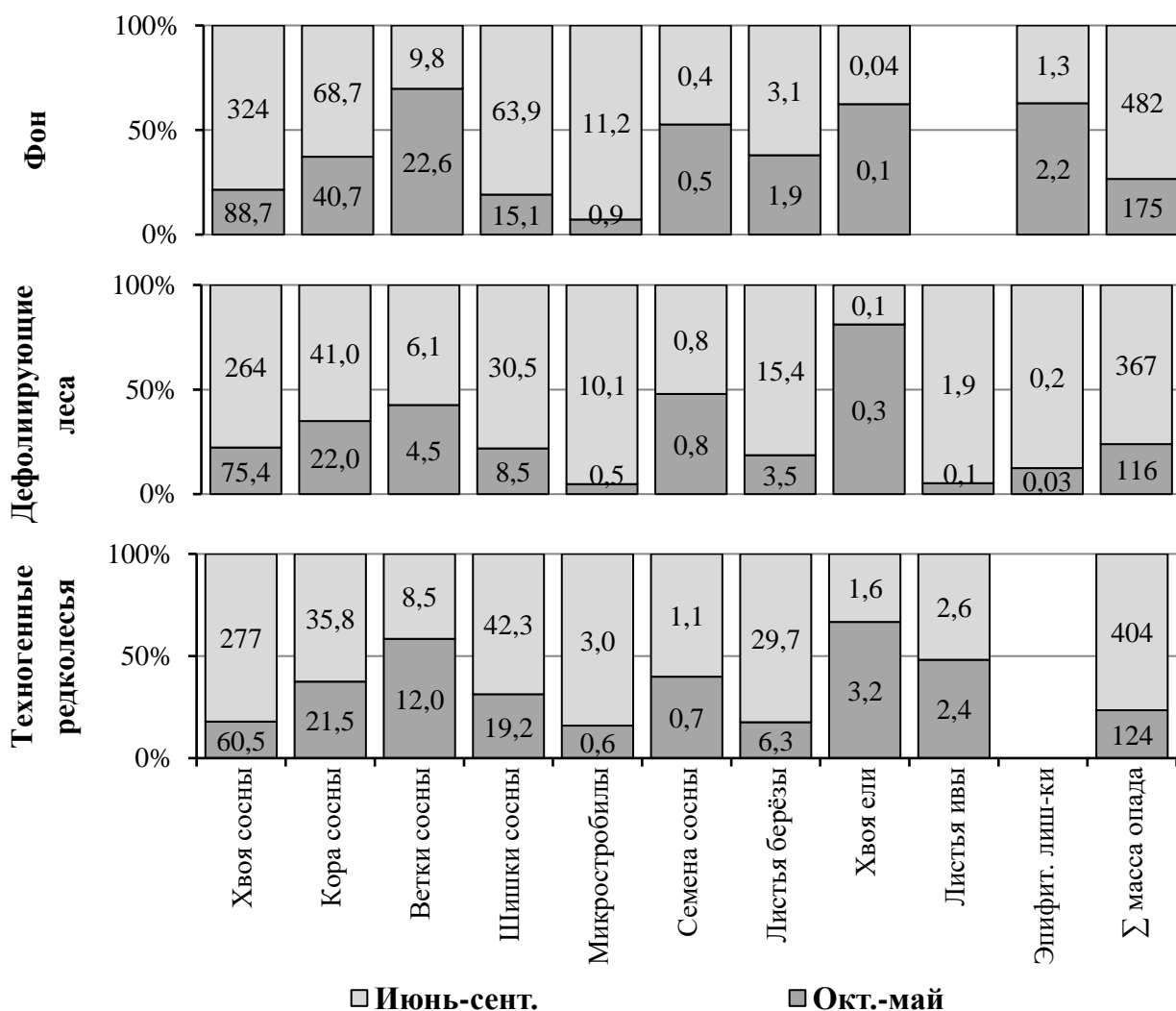


Рисунок 2. Среднегодовое поступление фракций древесного опада по сезонам отбора на разных стадиях дигрессии за период 1995-2020 гг. в МК пространствах. На диаграммах обозначены средние значения массы для сезонов отбора в кг га⁻¹

Внутрибиогеоценотическая изменчивость поступления древесного опада.

Анализ данных с учетом доли площадей ПК и МК пространств за период 2014-2020 гг. показал, что суммарная масса опада в среднем за этот период в фоновых условиях и на стадиях дигрессии сопоставимы, что отличается от результатов без учета внутрибиогеоценотической изменчивости. В сосняках фоновых условий и на стадиях дигрессии по средним значениям в опаде ПК пространств преобладает хвоя, ветки, шишки и кора сосны, между крон – хвоя сосны (рис. 3).

