

DOI 10.31509/2658-607x-202362-125
УДК 502.5:546.17/21 (470.21)

СОДЕРЖАНИЕ И ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА И АЗОТА В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2023 г.

Т. А. Сухарева^{1*}, Е. А. Иванова¹, В. В. Ершов¹, И. В. Зенкова¹,
М. В. Корнейкова^{1,2}, И. М. Штабровская¹, А. С. Сошина¹

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН
Россия, Мурманская область, 184209, Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а

² Российский университет дружбы народов,
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

* E-mail: t.sukhareva@ksc.ru

Поступила в редакцию 10.04.2023

После рецензирования: 15.04.2023

Принята к печати: 18.04.2023

В статье приводится обзор собственных и литературных данных по запасам фитомассы, содержанию углерода и азота, разнообразию почвенной фауны и микобиоты в наземных экосистемах Мурманской области в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов. Рассмотрены средообразующие факторы, определяющие функционирование экосистем, в том числе регулирование циклов углерода. Показано, что в репрезентативных еловых и сосновых лесах концентрации и выпадения соединений углерода из атмосферы и его вынос с почвенными водами выше в подкروновых пространствах, чем в межкروновых. В почвенных водах установлено снижение выноса углерода с глубиной почвенного профиля. Для подзолов характерно бимодальное распределение гумуса по почвенному профилю с максимумами в органогенном и иллювиальном горизонтах. Содержание углерода в органогенном горизонте почв еловых и сосновых лесов варьирует от 12 до 54%, азота — от 4.7 до 18.7 г/кг. Основные запасы углерода в органогенном горизонте лесных почв сосредоточены в подкروновых пространствах и достигают 27–34 т/га. Запасы углерода в метровом слое почвы (минеральные горизонты) составляют 47–60 т/га. Запасы фитомассы северотаежных лесов характеризуются невысокими значениями (12–188 т/га). Значительные запасы растительного органического вещества северотаежных лесов сосредоточены в напочвенном покрове. Содержание углерода в ассимилирующих органах (листья/хвоя, побеги) растений северотаежных лесов варьирует от 35 до 73%, азота — от 5.4 до 23.6 г/кг. Скорость разложения растительных остатков и потери углерода при разложении опада вечнозеленых растений в еловых лесах выше, чем в сосновых, как и показатели численности почвенной макрофауны. Подзолам северотаежных лесов соответствует преобладание вторичных разрушителей растительного опада — гумификаторов дождевых червей и миксофагов (личинки щелкунов, подстилочных моллюсков) и отсутствие кальцефильных групп минерализаторов (мокриц, двупарноногих многоножек). Из почв Мурманской области выделено 122 вида микроскопических грибов. Доминирующими по показателю обилия в фоновой почве были виды рр. *Penicillium* и *Umbelopsis*, в антропогенно-измененных почвах — виды рр. *Aureobasidium*, *Penicillium*, *Trichocladium*, *Trichoderma* и *Umbelopsis*.

Ключевые слова: северотаежные леса, тундра, фитомасса, почвы, углерод, азот, почвенная фауна и микобиота, природные и антропогенные факторы, Арктика

Т. А. Сухарева, Е. А. Иванова, В. В. Ершов, И. В. Зенкова,
М. В. Корнейкова, И. М. Штабровская, А. С. Сошина

Наземные экосистемы играют ключевую роль в регулировании циклов углерода и газового состава атмосферы, благодаря связыванию CO_2 в процессе фотосинтеза, аккумуляции углерода в почве, фито- и мортмассе.

Мурманская область — один из наиболее промышленно развитых регионов Арктики, на территории которого функционируют крупные предприятия горнопромышленного и металлургического комплексов. Наземные экосистемы Мурманской области испытывают экстремальное воздействие природных и антропогенных факторов, сложное сочетание которых определяет особенности биогеохимических циклов и деструкции органического вещества. Процессы превращения органических веществ в почвах протекают при участии почвенной фауны и микобиоты и определяются их функциональным разнообразием.

Развитие концепции о биогеохимических циклах углерода относится к важнейшим научным задачам, носящим фундаментальный характер и имеющим огромное прикладное значение (Лукина и др., 2018а). В настоящее время пристальное внимание на международном и национальном уровне сосредоточено на проблеме оценки вклада наземных экосистем в регулирование циклов углерода, что обуславливает необходимость получения данных о содержании и запасах углерода в отдельных регионах РФ, в различных природно-климатических зонах. Актуальным на-

правлением исследований становится получение новых данных о циклах углерода на различных сукцессионных стадиях развития лесных экосистем. В Мурманской области такие исследования ведутся на сети постоянных пробных площадей (ППП) биогеохимического мониторинга Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (ИППЭС КНЦ РАН), созданной под руководством д. б. н., профессора В. В. Никонова в начале 1990-х гг. За более чем 30-летний период наблюдений получены данные о химическом составе основных компонентов лесных экосистем. Сформированы базы данных по динамике пулов и потоков углерода и азота в еловых и сосновых лесах, которые ежегодно пополняются. Зарегистрированы базы данных по содержанию углерода и азота в северотаежных лесах Мурманской области на различных стадиях техногенной дигрессии: фон, дефолирующие леса и техногенные редколесья (Ершов и др., 2022; Сухарева и др., 2023). Многолетние исследования позволяют оценить роль наземных экосистем Европейского Севера на разных сукцессионных стадиях в регулировании циклов углерода и азота и выявить недостатки методов оценки динамики пулов и потоков углерода и азота в лесах на северном пределе распространения.

Цель работы — на основе анализа литературных и обобщения собственных опубликованных многолетних данных оценить содержание и запасы углерода и азота в наземных экосистемах Мурман-

ской области. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: (1) рассмотреть факторы, оказывающие влияние на содержание и запасы углерода в наземных экосистемах; (2) провести оценку запасов фитомассы, пулов и потоков углерода и азота в атмосферных выпадениях, почвах, почвенных водах, фито- и мортмассе наземных экосистем; (3) обобщить данные о функциональном разнообразии почвенной фауны и микобиоты.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СОДЕРЖАНИЕ И ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

В Мурманской области основными средообразующими природными факторами, определяющими варьирование циклов углерода в наземных экосистемах, являются климат, рельеф, почвы и почвообразующие породы, растительность. На функционирование лесных экосистем наряду с природными, значительное влияние оказывают антропогенные факторы — рубки, пожары, воздушное промышленное загрязнение.

Климат

Климатические условия Кольского Севера можно охарактеризовать как малоблагоприятные для формирования и функционирования наземных биогеоце-

нозов. Лимитирующими факторами, ограничивающими продуцирование органического вещества и разложение его мертвой части, интенсивность и емкость биогеохимического круговорота, являются: общий недостаток тепла и связанная с ним низкая биологическая активность, короткий вегетационный период, возможность заморозков в любой срок вегетации растений. В то же время потепление климата может обуславливать увеличение продуктивности наземных экосистем Мурманской области и продвижение древесной растительности на север.

Климатической особенностью региона является высокая относительная влажность воздуха: среднегодовой показатель составляет 80%, что обусловлено преобладанием воздушных масс морского происхождения в зимний период и переходные сезоны, а также испарением с поверхности большого количества рек, озер и болот.

Общая продолжительность периода со снежным покровом 180–205 дней, средняя высота снега в лесу 0.6–0.9 м (Цветков, Семенов, 1985; Лукина, Никонов, 1998). Мягкая зима и большая высота снежного покрова обуславливают незначительное промерзание лесных почв — до 50–100 см (Семко, 1982). Характерная особенность всей территории региона — выпадение осадков в виде снега в раннелетнее время (в июне).

Результаты изучения изменения климата в Мурманской области указывают на продолжающееся потепление и увели-

чение осадков. Повышение средней температуры воздуха в регионе выше, чем в среднем на территории Российской Федерации. В число десяти самых теплых лет за почти 80-летний период наблюдений вошли пять лет XXI столетия. За период с 1976 по 2014 гг. среднегодовая температура на полуострове росла со скоростью 0.6 °C за 10 лет. Увеличение годовой суммы осадков в среднем по Кольскому полуострову незначительно и составляет 1 мм/мес. за 10 лет. Количество осадков увеличивается весной и осенью со скоростью 2 и 3 мм/мес. за 10 лет соответственно и остается неизменным зимой и летом (Аксенова и др., 2020). Для Мурманской области можно ожидать значительного повышения зимних температур, к середине XXI в. зимы могут стать на 5 °C теплее при чередовании обычных или более холодных зим и более теплых. Среднегодовая температура может вырасти с нынешних +1.5 °C до +5 °C. Количество зимних осадков в среднем увеличится примерно на четверть от современного, в какие-то зимы количество осадков останется обычным, а в отдельные зимы снега и дождей будет в два раза больше, чем в конце XX в. (Замолдчиков и др., 2015).

Изменения климата в Мурманской области с конца XIX — начала XX вв. обусловили сдвиг начальных стадий вегетации растений на более ранние сроки. Это привело к увеличению продуктивности древостоев на северном пределе их произрастания (Кравцова, Лошкарева, 2010).