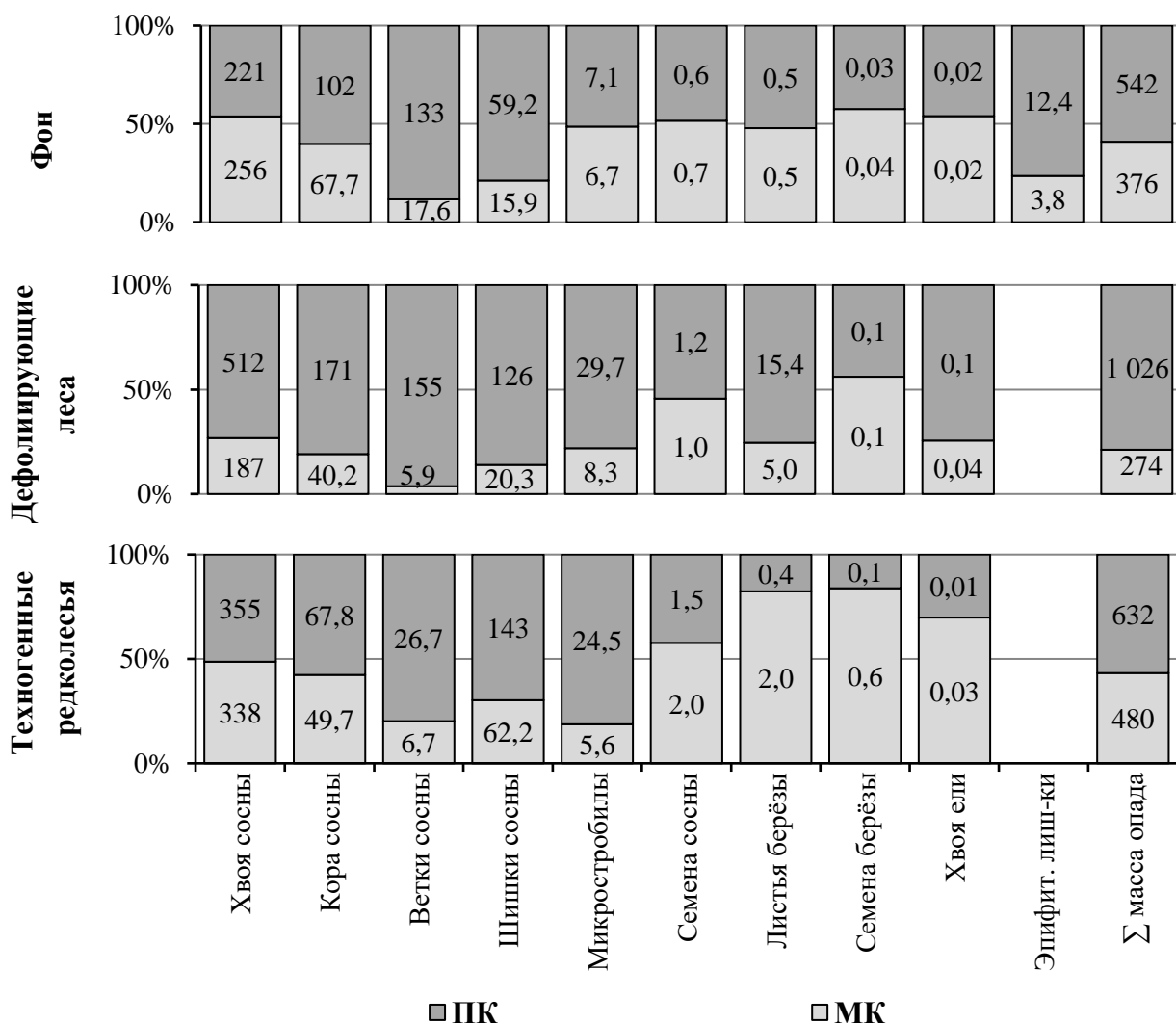


Рисунок 3. Внутробиогеоценотическое распределение древесного опада в сосновых лесах на разных стадиях техногенной дигрессии: ПК – подкроновые пространства, МК – межкроновые пространства; на диаграммах обозначены средние значения массы в ПК и МК пространствах в кг га⁻¹

Статистический анализ показал, что в сосняке фоновых условий между крон деревьев опадает больше коры, чем в сосняках, подверженных влиянию воздушного загрязнения ($p < 0.05$). При этом в подкроновых пространствах дефолирующих лесов опадает больше хвои и коры сосны, в редколесьях – шишек ($p < 0.05$), по сравнению с фоновыми условиями, что связано с ослаблением деревьев, вызванным длительным воздействием загрязняющих веществ. Общая масса листьев берёзы в дефолирующих лесах выше, чем в фоновых условиях и техногенных редколесьях ($p < 0.05$), что объясняется большей представленностью берёзы в древостоях дефолирующих лесов.

ГЛАВА 4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДРЕВЕСНОГО ОПАДА

Химический состав опада хвои сосны в фоновых условиях и при аэротехногенном загрязнении. Как показывают результаты дисперсионного анализа, воздушное загрязнение оказывает наиболее существенное влияние на содержание в опаде хвои сосны обыкновенной Mn, Ni, Cu, S, Fe ($R^2=0.4\div 0.7$, $p<0.05$), P, Ca, Al, Mg, а также на величину соотношения C:P ($R^2=0.2\div 0.3$, $p<0.05$).