В Хибинских горах надземная фитомасса древесного яруса на современной верхней границе сомкнутых лесов увеличилась с начала XX в. в среднем с 0.01 до 17.8 т/га, на границе редколесий до 7.4 т/га и на границе отдельных деревьев и их групп в тундре до 0.8 т/га (Моисеев и др., 2019). Наблюдается продвижение верхней границы древесной растительности на север и вверх по горному склону — часть процесса «позеленения» тундры (Тишков и др., 2018, 2019). Древесная растительность, как полагают авторы исследования, продвинулась на север Кольского полуострова суммарно на 773 379 га.

Проведенный нами анализ метеоданных (по данным www.meteo.ru, www.rp5.ru) за 30-летний период наблюдений (1991–2021 гг.) показал, что среднегодовая температура воздуха в районах, где мы проводили исследования, находится в пределах –3.1...+1.5 °C. Самым теплым месяцем является июль (среднегодовые температуры от +7 до +15 °C), самыми холодными — январь и/или февраль (среднегодовые температуры от –3 до –13 °C).

Вегетационный период (со средней суточной температурой воздуха выше +5 °C) на пробных площадях, расположенных в равнинной части Мурманской области, продолжается в среднем 127–138 дней. В Хибинском горном массиве, имеющим специфический горный климат, вегетационный период характеризуется меньшей продолжительностью (75–90 дней), относительно низкими температурами и длительным солнечным освещением. Преобла-

дающие дневные температуры вегетационного периода +10...12 °С, среднесуточная амплитуда температуры в летние месяцы примерно 8...10 °С. Начало вегетационного периода в среднем — первая декада июня, когда устанавливается среднесуточная температура воздуха от +5 °С и выше, несмотря на возможные заморозки до -10...-15 °С. С середины июня обычно наступает безморозный период (Шляков, 1961; Шмакова и др., 2008; Алексеенко и др., 2022).

Среднегодовая сумма осадков в виде дождя в районах расположения ППП составляет 508–617 мм, в виде снега — 224–418 мм. В Хибинских горах среднегодовое количество осадков в виде снега выше и составляет 728 мм. Около 60% осадков приходится на теплое время года и выпадает в июле-сентябре.

В табл. 1 приведены климатические показатели для территории, на которой расположены фоновые пробные площади ИППЭС КНЦ РАН в сосняках лишайниково-кустарничково-зеленомошных и кустарничково-зеленомошных и ельников кустарничково-зеленомошных. ППП находятся в юго-западной части Мурманской области (Кандалакшский район, окрестности п. Алакургтти), биогеохимический мониторинг здесь проводится с 1998 года. ППП отражают региональный фон и соответствуют всем международным критериям контрольных площадок (Методика..., 2008; Руководство..., 2013; UNECE ICP Forests Programme..., 2020). В статье представлены оригинальные данные по содержанию и запасам углерода для данной территории.

Таблица 1. Климатические показатели фоновой территории расположения пробных площадей мониторинговой сети ИППЭС КНЦ РАН за 30-летний период наблюдений, 1991–2021 гг., Кандалакшский район Мурманской области (рассчитаны по данным метеосайтов www.rp5.ru и www.meteo.ru)

| Показатель | Значение |
|--|----------|
| Среднегодовая температура воздуха, °С | 1.1 |
| Средняя температура января, °С | -11.4 |
| Средняя температура июля, °С | 15 |
| Количество дней со среднесуточной температурой выше 5 °С | 138 |
| Среднегодовое количество осадков в виде дождя, мм | 576 |
| Среднегодовое количество осадков в виде снега, мм | 405 |

Рельеф

Геоморфологическое положение биогеоценозов и их геохимическая сопряженность — фактор, наряду с климатом определяющий динамику органического вещества (Манаков, Никонов, 1981).

Отмечается, что в направлении с севера на юг заметно увеличиваются общие размеры первичной биологической продуктивности. Геохимическая сопряженность биогеоценозов вызывает существенные внутризональные различия в продукционной способности. Высота и экспозиция местности оказывают влияние на тепловой, световой и ветровой режимы. Резко пересеченный рельеф и гумидный режим способствуют перераспределению влаги и питательных веществ в результате водной миграции минеральных элементов с боковым поверхностным и внутрипочвенным стоком с повышенных мест в понижения и водосборы. Таким образом, с точки зрения зональных особенностей продукционной способности лесных фитоценозов региона наиболее репрезентативны биогеоценозы автономных позиций ландшафта (плакоров и верхних платообразных участков возвышенностей). В северотаежной подзоне отчетливо прослеживается зависимость продукционной способности растительных ассоциаций (в виде количества фитомассы) от их расположения в сопряженном геохимическом ландшафте. Так, продуктивность еловых лесов увеличивается от ельников, приуроченных к автономным и трансэлювиаль-

ным ландшафтам (верхние части склонов возвышенностей и плакоры) — ельники кустарничково-зеленомошные, к транзитным (трансаккумулятивным) ландшафтам (нижние части склонов возвышенностей) — ельники травяные, и резко снижается в ассоциациях, расположенных в аккумулятивных (болотных) ландшафтах — ельники сфагновые (Лукина, Никонов, 1996).

Расчлененный рельеф и высокая водопроницаемость преобладающих в регионе моренных сильно завалуненных почвообразующих пород легкого гранулометрического состава обуславливают неравномерное распределение влаги по отдельным его элементам. Значительная крутизна склонов, а также небольшая мощность песчаного моренного слоя, подстилаемого плотными кристаллическими породами, способствуют быстрому скатыванию влаги с верхних частей склонов в понижения и вызывают интенсивную водную миграцию элементов питания, что определяет достаточно четкую зависимость организации и функционирования лесных биогеоценозов от положения в мезорельефе (Никонов, 1978; Никонов, Манаков, 1979).

Почвы и почвообразующие породы

Определяющими факторами почвообразовательных процессов на Крайнем Севере являются недостаток тепла, обилие осадков при слабой испаряемости и низкая зольность растительного опада

(Манаков, 1978; Никонов, 1987; Никонов, Переверзев, 1989). Факторы почвенной среды во многом определяют направленность обменных процессов в биогеоценозах и продуктивность фитоценозов, обуславливают интенсивность жизнедеятельности почвенной биоты (Биопродукционный..., 2001). Преобладающими почвами в Мурманской области являются альфегумусовые подзолы с типичным для них профилем: O–E–BHF(BF, BH)–C. Иллювиально-железистые подзолы (Rustic Podzols) занимают более сухие местоположения под кустарничковыми, кустарничково-лишайниковыми и лишайниковыми сосняками (Федорец, Бахмет, 2016). Эти почвы имеют небольшие запасы органического вещества, простой профиль, низкое содержание азота и гумуса в минеральных горизонтах, кислую реакцию почвенного раствора (Белов, Барановская, 1969; Чертов, Меньшикова, 1983). В более увлажненных местоположениях развиты иллювиально-гумусовые подзолы (Carbic Podzols), которые занимают разные позиции по рельефу и степени увлажнения. Эти почвы распространены как в подзоне березовых редколесий, так и в подзоне северотаежных еловых и сосновых лесов (Федорец, Бахмет, 2016). Для иллювиально-гумусовых подзолов характерны сильнокислая реакция и низкая насыщенность основаниями верхних горизонтов, несмотря на богатство почвообразующих пород первичными минералами (Атлас..., 1971).

Параметры, характеризующие фракционно-групповой состав органического вещества, позволяют разделить профиль почв на две части. Верхней части профиля свойственно соотношение гуминовых и фульвокислот (Сгк:Сфк), близкое к 1; состав гумусовых кислот нижней, иллювиальной, части профиля свидетельствует об их высокой подвижности и фульватной природе (Сгк:Сфк = 0.2-0.3) (Никонов, Лукина, 1994).

Своеобразие альфегумусовых подзолов (свободный внутренний дренаж почвенно-грунтовой толщи, аэробный режим и преобладание окислительных процессов) связано с расчлененностью рельефа территории, низкими температурами, значительным превышением осадков над испаряемостью, гранулометрическим составом почвообразующих пород, которые представлены преимущественно песчаными и супесчаными отложениями, определяющими тип водного режима (Никонов, 1987; Переверзев, 2013).

Основными почвообразующими породами на территории региона являются ледниковые отложения в виде основной морены — сильно завалуненные пески и супеси, реже валунные суглинки; хорошо отсортированные, слоистые флювиогляциальные отложения — перемытые послеледниковыми водами пески, перемешанные с гравием и мелкой галькой; элювиально-делювиальные отложения, являющиеся продуктами выветривания

горных пород (гранитогнейсов, гнейсов, кристаллических сланцев). Наибольшее распространение имеют ледниковые отложения — моренные и водно-ледниковые, по механическому составу — песчаные и супесчаные (Белов, Барановская, 1969).

Хибинский горный массив сложен из крупнейших интрузий нефелиновых сиенитов, которые имеют щелочной состав и легко растворяются. В результате физического выветривания, которое господствует в условиях Хибин, продукты разрушения характеризуются легким механическим составом, большим содержанием обломочного материала. Характер коренных пород имеет большое значение для процессов почвообразования (Шмакова и др., 2008; Переверзев, 2010).