В сосновых лесах, формирующихся в фоновых условиях, опад хвои сосны характеризуется относительно высоким содержанием Mg, Mn и Zn и низким – Al, Fe, Ni, Cu, S ($p<0.05$) (табл. 4). В дефолирующих лесах опад отличается самым низким содержанием Ca и Mg, но при этом высоким содержанием P ($p<0.05$), что связано со снижением возраста хвои на ветвях (P) из-за преждевременного ее опадения и с выщелачиванием элементов из хвои на деревьях кислотными осадками (Ca, Mg). Увеличение концентрации P может объясняться также и проявлением связи в соотношении N:P:K (Сазонова и др., 2005). В техногенных редколесьях опад ассимилирующих органов сосны характеризуется высокими концентрациями Ca, Al, Fe, Ni, Cu, S и низкими – Mn, Zn и P ($p<0.05$), что может объясняться проявлением антагонизма между элементами (Mn, Zn, Ni, Cu, Fe) (Лукина и др., 2005; Steinnes et al., 2000; Rautio et al., 1998; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989 и др.). Низкое содержание P в хвойном опаде техногенных редколесий может быть связано с изначально дефицитным уровнем в хвое сосны (Сухарева, Лукина, 2014), а также обусловлено антагонизмом с Ca, как в еловой хвое на стадии интенсивной дефолиации (Лукина и др., 2008). Высокое содержание Ca в опаде хвои сосны в техногенных редколесьях связано с богатыми кальцием почвообразующими породами с габбро- и габброноритами вблизи комбината (Лукина, Никонов, 1996; Ананьева и др., 2012; Лукина и др., 2008 и др.).

Таблица 4. Химический состав опада хвои сосны в сосновых лесах на разных стадиях дигрессии (n=32-38)

Параметр		V-критерий			Среднее			Стандартное отклонение			Общее среднее	Общее стандартное отклонение	p		
		Ф	Д	Р	Ф	Д	Р	Ф	Д	Р			Ф	Д	Р
Ca	мг кг ⁻¹	-0.40	-4.40	4.77	4398	3875	5056	1154	584	591	4448	950	0.69	<0.01	<0.01
Mg		3.18	-4.24	1.02	445	311	407	162	111	80	389	134	<0.01	<0.01	0.31
K		-0.09	0.70	-0.60	684	725	658	198	505	389	689	380	0.93	0.49	0.55
Al		-4.67	2.15	2.56	376	549	558	72	167	237	493	191	<0.01	0.03	0.01
Fe		-4.93	-1.01	5.97	135	213	356	65	125	159	234	153	<0.01	0.31	<0.01
Mn		7.42	0.44	-7.90	1072	755	367	282	126	99	734	347	<0.01	0.66	<0.01
Zn		2.48	0.67	-3.15	941	776	426	902	559	332	715	671	0.01	0.50	<0.01
Ni		-5.61	-3.02	8.64	4	69	387	3	22	193	153	202	<0.01	<0.01	<0.01
Cu		-5.72	-2.36	8.11	2	20	78	2	6	43	33	41	<0.01	0.02	<0.01
S		-6.00	0.24	5.80	207	411	597	187	187	141	403	235	<0.01	0.81	<0.01
P		-0.72	5.23	-4.47	307	371	267	79	68	51	314	79	0.47	<0.01	<0.01
N		0.30	1.38	-1.65	3434	3599	3156	1203	973	932	3393	1053	0.77	0.17	0.10
C _{орг}	%	0.36	0.74	-1.10	57	57	56	4	7	4	57	5	0.72	0.46	0.27
C:N		1.28	-1.48	0.19	210	173	196	143	57	55	193	96	0.20	0.14	0.85
C:P		0.70	-4.76	4.02	1982	1618	2199	491	268	418	1937	467	0.48	<0.01	<0.01
N:P		0.65	-2.80	2.10	11	10	12	4	2	3	11	3	0.52	0.01	0.04

Примечание: здесь и в таблице 5 Ф – фоновые леса, Д – дефолирующие леса, Р – техногенные редколесья, p – вероятность ошибки 1-го рода при расчете V-критерия

Сезонная и внутрибиогеоценотическая изменчивость химического состава опада хвои сосны на разных стадиях дигрессии. В сосняках фоновых условий опад, отобранный после зимы, отличается высоким содержанием Fe, Zn, Cu, P и S ($R^2=0.14\div 0.5$; $p<0.05$), что, предположительно, связано как с фоновым загрязнением соединениями Fe, Zn, Cu, S, так и влиянием в зимний период снеговых масс, способствующих поступлению в опадоуловители молодой хвои (P). После теплого периода опад характеризуется высокими концентрациями Ca и Mn, накапливающихся за вегетационный сезон, и более высоким соотношением C:P ($R^2=0.2\div 0.6$; $p<0.05$). В дефолирующих сосновых лесах хвойный опад холодного периода года характеризуется более высокими концентрациями Al, Fe, Zn, Ni, Cu и широким отношением N:P ($R^2=0.2\div 0.9$; $p<0.05$), опад теплого периода, как и в фоновых условиях, отличается высоким содержанием ($R^2=0.2\div 0.5$; $p<0.05$) не способных к ретранслокации внутри деревьев Ca и Mn, содержащихся в наибольших концентрациях в стареющей и опадающей хвое. В техногенных редколесьях опад хвои холодного периода года содержит больше Fe, Zn, Ni и Cu ($R^2=0.4\div 0.7$; $p<0.05$), теплого периода – больше Mg, K и Mn ($R^2=0.3$; $p<0.05$). Накопление K и Mg к концу вегетационного сезона может свидетельствовать о нарушении процессов ретранслокации в условиях загрязнения (Nieminen, Helmisaari, 1996). Наблюдается значительное снижение содержания Fe и Zn в опаде после завершения вегетационного периода во всех изученных сосняках и Ni и Cu – в сосняках, подверженных воздушному загрязнению. В фоновых условиях это может объясняться возможным антагонизмом с ионами Mn, концентрация которого как малоподвижного элемента, напротив, увеличивается (Лукина и др., 2008), а в условиях аэротехногенного загрязнения дополняется выщелачиванием и смывом с поверхности хвои в летний период подкисленными осадками.

В фоновых условиях опад хвои сосны под кронами деревьев отличается высоким содержанием подвижных K и P ($R^2=0.14\div 0.3$; $p<0.05$), поступающих с кроновыми и стволовыми водами, а также, возможно, обусловлено большей долей в опаде под кронами молодой хвои. Между крон опад содержит больше Fe, Zn, Ni и Cu ($R^2=0.3\div 0.2$; $p<0.05$), что может быть связано с фоновым аэротехногенным загрязнением, вызванным переносом на значительные расстояния поллютантов в аэрозолях (Ершов и др., 2019). В дефолирующих лесах под кронами опад хвои характеризуется высоким содержанием Ca, Mg, K, Mn, P, N и S ($R^2=0.2\div 0.5$; $p<0.05$), поступающих с кроновыми и стволовыми

водами в результате выщелачивания из крон деревьев (Ca, Mg, K, Mn, P) и с кислотными атмосферными осадками (S). Соотношения C:N и C:P выше в межкрупных пространствах ($R^2=0.13 \div 0.3$; $p < 0.05$) за счет меньшей концентрации фосфора при сходном с подкрупными пространствами содержании углерода в опаде. В техногенных редколесьях содержание Ca в хвойном опаде выше под кронами деревьев ($R^2=0.3$; $p < 0.05$), что может быть связано с интенсивным выщелачиванием кальция из хвои и поступлением с крупными и стволовыми водами.

ГЛАВА 5. РАЗЛОЖЕНИЕ ДРЕВЕСНОГО ОПАДА

Исходный состав растительных остатков и темпы разложения древесного опада в сосновых лесах на разных стадиях дигрессии связаны с уровнем аэротехногенного загрязнения. Анализ состава древесного опада и скорости разложения его отдельных фракций на основе метода главных компонент показывает, что более 50% вариации объясняется снижением уровня атмосферного загрязнения – первая ось (рис. 4). Тесные отрицательные корреляции проявляют концентрации C_{org} (-0.72), Al (-0.68), Fe (-0.72), Cu (-0.75), отношения лигнин:N (-0.80) и C:N (-0.76); тесные положительные корреляции – Ca (0.64), Mg (0.68), K (0.84), Mn (0.80).

Вторая ось – градиент качества опада (объясняет 17.3% вариации данных). С этой осью положительно коррелируют элементы питания. По скорости разложения выделяются: 1) наиболее быстро разлагающийся опад берёзы с высокой концентрацией Zn и Mg и узким отношением N:P; 2) бедный элементами питания и слабо разлагающийся опад хвои сосны с широким отношением C:N; 3) опад вороники с широким отношением лигнин:N. Опад хвои ели вместе с опадом кустарничков рода *Vaccinium* отличаются наиболее высоким исходным содержанием Ca, Mn и K, что способствует активному разложению их опада.

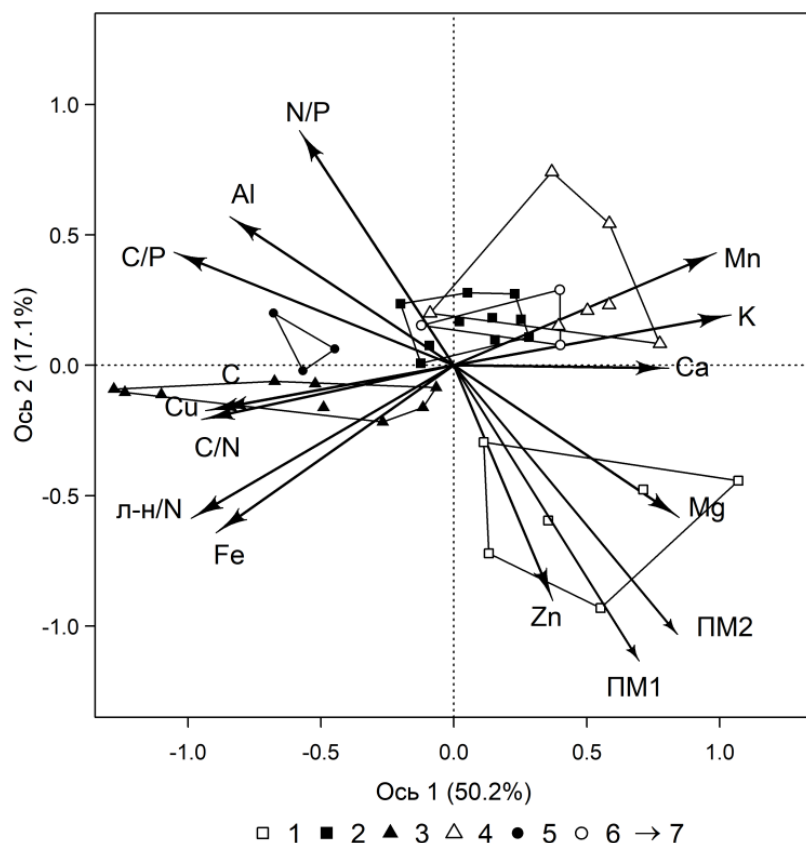


Рисунок 4. Положение образцов опада в пространстве двух первых осей анализа главных компонент. 1 – листья берёзы, 2 – листья брусники, 3 – листья вороники, 4 – листья черники, 5 – хвоя сосны, 6 – хвоя ели, 7 – векторы переменных, л-н – лигнин, ПМ1 и ПМ2 – потери массы за первый и второй год