Растительность

Географическое положение Мурманской области, и, прежде всего, более мягкий климат по сравнению с другими районами Севера, определяют развитие преимущественно бореальных типов растительности: хвойных лесов и болот, сменяющихся березовыми редколесьями при продвижении на север и с увеличением высоты местности, а также криофильными кустарничковыми и лишайниковыми сообществами (Цинзерлинг, 1934; Раменская, 1983). Выделяются три зоны растительности на Кольском полуострове: тундровая, лесотундровая и лесная. Тун-

дровая зона занимает прибрежную полосу шириной 30–60 км на севере и северо-востоке полуострова. Здесь основная растительность — это лишайники, мхи, разновидности ивы, карликовой березы. Древесные кустарники встречаются по долинам крупных рек. Лесотундровая растительность представлена березовыми криволесьями и редколесьями, лишайниками и травяно-кустарничково-зеленомошным ярусом. Подлесок состоит из ерника и можжевельника, редко ивы и рябины. Лесные площади представлены преимущественно хвойными лесами из ели, сосны и березы. Общая (географическая) лесистость территории Мурманской области составляет примерно 34%. Преобладают низкопродуктивные леса V-Va классов бонитета — 85% (Цветков, 2022) с сильно разреженными древостоями незначительной высоты (12–16 м), участием березы до 50% и небольшим количеством подроста и подлеска (Лукина, Никонов, 1998).

Несмотря на выраженную эдификаторную роль древесных растений, характерной чертой коренных лесов является наличие значительных запасов живой растительной массы, заключенной в напочвенном покрове. В кустарничково-зеленомошных типах она может достигать 23%, а в заболоченных лесных биогеоценозах — до 90%. Зеленомошно-кустарничковые леса (березняки, ельники и сосняки) преобладают в регионе, занимая 75–80% всей территории. Леса других типов (скальники, горные, верещатники, воро-

ничники, зеленомошники, приручейные, осоковые, багульниковые, долгомошники, сфагновые, чернично-травяные и папоротниковые леса) занимают не более 3% (Никонов и др., 2002). На ППП преобладающими типами зональных растительных сообществ являются ельники зеленомошные и сосняки лишайниковые.

Почвенная биота

Современные процессы превращения органических веществ в почвах протекают при участии почвенных микроорганизмов и их ферментов. Биохимическая активность почв зависит как от их генетических особенностей, так и от гидротермических условий, которые различаются в зональном разрезе и изменяются по годам. Разложение растительных остатков в условиях Севера в целом заторможено, но благодаря их обогащению легкоусвояемыми для микроорганизмов органическими веществами и хорошему увлажнению почв минерализация растительных остатков в начальный период деструкции может протекать с высокой интенсивностью даже в осеннее время, неблагоприятное для развития микроорганизмов по температурным условиям (Переверзев, 1987).

Анализ результатов многолетних почвенно-зоологических исследований позволяет заключить, что пространственное (межбиогеоценотическое) распределение и обилие доминирующих таксонов почвенной макрофауны, включая кальце-

фильные и сапрофильные виды, участвующие в процессах биотрансформации органического вещества, определяется литологическим фактором, обуславливающим различия гранулометрического и валового химического состава почв (Переверзев, 2004; 2006), набором и мощностью генетических горизонтов почв и характером растительности. Это влияние выражено как в зональных, так и горных почвах (Зенкова, Рапопорт, 2017).

Современная антропогенная деятельность

Территория Мурманской области испытывает влияние антропогенных факторов — атмосферное загрязнение, локальные нефтеразливы, пожары, рубки, последствия хозяйственной деятельности человека. Наибольшее влияние на наземные экосистемы региона оказывает воздушное промышленное загрязнение. В Мурманской области функционируют самые мощные в Северной Европе источники выбросов загрязняющих веществ в атмосферу — медно-никелевые комбинаты «Североникель» (г. Мончегорск) и «Печенганикель» (пгт Никель, плавильный цех закрыт в декабре 2020 г.). Основными поллютантами, оказывающими влияние на функционирование лесных биогеоценозов, являются диоксид серы и полиметаллическая пыль, содержащая тяжелые цветные металлы: никель, медь, кобальт, кадмий, свинец и др. Длительное воздей-

ствии поллютантов со стороны предприятий привело к деградации экосистем на значительных по площади территориях, в том числе к изменению циклов углерода, азота и других элементов.

Антропогенное воздействие является важным фактором формирования структуры и продуктивности фитоценозов, пространственной неоднородности накопления и разложения органического вещества, способствует изменению фракционного состава, запасов и скорости разложения растительного опада и приводит к трансформации органических веществ лесных подстилок (Динамика..., 2009; Иванова и др., 2019). Изменение количества органического вещества в наземных экосистемах, вызываемое техногенным загрязнением, выражается в нарушении соотношения процессов его продуцирования, аккумуляции, отмирания и консервации. Ингибирование процессов продуцирования и интенсификация процессов отмирания растительной органики вызывают уменьшение запаса живой фитомассы и накопление мортмассы (Лукина, Никонов, 1993). В. Н. Второва (1986) дала ориентировочную оценку запасам растительного органического вещества северотаежных ельников, подверженного техногенному воздействию. По мере приближения к источнику выбросов интенсивность биологического круговорота снижается от 107 до 4 кг/га в год. Наблюдается сокращение текущего прироста древесины сосны на 20-50%, уменьшение роста боковых

ветвей, возрастает доля корней в общей фитомассе (Лесные экосистемы ..., 1990). Концентрации углерода в атмосферных и почвенных водах, как и его выпадения из атмосферы и вынос с почвенными водами, как правило, ниже по сравнению с репрезентативной (фоновой) территорией, что объясняется ухудшением состояния крон и гибелью деревьев (Ershov et al., 2020).

Сотрудники Кольского НЦ РАН на протяжении многих лет проводят теоретические и экспериментальные исследования северотаежных лесов. В их основе лежат фундаментальные разработки по изучению элементарных биогеохимических процессов, типов состояния бореальных экосистем, взаимодействия кислотных осадков и лесных биогеоценозов. При оценке критических нагрузок на почвы бореальной зоны было показано значение пространственной и временной изменчивости состава атмосферных выпадений и почвенных вод (Ушакова, 1997; Лукина, Никонов, 1998). Выявлены закономерности трансформации состава атмосферных выпадений, почвенных вод, почв, растений в различных типах леса на северном пределе распространения, выполнена оценка влияния воздушного загрязнения на пулы и потоки углерода в лесных биогеоценозах (Лукина, Никонов, 1998; Евдокимова и др., 2002; Лукина и др., 2005, 2008, 20186; Ершов и др., 2019; Ershov et al., 2020, 2022). На рис. 1 представлены пробные площади ИППЭС КНЦ РАН, результаты исследования на которых обсуждаются в данной статье.