В опаде дефолирующих лесов и редколесий по сравнению с фоновыми условиями исходные концентрации Ca, Mg, Mn и Zn ниже, тогда как содержание Ni и Cu существенно выше, что связано с влиянием эмиссий комбината «Североникель». На стадиях дигрессии повышается также содержание P и K в хвое сосны: опадание хвои не только в фенологические сроки приводит к активизации перемещения мобильных элементов в молодые ткани, при этом и опадает более молодая хвоя.

Изменения качества опада определяют изменения скорости разложения растительных остатков. Снижение скорости потери массы при разложении за 2 года в условиях воздушного загрязнения по сравнению с фоновыми условиями в сосновых лесах наиболее заметно для хвои сосны и листьев вороники (рис. 5).

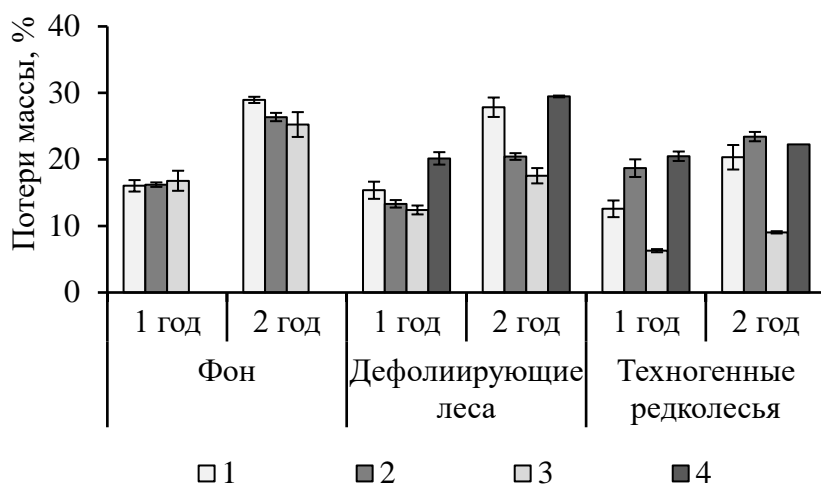


Рисунок 5. Скорость потерь массы опада доминирующих видов растений через 1 и 2 года разложения в сосновых лесах на разных стадиях техногенной дигрессии. Опад: 1 – хвоя сосны, 2 – листьев брусники, 3 – листьев вороники, 4 – листьев черники

Анализ величин КО и потерь элементов и лигнина с учетом потери массы выявил особенности *изменения химического состава древесного опада в процессе разложения в сосновых лесах на разных стадиях дигрессии*. Опад в фоновых условиях через 2 года разложения отличается от растительных остатков в дефолирующих лесах и редколесьях высоким уровнем потерь N, Al, Ni и Cu и низким – Ca, Mg, Mn. В дефолирующих лесах опад в наиболее значительной степени обеднялся Mg и обогащался N, в техногенных редколесьях – отличался самым низким уровнем обеднения $C_{орг}$, высоким – Ca и Mn, выщелачивающихся при разложении кислотными осадками, а также высоким уровнем обогащения Al, Ni, Cu и Fe. Потери Mg в опаде дефолирующих лесов обусловлены значительным снижением вследствие влияния кислотных осадков, а обогащение азотом – вымыванием его из крон и поступлением в опад. Относительно высокие потери азота в фоновых условиях и низкие потери органического углерода в техногенных редколесьях объясняются разницей в скорости потери массы опада, которая снижается в условиях загрязнения.

Стехиометрические соотношения лигнин:N, C:N и N:P возрастали в условиях загрязнения по сравнению с фоновыми от 46 до 66, от 74 до 89 и от 13 до 15.

Сравнение скорости разложения опада в ельниках и сосняках на северном пределе распространения показало, что в фоновых условиях опад вечнозеленых растений еловых лесов (хвоя ели, листья брусники и вороники) с более высоким содержанием элементов питания и более узкими соотношениями C:N и лигнин:N разлагался заметно быстрее, чем сосновых (хвоя сосны, листья брусники и вороники) (табл. 5).

Таблица 5. Потери массы, элементов и лигнина активными фракциями опада (хвоя, листья) вечнозелёных растений (*Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Empetrum hermaphroditum*) в хвойных лесах на разных стадиях дигрессии

Показатель	V-критерий			Среднее			Стандартное отклонение			Общее среднее			Общее стандартное отклонение			p		
	Ф	Д	Р	Ф	Д	Р	Ф	Д	Р	Ф	Д	Р	Ф	Д	Р	Ф	Д	Р
Потери массы, %																		
Е-БГЦ, n=15	3.44	-0.13	0.14	35	22	18	5	7	10	31	22	17	6	6	8	<0.01	0.90	0.89
С-БГЦ, n=12	-3.44	0.13	-0.14	27	22	17	3	5	7									
Потери элементов и лигнина, % (Е-БГЦ n=6; С-БГЦ n=11-12)																		
Ca*	1.48	2.25	1.60	16	33	34	11	19	20	12	23	26	9	13	15	0.14	0.02	0.11
Ca**	-1.48	-2.25	-1.60	10	17	22	7	6	11									
Mn*	-0.56	2.33	0.70	9	54	48	13	25	36	11	37	42	10	22	24	0.58	0.02	0.48
Mn**	0.56	-2.33	-0.70	12	28	39	8	14	15									
Fe*	-0.05	-0.79	-2.08	-50	-89	-247	84	148	197	-50	-65	-143	57	89	148	0.96	0.43	0.04
Fe**	0.05	0.79	2.08	-49	-53	-86	42	44	75									
Al*	-2.75	-1.64	-2.89	-13	-52	-158	17	97	99	1	-19	-70	15	59	90	0.01	0.10	<0.01
Al**	2.75	1.64	2.89	8	-2	-23	8	15	29									
C _{орг} *	1.93	-0.79	1.34	33	17	20	11	16	8	27	20	17	9	13	7	0.05	0.43	0.18
C _{орг} **	-1.93	0.79	-1.34	24	22	15	7	12	6									
N*	0.33	1.40	-2.93	10	1	-15	5	4	12	9	-4	-1	8	11	14	0.74	0.16	<0.01
N**	-0.33	-1.40	2.93	8	-7	6	10	13	8									
Cu*	-1.61	-1.95	-1.85	2	-466	-759	47	599	922	22	-215	-384	36	375	600	0.11	0.05	0.06
Cu**	1.61	1.95	1.85	32	-90	-179	26	56	139									
Ni*	-0.53	-1.77	-1.86	25	-121	-189	52	155	179	32	-62	-109	37	97	127	0.59	0.08	0.06
Ni**	0.53	1.77	1.86	35	-33	-65	29	31	64									
P*	0.02	1.06	-1.92	19	24	-7	16	21	21	19	19	5	15	14	18	0.98	0.29	0.05
P**	-0.02	-1.06	1.92	19	16	11	15	9	14									
Zn*	1.05	-0.53	-2.14	16	10	-22	10	15	49	14	12	2	7	13	34	0.29	0.60	0.03
Zn**	-1.05	0.53	2.14	12	14	16	5	12	12									
Лигнин*	0.10	0.21	-0.77	-51	-80	-118	76	86	112	-54	-88	-91	88	98	102	0.92	0.83	0.44
Лигнин**	-0.10	-0.21	0.77	-56	-91	-77	97	106	98									

Примечание: * – в ельниках, ** – в сосняках; Е-БГЦ – еловый биогеоценоз, С-БГЦ – сосновый биогеоценоз

Максимальных значений потери массы опада достигают в МК пространствах ельников, минимальных – в ПК пространствах сосняков, что может объясняться различиями в биомассе грибов в вегетационный период (Полянская и др., 2001; Никонов и др., 2001), низкой долей сапротрофных грибов, эффективнее разлагающих свежий опад (Bödeker et al., 2016) и пространственными различиями температуры почв в зимний период, связанными с мощностью снегового покрова (Lukina et al, 2017).

Опад листьев берёзы (*B. pendula*), доминирующей на сухих и бедных почвах (Лихачев, 1959; Новикова, 2016), характерных для сосновых лесов в автоморфных условиях, разлагается быстрее, чем опад листьев *B. pubescens* (рис. 6), доминирующей на более плодородных и влажных почвах, характерных для еловых лесов. Это, вероятно, обусловлено тем, что листья *B. pendula* отличаются небольшим отношением N:P, отрицательно связанным со скоростью разложения, а также пониженным содержанием полифенолов (Ветчинникова, 2004; Raal et al., 2015).

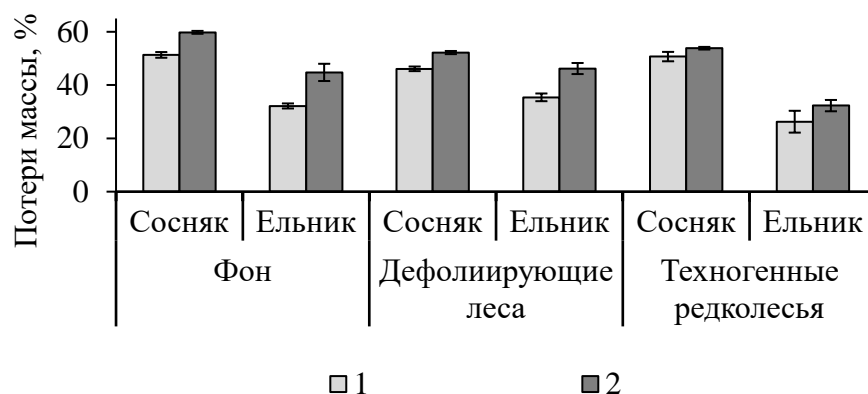


Рисунок 6. Скорость потерь массы листьев берёзы через (1) и (2) года разложения в сосновых и еловых лесах на разных стадиях техногенной дигрессии