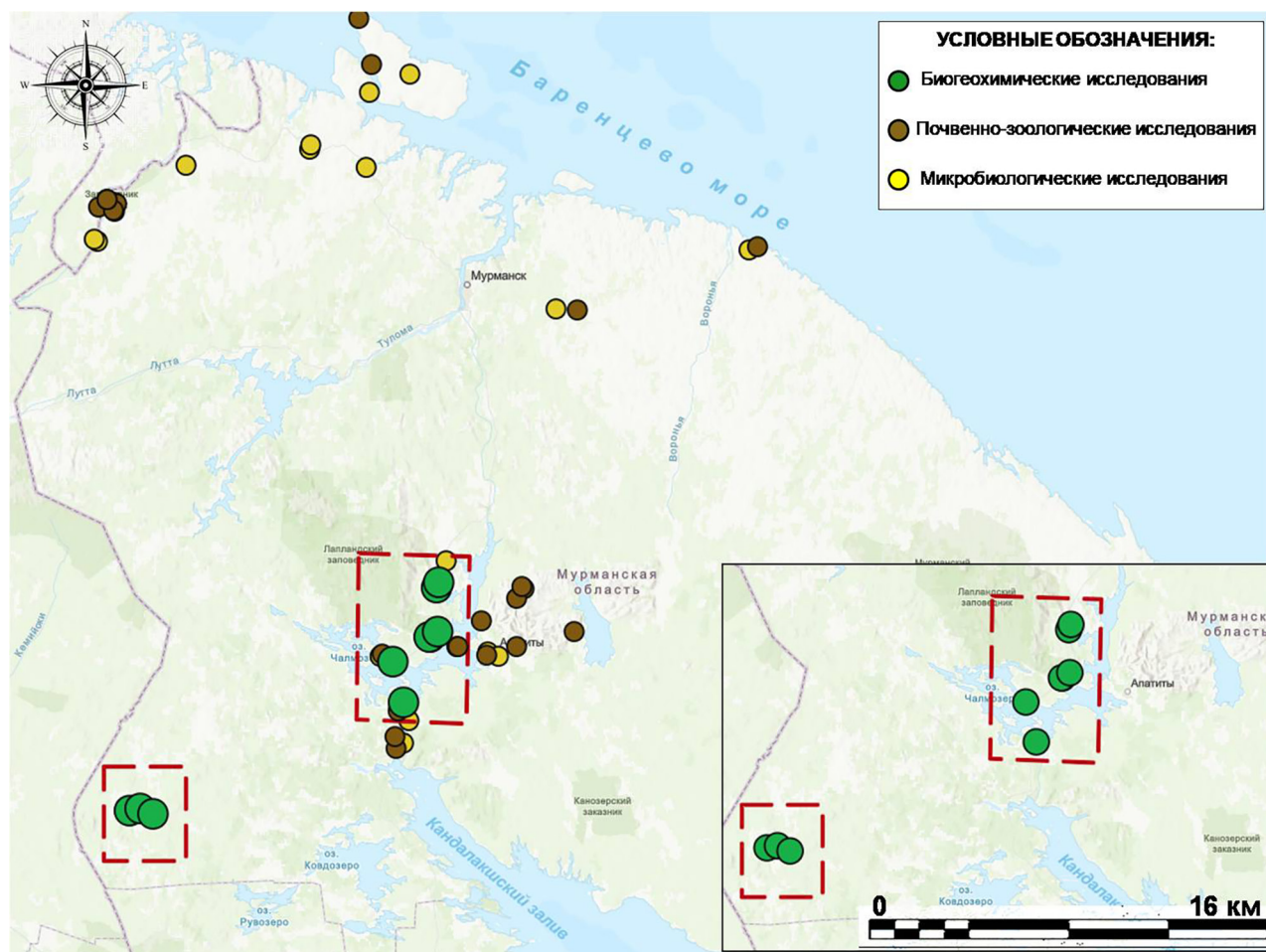


Рисунок 1. Схема расположения пробных площадей на территории Мурманской области.

Примечание: на рисунке выделена сеть ППП биогеохимического мониторинга ИППЭС КНЦ РАН, исследования на которой ведутся с 1991 г. по настоящее время

СОДЕРЖАНИЕ И ПОТОКИ УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЯХ И ПОЧВЕННЫХ ВОДАХ

Углерод растворенных органических соединений является основным компонентом атмосферных осадков, он происходит как из биогенных, так и из антропогенных источников. Перенос углерода органических соединений из атмосферы на подстилающую поверхность происхо-

дит в виде влажного (через осадки) и сухого (путем осаждения частиц и газов на поверхности) осаждения.

Несмотря на понимание важности вклада органического углерода, поступающего с осадками в общий баланс, обмен органическим углеродом между атмосферой и сушей не включается в большинство региональных и глобальных моделей углеродного цикла из-за ограниченности

данных, что подчеркивает необходимость получения дополнительной информации (Pan et al., 2010; Iavorivska et al., 2016). Исследования, касающиеся потоков углерода органических соединений с осадками, проводятся относительно редко, отчасти из-за того, что концентрации органических веществ в осадках и связанные с ними скорости атмосферного осаждения обычно не измеряются в рамках крупных сетей мониторинга (Iavorivska et al., 2016). Таким образом, важно оценить поступление углерода растворенных органических соединений (концентраций, объема выпадений, потоков) с атмосферными выпадениями в почву на участках интенсивного мониторинга, что обеспечит понимание и количественную оценку потоков углерода в экосистемах.

Большинство почвенно-химических реакций осуществляется в почвенном растворе, он же играет важнейшую роль в почвообразовании, питании растений, жизнедеятельности почвенной биоты (Derome, Lindgroose, 1998; Яшин и др., 2003). Почвенный раствор является связующим звеном между твердой фазой почвы и корнями растений, поскольку все элементы питания, а также потенциально токсичные вещества попадают в корни через него. В связи с этим химический состав почвенного раствора может служить индикатором воздействия атмосферного загрязнения и других стрессовых факторов на лесные экосистемы. Растворенное органическое вещество (РОВ) в почвах играет важную роль в биогеохимических циклах углеро-

да, азота и фосфора, почвообразовании и миграции поллютантов. Наиболее важными источниками РОВ в почвах являются подстилка и гумус (Kalbitz et al., 2000). Поступление растворенного органического углерода (РОУ) в почвенный раствор происходит также с корневыми выделениями (Bolan et al., 2011), с атмосферными и прошедшими сквозь кроны выпадениями биогенного (пыльца, растительные остатки, бактерии и вирусы) и антропогенного (сажа, пыль) характера (Schulze et al., 2011). Несмотря на интенсивные исследования, знания о формировании РОВ в почвах и его реакции на изменение природной среды и климата все еще недостаточны (Kaiser et al., 1996; Kalbitz et al., 2000; Караванова, 2013; Camino-Serrano et al., 2014, 2016). Долговременные исследования миграции РОВ в почвах и их выноса за пределы почвенной толщи на территории нашей страны единичны (Лукина, Никонов, 1996; Султанбаева и др., 2015; Кузнецова и др., 2018; Лукина и др., 2018б; Ершов и др., 2019). Необходимы исследования динамики РОВ в почвах разных природных зон и при различных видах землепользования.

Среднегодовые показатели поступления углерода с атмосферными осадками (сумма снега и дождя) и его выноса с почвенными водами в северотаежных лесах Мурманской области представлены на рис. 2. Исследования выполнены на ППП, расположенных на разных стадиях техногенной дигрессии: фон, дефолирующие леса, техногенные редколесья.

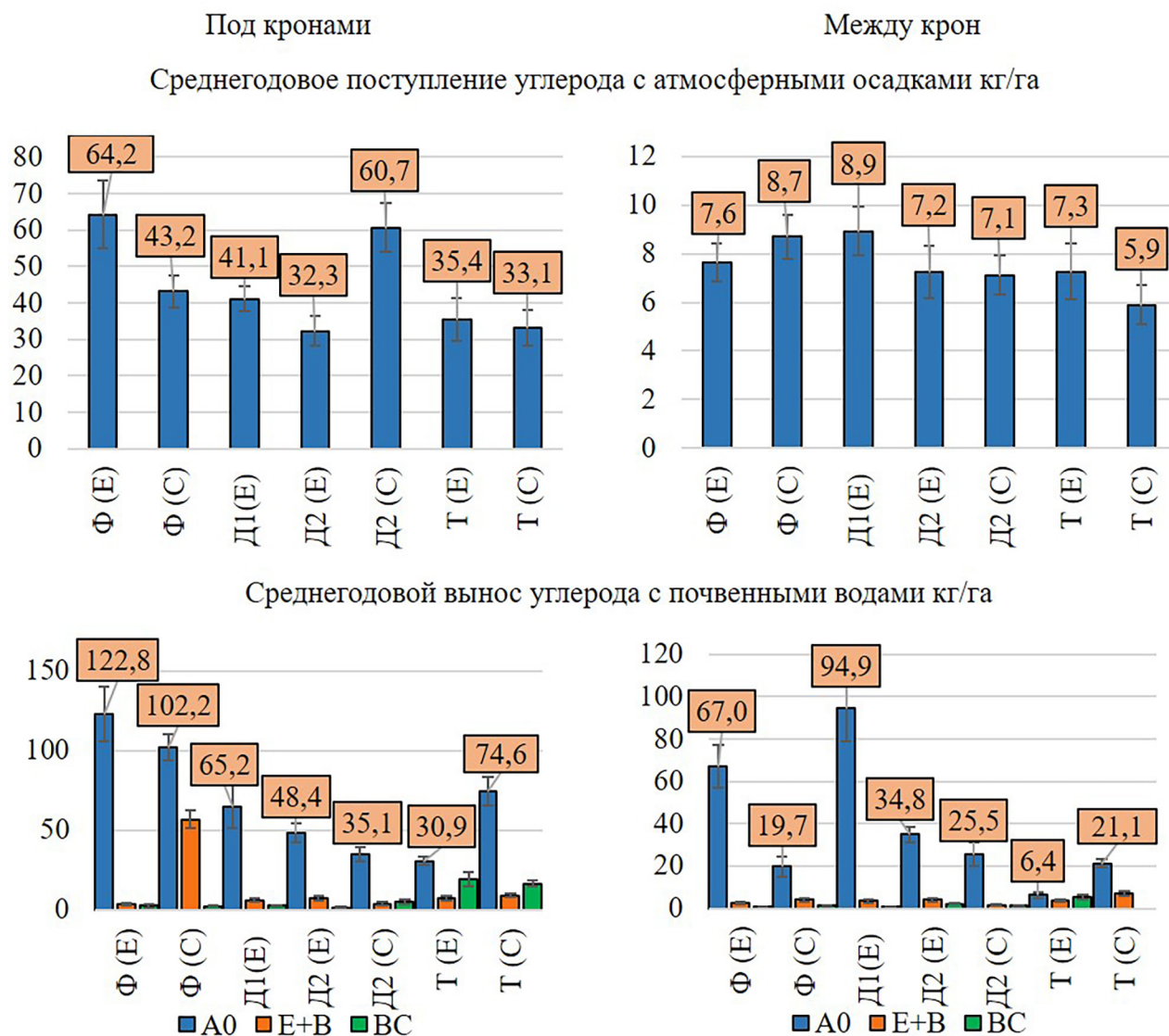


Рисунок 2. Среднегодовые показатели поступления и выноса углерода (в кг/га) в лесах Мурманской области на разных стадиях техногенной дигрессии (по: Ершов и др., 2019; Ershov et al., 2020; 2022, с изменениями). Обозначения: Ф (Е) — фоновые еловые леса, Ф (С) — фоновые сосновые леса. Стадии дигрессии: Д1 (Е) — начальная дефолиация еловых лесов, Д2 (Е) — дефолирующие еловые леса, Д2 (С) — дефолирующие сосновые леса, Т (Е) — техногенное еловое редколесье, Т (С) — техногенное сосновое редколесье. Глубина закладки лизиметров: А0 — под органогенный горизонт почвы (5 см), E+B — под минеральный (элювиальный+иллювиальный, 20 см) горизонт почвы, BC — под минеральный (иллювиальный, 40 см) горизонт почвы

На фоновой территории концентрации и выпадения соединений углерода из атмосферы меньше по сравнению с концентрациями и выносом его с почвенными водами, что объясняется прохождением водных потоков сквозь полог леса и напочвенный покров. В почвенных водах наблюдается снижение выноса углерода с глубиной почвенного профиля. На всех стадиях дигрессии концентрация углерода в атмосферных и почвенных водах, так же как выпадения углерода из атмосферы и вынос его с почвенными водами, как правило, выше в подкروновых пространствах еловых и сосновых лесов, чем в межкروновых, что связано со смывом и выщелачиванием соединений элементов из крон деревьев, опада и почв (Лукина, Никонов, 1996, 1998; Лукина и др., 2008). В дефолирующих лесах и техногенных редколесьях, по сравнению с фоном, обнаружено снижение концентраций, выпадений из атмосферы и выноса с почвенными водами углерода, что объясняется снижением количества опада из-за ухудшения состояния и гибели деревьев. Многолетняя динамика концентраций углерода в атмосферных выпадениях и почвенных водах с 1997 по 2022 гг. демонстрирует значительную вариабельность. В снеговых водах наблюдается тренд увеличения концентраций углерода на всех стадиях дигрессии, что, возможно, связано с увеличением числа дней с оттепелями в регионе. В почвенных водах наблюдается тренд

снижения концентраций углерода в техногенных редколесьях, что можно объяснить ухудшением состояния древостоев из-за негативного влияния загрязнения (Ershov et al., 2016; Лукина и др., 2018б; Ершов и др., 2019; Ershov et al., 2020, 2022).

В фоновых еловых и сосновых лесах показатель N_{min} (сумма нитратного и аммиачного азота в мг/л) в почвенных водах уменьшается с глубиной почв, как под кронами, так и между крон деревьев, что может объясняться активным биологическим поглощением. В дефолирующих лесах и техногенных редколесьях из-за нарушения функционирования фитocenozов данная тенденция наблюдается только в сосновых лесах и только между крон деревьев. В фоновых северотаежных лесах внутрибиогеоценотические различия для N_{min} в водах из всех горизонтов не достоверны ($p > 0.05$), за исключением вод из органогенных горизонтов почв еловых лесов, что подтверждает представления об ограничениях вымывания соединений азота (лимитирующего фактора роста и продуктивности бореальных лесов) из крон древесных растений. В дефолирующих лесах и техногенных редколесьях, напротив, наблюдаются более высокие концентрации минерального азота под кронами деревьев в почвенных водах, что можно объяснить повреждением хвои и вымыванием соединений азота из крон деревьев с поврежденной хвоей (Ершов, 2021).

СОДЕРЖАНИЕ И ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ

Достаточно полное представление об особенностях разных типов почв равнинных и горных территорий Мурманской области дается в работах (Манаков, Никонов, 1981; Переверзев, 2001, 2004, 2010; Лукина и др., 2008).

Первые комплексные исследования биогеохимических процессов превращения гумуса и азотистых веществ в условиях Крайнего Севера в подзолистых и торфяных почвах проведены В. Н. Переверзевым (1963), Э. А. Головки с соавторами (1967), А. В. Барановской с соавторами (1969), Н. С. Алексеевой с соавторами (1975). В тундре и лесотундре изучены содержание и состав органического вещества и азота на нескольких геоморфологических профилях, характеризующих изменение растительности и почв в связи с вертикальной поясностью. В тундровой зоне отличительной особенностью изменения гумусового профиля в связи с вертикальной поясностью является затухание выраженности элювиально-иллювиального перераспределения органического вещества по профилю. В почвах нижних частей склонов возвышенностей распределение гумуса по профилю имеет вид бимодальной кривой с двумя максимумами накопления органического вещества: в органогенном горизонте, где оно состоит в основном из гумифицированных растительных остатков, и в иллювиальном горизонте в виде осажденных органоминеральных ком-

плексов. Первый максимум связан с формированием на поверхности почвы горизонта лесной подстилки или торфяного слоя. Второй максимум накопления гумусовых веществ в профиле иллювиально-гумусовых подзолов связан с закреплением фульвокислот в иллювиальном горизонте в виде комплексов со свободными полуторными окислами, которые образуются при разложении минеральной части почвы и мигрируют вместе с фульвокислотами (Гришина, Орлов, 1977).

Подзолы северотаежных лесов Мурманской области имеют малую мощность органогенного горизонта и небольшие запасы органического вещества, низкое содержание азота и гумуса в минеральных горизонтах, реакция среды обычно кислая. Значительную роль в формировании почвенного профиля Al-Fe-гумусовых подзолов играет органическое вещество. Органогенный горизонт в основном состоит из органических остатков. В нем сосредоточено не менее половины всех запасов органического вещества этих почв (Переверзев, Алексеева, 1980). Минеральные горизонты обогащены органическим веществом в разной степени. Иллювиальный горизонт в пределах минерального профиля этих почв является горизонтом максимальной аккумуляции гумуса: вышележащий подзолистый горизонт содержит гумуса меньше. С глубиной ниже элювиального горизонта содержание гумуса постепенно снижается, но в почвообразующей породе количество гумуса может

возрастать до 1%. Это связано с высокой подвижностью, свойственной гумусовым веществам Al-Fe-гумусовых подзолов (Переверзев, 2004). Гумусовые кислоты, образующиеся в органогенном горизонте в результате разложения и гумификации опада растений, мигрируют вниз по профилю и вызывают выветривание почвенных минералов, в результате чего происходит перераспределение химических элементов по почвенному профилю. Для подзолов характерно бимодальное распределение гумуса по профилю с максимумами в органогенных и иллювиальных горизонтах. Содержание углерода в органогенном горизонте почв еловых и сосновых лесов варьирует от 12 до 57%. Обогащенность органического вещества азотом отражает показатель C:N. Органическое вещество подстилок бедно азотом, показатель C:N обычно более 30. В минеральных горизонтах, где гумусовые вещества представлены в основном фульвокислотами, содержание азота возрастает, но в большинстве случаев остается недостаточно высоким (C:N = 15–20). Валовая концентрация азота в профиле Al-Fe-гумусовых подзолов тесно связана с содержанием органического вещества. Максимальная концентрация азота обычно обнаруживается в лесных подстилках — 0.7–1.4%, в минеральных горизонтах содержание обычно снижается до 0.1%. Внутрпрофильное распределение азота связано с распределением гумуса: в иллювиальном горизонте содержание азота выше, чем в подзолистом

(Лукина и др., 2008). Установлено низкое содержание азота в почвах северотаежных лесов Мурманской области, что является лимитирующим фактором для роста и развития растений. В органогенных горизонтах почв северотаежных лесов валовое содержание азота варьирует от 8 до 16 г/кг (Лукина и др., 2008).

Подзолы горных районов Кольского полуострова имеют определенные отличия от аналогичных почв равнинных территорий по химическим и физико-химическим свойствам и составу органического вещества. Водный режим горных почв обусловлен, с одной стороны, повышенным в 1.5–2 раза приходом атмосферной влаги, с другой — влиянием бокового подтока поверхностно-грунтовых вод. В этих условиях формируется гумус, отличающийся от гумуса почв равнинных областей (Мананков, Ушакова, 1975). Для него характерно общее высокое накопление органического вещества в иллювиальных горизонтах; повышенное содержание группы гуминовых кислот в органогенных подстилках; наличие второй фракции гуминовых кислот и сравнительно высокое накопление второй фракции фульвокислот, связанных с подвижным кальцием; сравнительно высокая сумма гидролизуемых веществ в подстилках лесотундры и северной тайги, связанная с преобладанием в опаде высокозольных быстроразлагающихся листьев березы. В распределении фракции органического вещества в профиле почв горных склонов сохраняются закономер-

ности, характерные для гумусовых подзолов равнинных территорий Кольского полуострова (Манаков, Ушакова, 1975).