В дефолирующих лесах и редколесьях опад еловых и сосновых лесов разлагался с сопоставимыми скоростями, что связано с мощным негативным влиянием воздушного промышленного загрязнения на качество опада и почвенных деструкторов (Никонов и др., 2001; Фомичева и др., 2006; Зенкова, 2000 и др.). В дефолирующих лесах наблюдается активное накопление Cu и Ni и потери Ca, Mn, связанные с более высоким уровнем аэротехногенного загрязнения и более ярко выраженными, чем в сосновых лесах, процессами подкисления осадков (Ершов, 2021; Лукина, Никонов, 1996). В техногенных редколесьях можно отметить высокие уровни накопления N, P, Al, Zn, Fe, Ni и Cu через 2 года разложения, которые, объясняются обогащением растительных остатков этими элементами в результате более эффективного связывания их

органическими соединениями, в том числе лигнином, о чем свидетельствуют стехиометрические соотношения C:N – 60 в ельниках против 89 в сосняках и лигнин:N – 49 в ельниках против 66 в сосняках (Lukina et al., 2017).

ВЫВОДЫ

1. В дефолирующих лесах и техногенных редколесьях выявлены четкие тенденции к увеличению общей массы опада и опада хвои и коры сосны в многолетней динамике, что, несмотря на снижение выбросов, связано с ослаблением деревьев, преждевременным отмиранием отдельных органов деревьев, а также повышением возраста и, соответственно, фитомассы древостоев. В условиях загрязнения, по сравнению с фоновыми условиями, в древесном опаде увеличивается масса фракций листьев и семян берёзы, что в дефолирующих лесах связано с возрастанием вклада берёзы в состав древостоя и подроста, а в техногенных редколесьях свидетельствует об усыхании берёзы в период наблюдений.

2. В условиях воздушного загрязнения наблюдается значительное увеличение отношения массы опада хвои сосны к массе хвои текущего года за 20 лет, что свидетельствует об интенсификации процесса дефолиации в связи с длительным воздействием воздушного загрязнения.

3. В фоновых условиях и при аэротехногенном загрязнении масса древесного опада его фракционный и химический состав характеризуются значительной сезонной изменчивостью: в теплый период в опаде преобладают хвоя и кора сосны; в зимний период увеличивается вклад коры и ветвей, что объясняется механическим воздействием снеговых масс. Выявлено изменение сезонной динамики химического состава опада под влиянием аэротехногенного загрязнения, проявляющееся в накоплении Mg и K в хвойном опаде теплого периода, что может объясняться нарушением процессов ретранслокации элементов внутри деревьев.

4. Размеры и структура древесного опада характеризуются значительной внутрибиогеоценотической изменчивостью: в древостоях всех стадий дигрессии и в фоновых условиях в опаде под кронами преобладают хвоя, ветки, шишки и кора сосны, между крон деревьев – хвоя сосны. Аэротехногенное загрязнение вызвало увеличение массы опада хвои под кронами дефолирующих лесов.

5. Внутрибиогеоценотической изменчивостью характеризуется и химический состав опада хвои сосны: в фоновых условиях под кронами опад содержит больше К и Р, что объясняется вымыванием и выщелачиванием подвижных соединений этих элементов питания из крон и стволов, между крон – больше Fe, Zn, Ni и Cu в связи с фоновым воздушным загрязнением. В условиях высокого уровня загрязнения в опаде под кронами содержится больше Ca, Mg, K, Mn, P, N и S, что объясняется более интенсивными процессами выщелачивания элементов питания из крон.

6. Разложение опада хвои сосны в условиях загрязнения замедляется по сравнению с фоновыми условиями вследствие снижения исходных концентраций Ca, Mg, Mn и Zn, повышения концентраций Ni и Cu, а также накопления в процессе разложения Fe, Al, Ni и Cu, потерь Ca, K, Mg и Mn и увеличения соотношений C:N, лигнин:N и N:P.

7. Сравнение процессов разложения опада в сосновых и еловых лесах выявило различия, связанные с качеством растительного материала, обусловленного типом леса и видовыми особенностями. В фоновых условиях опад вечнозеленых растений еловых лесов с более высоким содержанием элементов питания и относительно узкими отношениями C:N и лигнин:N разлагался быстрее, чем сосновых. При этом в сосновых лесах опад листьев *B. pendula* с меньшим исходным отношением N:P разлагался активнее, чем опад листьев *B. pubescens* в ельниках.

8. Мощное негативное влияние аэротехногенного загрязнения привело к нивелированию различий в темпах потери массы опада между еловыми и сосновыми дефолирующими лесами и редколесьями. В дефолирующих ельниках наблюдаются более активное накопление Cu и Ni и значительные потери Ca и Mn в ходе разложения по сравнению с сосняками, что объясняется более высоким уровнем аэротехногенного загрязнения и более выраженным подкислением осадков в ельниках.