Процесс трансформации подстилки на Севере идет одинаково медленно в еловых и сосновых лесах вследствие ослабления процесса минерализации и превалирования гумификации и консервации органического вещества. При этом в ельниках преобладают процессы гумификации и вымывания, в сосняках — гумификации и консервации. Скорость и характер разложения подстилки зависят от ее влажности и состава, которые в свою очередь определяются размерами и качеством опада, ежегодно пополняющего запасы подстилки. Колебания погодных условий влияют на характер разложения подстилки, и, в зависимости от типа леса, эти изменения протекают неодинаково. Влажная погода интенсифицирует в ельниках процесс гумификации, в сосняках — минерализации, сухая, наоборот, в ельниках усиливает процесс минерализации, в сосняках — консервации детрита. Таким образом, интенсивность и направленность процессов трансформации подстилки зависит от типа леса и погодных условий (Ушакова, 1997).

Обобщены результаты почвенных исследований (1998–2019 гг.), выполненных нами на действующей сети пробных площадок комплексного биогеохимического мониторинга в ненарушенных еловых и сосновых лесах Мурманской области (табл. 2). Почвы на ППП представлены иллювиально-железистыми и иллювиаль-

но-гумусовыми подзолами и имеют четко выраженные черты протекания подзолообразовательного процесса.

Органогенный горизонт исследованных лесных почв, в котором сосредоточена основная масса корневых систем растений и активно протекают процессы минерализации, характеризуется высоким содержанием питательных веществ (Лукина, Никонов, 1998, Лукина и др., 2005, 2008). Запасы подстилки в подкروновых пространствах выше, чем в межкروновых (табл. 2).

Минеральные горизонты в разной степени обогащены органическим веществом. Иллювиальный горизонт (В) в пределах минерального профиля является горизонтом максимальной аккумуляции углерода (0.40–1.62%), подзолистый горизонт (Е) содержит меньше углерода (0.21–0.72%), с глубиной (ниже горизонта В), содержание углерода постепенно снижается до 0.06–0.67 (горизонты ВС и С).

Основные запасы почвенного углерода северотаежных лесов, как и запасы подстилки, сосредоточены подкروновых пространствах (табл. 2). Запасы углерода в метровом слое почвы, по данным прямых измерений с использованием данных о плотности минеральных горизонтов почвенного профиля, в еловых лесах выше, чем в сосновых.

Содержание азота находится в тесной зависимости от содержания углерода, т. к. почти весь азот в почве находится в составе органического вещества. Содержание азота в органогенном горизонте

Таблица 2. Содержание и запасы углерода в почве ненарушенных (фоновых) еловых и сосновых лесов на пробных площадях мониторинговой сети ИППЭС КНЦ РАН, Кандалакшский район Мурманской области (по: Отчет..., 2022, с изменениями)

| Показатель | Ельник кустарничково-зеленомошный (тип почвы * — <i>Carbic Podzols</i>) | Сосняк лишайниково-кустарничковый (тип почвы — <i>Rustic Podzols</i>) |
|--|--|--|
| Запас подстилки, т/га | | |
| • подкروновое пространство | 20–150 | 30–80 |
| • межкروновое пространство | 15–40 | 20–40 |
| Содержание углерода в почве **, % | | |
| органогенный горизонт (подгоризонт FH) | | |
| • подкروновое пространство | 19.5–47.9 | 41.8–53.4 |
| • межкروновое пространство | 12.4–42.3 | 44.5–54.2 |
| элювиальный горизонт (E) | | |
| • подкروновое пространство | 0.24–0.34 | 0.15–0.63 |
| • межкروновое пространство | 0.21–0.28 | 0.42–0.72 |
| иллювиальный горизонт (B) | | |
| • подкروновое пространство | 0.40–1.61 | 0.23–0.89 |
| • межкروновое пространство | 0.80–1.17 | 0.54–1.62 |
| почвообразующая порода (C) | 0.12–0.39 | 0.06–0.67 |
| Запасы углерода в почве, т/га | | |
| органогенный горизонт (подгоризонт FH) | | |
| • подкروновое пространство | 5–27 | 14–36 |
| • межкروновое пространство | 4–7 | 10–19 |
| элювиальный горизонт (E) | | |
| • подкروновое пространство | 2.9–3.7 | 1.2–5.2 |
| • межкروновое пространство | 1.7–3.6 | 2.5–3.6 |
| иллювиальный горизонт (B) | | |
| • подкروновое пространство | 27.1–43.0 | 7.2–11.4 |
| • межкروновое пространство | 16.9–30.1 | 5.1–9.6 |
| Запасы углерода в метровом слое почвы, т/га | 60 | 47 |

Примечания:

* согласно классификации (World Reference Base ..., 2022),

** определено по методу Тюринга

почв сосновых и еловых лесов составляет 5.2–13.3 и 4.7–18.7 г/кг соответственно. Иллювиальный горизонт (В) в пределах минерального профиля является горизонтом максимальной аккумуляции азота: 0.29–0.63 г/кг (сосняки) и 0.31–0.89 г/кг (ельники). В подзолистом горизонте, по сравнению с иллювиальным, содержание азота ниже: 0.10–0.46 г/кг в сосновых и 0.16–0.50 г/кг в еловых лесах. С глубиной содержание азота постепенно снижается до 0.10–0.38 г/кг (сосняки) и 0.18–0.51 г/кг (ельники, горизонты ВС и С). Органическое вещество подстилки обеднено азотом, показатель С:N, как правило, превышает 30 и может достигать 60–82. Отношение С:N в верхних горизонтах подстилки во многом определяется условиями разложения растительных остатков (микробиологическая активность, различия в водном и световом режимах и др.) (Artemkina et al., 2018). В минеральных горизонтах, особенно В и ВС, содержание азота в органическом веществе возрастает, но остается недостаточно высоким (С:N = 15–25).

ЗАПАСЫ ФИТОМАССЫ. СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА В ФИТОМАССЕ

Северотаежные леса характеризуются низкой продуктивностью, незначительной высотой древостоев с участием березы и с небольшим количеством подроста и подлеска. Запасы фитомассы невелики и характеризуются широким диапазо-

ном колебаний (12–188 т/га). Фитомасса коренных ельников, фитоценоз которых сложен высоковозрастным древостоем, оценивается в среднем в 60–120 т/га, в заболоченных еловых биогеоценозах ее размеры снижаются до 12–30 т/га. Размеры годичной продукции составляют 2–6 т/га (Никонов, Лукина, 1994). Биологическая продуктивность биогеоценозов существенно различается в разных экосистемах: в березняке кустарниково-моховом запас фитомассы составляет 22 т/га (Манаков, 1970), в сосняке брусничном — 63 т/га (Переверзев, 2006), в ельнике кустарничково-зеленомошном — 53 т/га (Никонов, 1987), в ельнике кустарничковом — 73 т/га (Манаков, Никонов, 1979). Ельники сфагновые с наименьшими запасами фитомассы (менее 50 т/га) формируются в понижениях и депрессиях, в условиях избыточного увлажнения и анаэробнобиозиса. Ельники травяные, выделяющиеся наибольшей фитомассой (до 190 т/га), располагаются в нижних частях склонов. В результате водной миграции здесь наиболее благоприятные условия минерального и водного питания, а также аэрации (Лукина, Никонов, 1996). Наиболее продуктивные типы сосняков — кустарничковые и мохово-кустарничковые (более 100 т/га) расположены на плакорах и склонах. Первичная продуктивность лишайниковых сосняков на вершинах и верхних частях склонов возвышенностей находится в пределах 60–95 т/га (Манаков, 1978; Никонов, Лукина, 1994).

Низкая интенсивность продукционного процесса в лесных экосистемах на северном пределе распространения обусловлена дефицитом тепла и коротким вегетационным периодом. Одной из основных особенностей хвойных лесов является наличие значительных запасов растительного органического вещества, заключенных в напочвенном покрове. В формировании запаса фитомассы северотаежных лесов велика роль кустарничков, мохообразных и лишайников. Доля напочвенного покрова в общей фитомассе кустарничково-зеленомошных типов биогеоценозов может достигать 23%. Запасы фитомассы растений напочвенного покрова в коренных ельниках Кольского Севера изменяются в широких пределах — 5–17 т/га (Манаков, Никонов, 1981). Запасы надземной и подземной фитомассы в фоновых условиях в ельнике кустарничково-зеленомошном составляют 7.52 и 9.08 т/га, в ельнике зеленомошно-кустарничковом — 6.31 и 7.64 т/га соответственно. В сосновых коренных древостоях запас надземной фитомассы древесного яруса изменяется от 41.2 до 76 т/га, подземной — от 10.3 до 19 т/га (Лукина, Никонов, 1993).

Продуктивность растений живого напочвенного покрова в молодых и спелых фоновых сосняках лишайниковых составляет 9.74 и 10.78 т/га сухой фитомассы, в молодых и спелых чернично-вороничных сосняках — 5.44 и 10.69 т/га (Ярмишко, 2012). В средневозрастных сосновых лесах фоновой территории среднее зна-

чение общего запаса надземной биомассы снижается от 5.04 до 1.57 т/га в ряду сосновое редколесье > сосняк лишайниково-зеленомошный > сосняк зеленомошный, в то время как общий запас живого напочвенного покрова достоверно не различается, варьируя в пределах 4.9–6.42 т/га. Различия обусловлены тем, что в сосновом редколесье запас надземной биомассы складывается преимущественно из биомассы лишайников, наиболее обильных в этом сообществе, а в сосняке зеленомошном существенно увеличивается доля подземных частей растений, что приводит к выравниванию общих запасов живого напочвенного покрова в этих сообществах (Лянгузова, Примаков, 2019).

В тундрах Кольского полуострова запасы надземной фитомассы в среднем составляют 8.6 т/га, подземной — 10.24 т/га (Маслов, 2015). В горах (на примере хибинской горы Вудъяврчорр) южные склоны имеют средние показатели общей надземной фитомассы древесной растительности, 18.7–20.7 т/га, восточный склон — низкие, 13.5 т/га (Константинов, Волков, 2022). В Хибинах запасы фитомассы снижаются с высотой от горных еловых лесов (96.3 т/га) к субнивальным горно-тундровым сообществам (7.1 т/га), в равнинных лесах — от ельников к соснякам (от 85.3 до 77.6 т/га) (Ушакова и др., 2004).

Аэротехногенное загрязнение вызывает уменьшение запасов фитомассы древостоя ели: в ельнике кустарничково-зеленомошном (62 км от медно-никелевого

комбината «Североникель») надземная фитомасса составляет 52.3 т/га, подземная — 12.5 т/га; в дефолирующем ельнике зеленомошно-кустарничковом (31 км) — 37.75 и 9 т/га, в ельнике злаково-кустарничковом (28 км) — 39 и 9.3 т/га; в еловом вороничном редколесье — 1.12 и 0.26 т/га соответственно. В дефолирующем ельнике злаково-кустарничковом запасы фитомассы растений напочвенного покрова уменьшаются до 3.03 т/га надземной и 4.53 т/га подземной части. В техногенном вороничном редколесье запасы надземной и подземной фитомассы составляют 8.18 и 3 т/га соответственно. По другим оценкам, запасы фитомассы растений напочвенного покрова (надземные органы) в ельниках в фоновых условиях в среднем составляли 3.39, в дефолирующих — 1.51, в редколесьях — 2.6 т/га. Снижение общей продуктивности растений нижних ярусов дефолирующих лесов связано с гибелью зеленых мхов в результате действия аэротехногенного загрязнения. При этом запасы фитомассы растений напочвенного покрова елового редколесья выше, чем в дефолирующих лесах благодаря активизации вороники и луговика извилистого (Лукина, Никонов, 1996).

Во вторичных сосновых лесах промышленное загрязнение приводит к снижению запасов фитомассы в два раза до 12.75–23.13 т/га надземной и 3.35–5.8 т/га подземной. Запасы надземной и подземной фитомассы растений напочвенного покрова в сосняках лишайниковых в зоне

воздействия комбината «Североникель» составили 6.33–8.53 и 1.68–3.6 т/га соответственно. В 8–10 км от комбината «Североникель» в сосняке с пустошью запас надземной части фитомассы напочвенного покрова составил 2.45, подземной — 1.86 т/га (Лукина, Никонов, 1996). В более поздней работе показано, что запасы фитомассы в фоновом сосняке составили 7.46, в дефолирующих лесах — 2.29, в редколесьях — 0.91 т/га. В дефолирующих сосняках и редколесьях доминирующие в фоновых условиях лишайники выпадают из состава фитоценоза, что приводит к существенному снижению запасов фитомассы (Лукина, Никонов, 1998). В зоне воздействия комбината «Печенганикель» запас надземной и подземной фитомассы растений напочвенного покрова сосняка лишайникового в фоновых условиях составил 2.14 и 3.74 т/га, соответственно. В условиях дефолирующего сосняка злаково-кустарничкового снижается вклад лишайников — запасы надземной и подземной фитомассы составили 1.47 и 1.48 т/га. В 10 км от комбината «Печенганикель» в сосняке с пустошью запасы надземной фитомассы составлял 0.93, подземной — 0.77 т/га (Лукина, Никонов, 1996).

Данные исследований по химическому составу растений и лишайников (1991–2019 гг.), выполненных нами на действующей сети пробных площадок комплексного биогеохимического мониторинга в репрезентативных еловых и сосновых лесах Мурманской области, обоб-

щены в табл. 3 и 4. Изучены листья/хвоя/ побеги различных видов растений: ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), вороники (*Empetrum hermaphroditum* Hager.), черники (*Vaccinium myrtillus* L.), брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.), луговика извилистого (*Avenella flexuosa* (L.) Drejer.), зеленого мха *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., а также талломы напочвенного лишайника *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar&Vezda.

Показано, что содержание углерода в хвое ели и сосны варьирует от 41 до 68%, в листьях березы — от 45 до 56%. С возрастом хвои содержание углерода практически не изменяется. Возможно, причина заключается в перераспределении углерода между различными органами в пользу

корней и, особенно, побегов, в которых ассимилированный в процессе фотосинтеза углерод депонируется (Сухарева, 2017).

В фоновых условиях содержание азота в листьях березы варьирует от 19.3 до 23.3 г/кг, в хвое ели и сосны — от 8.0 до 15.0 г/кг. Известно, что недостаточное содержание азота лимитирует продукционные процессы в растительном организме. Дефицитным для хвойных деревьев является уровень 12–15 г/кг, при содержании азота < 12.0 г/кг ель и сосна испытывают сильный дефицит данного элемента (Brække, 1994). Наши результаты подтверждают представление о том, что в бореальных лесах растения испытывают дефицит азота. Азот в хвое представлен в основном белковой формой. В природных условиях в текущем приросте и в од-

Таблица 3. Содержание углерода и азота в хвое ели сибирской и сосны обыкновенной на фоновых пробных площадях мониторинговой сети ИППЭС КНЦ, Кандалакшский район Мурманской области (по: Сухарева, 2014, 2017, с изменениями).

| Вид, исследуемая фракция | С, % | Н, г/кг |
|---------------------------------|----------|----------|
| <i>Picea obovata</i> , хвоя: | | |
| текущего года | 57.4±1.1 | 12.0±0.5 |
| однолетняя | 56.4±1.2 | 11.0±0.5 |
| многолетняя (7-10-летняя) | 57.5±2.0 | 9.2±0.4 |
| <i>Pinus sylvestris</i> , хвоя: | | |
| текущего года | 56.4±2.2 | 12.7±0.5 |
| однолетняя | 59.9±0.1 | 11.2±0.3 |
| многолетняя (4-6 летняя) | 59.2±1.5 | 11.4±0.5 |

Примечание: здесь и в табл. 4 приведены средние значения ± стандартная ошибка. Содержание углерода (С) определено по методу Тюрина, азота (N) — по методу Кьельдаля

Таблица 4. Содержание углерода и азота в растениях и лишайниках северотаежных лесов на фоновых пробных площадях мониторинговой сети ИППЭС КНЦ, Кандалакшский район Мурманской области (по: Сухарева, 2018, 2022, Отчет ..., 2022, с изменениями)

| Вид, исследуемая фракция | Ельник лишайниково-кустарничково-зеленомошный | | Сосняк лишайниково-зеленомошно-кустарничковый | |
|--|---|------------|---|------------|
| | С, % | N, г/кг | С, % | N, г/кг |
| <i>Betula pubescens</i> , листья | 50.2 ± 0.8 | 19.8 ± 0.3 | 48.8 ± 1.3 | 19.8 ± 0.4 |
| <i>Vaccinium myrtillus</i> , листья | 45.8 ± 0.4 | 22.0 ± 0.2 | 52.0 ± 0.7 | 19.5 ± 0.5 |
| <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , листья | текущего года | 16.8 ± 2.5 | 51.7 ± 1.0 | 10.6 ± 0.1 |
| | многолетние | 13.5 ± 1.9 | 51.5 ± 0.1 | 7.1 ± 0.1 |
| <i>Empetrum hermaphroditum</i> , листья: | текущего года | 14.5 ± 0.7 | 59.6 ± 2.7 | 14.0 ± 0.3 |
| | многолетние | 8.5 ± 0.4 | 58.5 ± 0.3 | 8.4 ± 0.3 |
| <i>Pleurozium schreberi</i> , побеги | текущие | 7.4 ± 0.3 | 50.3 ± 0.6 | 7.2 ± 0.2 |
| | многолетние | 5.5 ± 0.5 | 49.8 ± 1.7 | 5.8 ± 0.5 |
| <i>Avenella flexuosa</i> , листья | 44.2 ± 1.8 | 12.5 ± 0.6 | – | – |
| <i>Cladonia stellaris</i> , талломы | – | – | 49.7 ± 1.4 | 2.9 ± 0.1 |

Примечание: (–) — данные отсутствуют

нолетней хвое доля белкового азота достигает 90–92%; в многолетней хвое — 83–86% от общего содержания азота. Доля небелковой формы азота не превышает в хвое 17% (Лукина и др., 2005).