9. Результаты исследования наглядно демонстрируют необходимость учета сезонной и пространственной изменчивости процессов формирования и разложения древесного опада, связывающего древесный ярус растительности с почвой в лесных экосистемах, для достоверной оценки динамики состояния лесных экосистем в естественных условиях и при аэротехногенном загрязнении.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в журналах из списка рекомендованных ВАК:

1. **Иванова, Е. А.** Варьирование массы и фракционного состава древесного опада в сосняках кустарничково-лишайниковых при аэротехногенном загрязнении / Е. А. Иванова, Н. В. Лукина // Лесоведение. – 2017. – № 5. – С. 47–58. (Scopus)
2. **Иванова, Е. А.** Влияние аэротехногенного загрязнения на скорость разложения растительных остатков в сосновых лесах на северном пределе распространения / Е. А. Иванова, Н. В. Лукина, М. А. Данилова, Н. А. Артемкина, В. Э. Смирнов, В. В. Ершов, Л. Г. Исаева // Лесоведение. – 2019. – № 6. – С. 533–546. (Scopus)
3. **Иванова, Е. А.** Влияние воздушного промышленного загрязнения на химический состав опада хвои сосны в сосновых лесах на северном пределе распространения / Е. А. Иванова, Н. В. Лукина, В. Э. Смирнов, Л. Г. Исаева // Лесоведение. – 2022. – № 2. – С. 157–171. (Scopus)

Публикации в прочих научных изданиях:

1. **Иванова, Е. А.** Динамика массы и фракционного состава древесного опада сосновых лесов Кольского полуострова в условиях аэротехногенного загрязнения / Е. А. Иванова, Н. В. Лукина // Фундаментальные и прикладные вопросы лесного почвоведения. Тез. докл. VI Всеросс. науч. конф. по лесному почвоведению с междунар. участием. – Сыктывкар: изд-во Коми НЦ УрО РАН, 2015. – С. 254–255.
2. **Иванова, Е. А.** Методика исследования изменений массы и фракционного состава древесного опада сосняков в условиях аэротехногенного загрязнения Кольского полуострова / Е. А. Иванова, Л. Г. Исаева // Климат и эколого-географические проблемы Российской Арктики. Тез. докл. междунар. школы-конференции молодых ученых. – Апатиты: ООО «КаЭМ», 2016. – С. 29.
3. **Иванова, Е. А.** Динамика опада хвои сосны, формирующей древостой в лесах на разных стадиях дигрессионной сукцессии / Е. А. Иванова, Н. В. Лукина // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2017. – Вып. 14. – С. 394–397.
4. **Иванова, Е. А.** Формирование древесного опада сосновых лесов на северном пределе распространения в условиях аэротехногенного загрязнения / Е. А. Иванова, Л. Г. Исаева, В. В. Ершов // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. Тез. докл. XXIX молодеж. науч. школы-конференции, посвященной памяти член-корр. АН

СССР К. О. Кратца и акад. РАН Ф. П. Митрофанова. – Петрозаводск: изд-во Института геологии КарНЦ РАН, 2018. – С. 249–252.

5. **Иванова, Е. А.** Динамика массы и состава древесного опада в сосняке Лапландского заповедника / Е. А. Иванова, Л. Г. Исаева // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2019. – Вып. 16. – С.211–215.

6. **Иванова, Е. А.** Сравнительная оценка скорости разложения растительных остатков в хвойных лесах на северном пределе распространения в естественных условиях и при аэротехногенном загрязнении / Е. А. Иванова, Н. В. Лукина, М. А. Данилова, Н. А. Артемкина, В. Э. Смирнов, В. В. Ершов, Л. Г. Исаева // Лесные почвы и функционирование лесных экосистем. Материалы VIII Всеросс. науч. конф. с междунар. участием. – М.: ЦЭПЛ РАН, 2019. – С. 234–237.

7. **Иванова, Е. А.** Пространственная изменчивость поступления древесного опада в сосновых лесах Кольского полуострова / Е. А. Иванова, Н. В. Лукина, Л. Г. Исаева // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. Тез. докл. XXXI молод. науч. школы-конференции, посвященной памяти член-корр. АН СССР К. О. Кратца. – СПб.: ИГГД РАН, 2020. – С. 93–96.

8. **Иванова, Е. А.** Оценка влияния аэротехногенного загрязнения на формирование и разложение древесного опада в северотаежных сосновых лесах / Е. А. Иванова, Н. В. Лукина, М. А. Данилова, Н. А. Артемкина, В. Э. Смирнов, В. В. Ершов, Л. Г. Исаева // Научные основы устойчивого управления лесами. Матер. IV Всеросс. науч. конф. с междунар. участием. – М.: ЦЭПЛ РАН, 2020. – С. 36–41.

9. **Иванова, Е. А.** Формирование и разложение древесного опада в лесных экосистемах в фоновых условиях и при аэротехногенном загрязнении / Е. А. Иванова // Вопросы лесной науки. – 2021. – Т. 4. – №3. – Статья № 87. – С. 1–52.

10. **Иванова, Е. А.** Химический состав опада хвои сосны обыкновенной в северотаежных в сосновых лесах в условиях аэротехногенного загрязнения / Е. А. Иванова, Н. В.Лукина, В. Э.Смирнов, Л. Г. Исаева // Лесные почвы и изменение климата. Матер. IX Всеросс. науч. конф. с междунар. участием. – М.: ЦЭПЛ РАН, 2021. – С. 85–89.