Отношение С:N показывает участие азота в процессах трансформации и формировании органического вещества почвы. Процессы деструкции и скорость биологического круговорота протекают более интенсивно, чем уже соотношение С:N. Результаты исследований показали, что минимальными значениями С:N (19–34) характеризуются листья березы, максимальными — многолетняя хвоя сосны и ели (40–71).

В условиях воздушного промышленного загрязнения происходит увеличение содержания углерода в хвое, что связано с накоплением в ней вторичных метаболитов, в то время как синтез белковых соединений заторможен. Для хвои ели было установлено возрастание доли небелкового N в процессе техногенной дигрессии лесов (до 24%), что свидетельствует о задержке синтеза белковых соединений (Лукина и др., 2005).

Кустарнички являются доминирующими видами напочвенного покрова северотаежных лесов и принимают активное участие в процессах миграции и трансформации химических соединений в на-

земных экосистемах. В фоновых условиях содержание углерода в листьях черники варьирует от 35 до 52%, в листьях вороники — от 54 до 66%, в листьях брусники — от 48 до 52%. У брусники и вороники в листьях разного возраста содержание углерода практически не изменяется. В ненарушенных экосистемах в листьях черники содержание азота изменяется от 13.1 до 23.6 г/кг. У вороники содержание азота варьирует от 8.4 г/кг в многолетних листьях до 14.5 г/кг в листьях текущего года, в листьях брусники — от 7.1 до 16.8 г/кг соответственно. У брусники и вороники в листьях текущего года содержание азота выше, чем в многолетних листьях. В условиях воздушного промышленного загрязнения, на стадии дефолирующих лесов и техногенных редколесий, химический состав кустарничков трансформируется: в листьях увеличивается содержание углерода по сравнению с фоновой территорией, что связано с увеличением синтеза вторичных метаболитов (Сухарева, 2022).

В северотаежных экосистемах лишайниковый покров выполняет важную функцию биологического барьера на пути потоков химических элементов, в том числе элементов-загрязнителей. Напочвенные (эпигейные) лишайники тесно контактируют с литосферными источниками минеральных элементов, и концентрация химических элементов в них может довольно точно отражать геохимические особенности условий произрастания (Erdman, Gough, 1977; Никонов и др., 2004). Содержа-

ние углерода в талломах кустистых лишайников рода *Cladonia* варьирует от 45 до 48%, азота — от 2.8 до 4.7 г/кг. Показатель C:N характеризуется высокими значениями (72–167).

В моховом ярусе северотаежных лесов доминирующими видами напочвенного покрова являются *Pleurozium schreberi* и *Hylocomium splendens*. Зеленые мхи — относительно высокозольные растения: 2.3–2.7% в пересчете на сухое вещество (Никонов, Лукина, 1994), играют значительную биогеохимическую роль в лесных экосистемах. Мхи поддерживают температурный режим почвы, заселяя и закрепляя прежде всего «безжизненный» субстрат, и способствуют накоплению органического вещества в экосистемах (Ermolaeva et al., 2013). Максимальные концентрации углерода (45–73%) в побегах зеленых мхов наблюдаются в сосновых лесах, которые характеризуются также наиболее широкими соотношениями C:N (49–68). Содержание азота в побегах текущего года варьирует от 7.0 до 17.0 г/кг, в многолетних побегах — от 5.4 до 11.5 г/кг. Минимальными значениями показателя C:N (15–37) характеризуются побеги зеленых мхов березняка разнотравного (Сухарева, 2018). В условиях атмосферного загрязнения происходит сокращение в первую очередь чувствительных видов — мхов и лишайников, их фитомассы, видового разнообразия (Черненкоова и др., 2016; Лянгузова и др., 2020), трансформируется элементный состав растений и лишайни-

ков (Лукина, Никонов, 1998; Никонов и др., 2004; Shotbolt et al., 2007; Ярмишко и др., 2009; Сухарева и др., 2020). Содержание азота в зеленых мхах на стадии дефолирующих лесов снижается, а соотношение C : N в зеленых мхах значительно выше фоновых показателей и свидетельствует, что процессы деструкции мхов после их отмирания замедленны. В техногенном редколесье содержание углерода и азота в зеленых мхах возрастает (Сухарева, 2018). Скорее всего, увеличение азота в побегах зеленых мхов на данной стадии происходит за счет небелковой формы и является адаптационной реакцией растения на высокий уровень эмиссионной нагрузки. Увеличение содержания углерода в зеленых мхах в дефолирующих лесах и редколесье может быть связано с накоплением в растениях вторичных метаболитов (Лукина и др., 2005).

В напочвенном покрове северотаежных лесов наряду с кустарничками, зелеными мхами и лишайниками нередко встречается луговик извилистый. Это многолетнее травянистое растение, жизненная форма которого изменяется в процессе онтогенеза от плотно-крыхлодерновинной с надземными столонами, формирующимися обычно во взрослом состоянии (Жукова, 1980). Установлено, что луговик извилистый отличается сравнительно высокой зольностью — 3.0–3.5% в пересчете на сухое вещество (Никонов, Лукина, 1994). Содержание углерода в нарушенных северотаежных лесах в асси-

милирующих органах луговика варьирует от 40 до 58%, азота — от 11.3 до 22.6 г/кг.

Надземный опад древесных растений выступает в роли связующего звена между растениями верхних ярусов и почвой, является источником органического вещества почв и элементов питания для биоты, и, следовательно, одним из ключевых компонентов биогеохимических циклов в лесных биогеоценозах. Размеры и структура опада определяют запас лесной подстилки и зависят от изменчивости погодных условий, состава древостоя, годовичного прироста деревьев, их возраста и др. (Kouki, Hokkanen, 1992; Pedersen, Bille-Hansen, 1999; Решетникова, 2011), регулируя в свою очередь накопление углерода, циклы элементов в экосистемах. Общая масса древесного опада по среднегодовым значениям за период 1995–2020 гг. в межкрупных пространствах в сосновых лесах в фоновых условиях составляет 0.66 т/га, в дефолирующих лесах — 0.48 т/га, в техногенных редколесьях — 0.53 т/га, уменьшаясь при усилении влияния аэротехногенного загрязнения (Иванова, 2022). Причиной этих различий является то, что в фоновых условиях возраст древостоя и фитомасса выше, тогда как в условиях загрязнения ассимилирующие органы сосны обыкновенной, составляющие основу древесного опада, преждевременно стареют и опадают не только в фенологические сроки (Алексеев, Лянгузова, 1990; Влияние ..., 1990; Ярмишко, 1997; Цветков, 2002; Ярмишко и др., 2009). В сосновых лесах

на всех стадиях дигрессии и на фоновой территории основную массу древесного опада составляют хвоя (66%), кора (14%) и шишки сосны (9%). С учетом опада под-крупных пространств в среднем за период 2014–2020 гг. суммарная масса древесного опада составила 0,9, 1,3 и 1,1 т/га в фоновых условиях, дефолирующих сосновых лесах и техногенных редколесьях, соответственно. Внутрибиогеоценотическая изменчивость структуры древесного опада в древостоях всех стадий дигрессии и в фоновых условиях проявляется в различии состава опада под кронами и между крон деревьев: под кронами в опаде преобладают хвоя, ветки, шишки и кора сосны, между крон деревьев — хвоя сосны. Аэротехногенное загрязнение вызвало увеличение массы опада хвои под кронами дефолирующих лесов (Иванова, 2022).

Химический состав свежего древесного опада определяет его качество для организмов-деструкторов, влияет на скорость разложения и изменение химического состава растительных остатков в процессе минерализации. Содержание углерода в опаде хвои сосны в период 2014–2017 гг. в сосновых лесах на фоновых и нарушенных техногенным загрязнением территориях составило в среднем 56–57%. Содержание азота в условиях фона и загрязнения достоверно не различалось и составило 3,2–3,6 г/кг. Соотношение C : N также не проявляло различий и составило 173–210 на фоновых и нарушенных воздушным загрязнением территориях. Содержание

азота в опаде хвои сосны под кронами было выше, чем между кронами, в связи с вымыванием его из живой хвои в кронах деревьев кислотными осадками (Иванова и др., 2022).

Растительные остатки, попадая в почву, подвергаются интенсивному разложению и гумификации. Эти два процесса, протекающие одновременно, приводят к созданию специфического органического вещества — гумуса. Интенсивность этих процессов зависит от типа почв, гидротермических условий, в которых они протекают, состава растительных остатков (главным образом, содержания в них растворимых веществ и азота) и других факторов. Содержание углерода заметно возрастает в растительных остатках по мере их минерализации и гумификации. Это связано с образованием гуминовых кислот, богатых углеродом и относительно устойчивых к микробному разложению (Переверзев, 1975).

В сосновых и еловых лесах, подверженных многолетнему воздушному промышленному загрязнению, наблюдается снижение в опаде исходных концентраций элементов питания (Ca, Mg, Mn и Zn), повышение концентраций поллютантов (Ni и Cu). После двух лет разложения в опаде вечнозеленых растений сосновых лесов соотношение C : N возрастало от 74 до 89, лигнин : N — от 46 до 66 в фоновых условиях и сосновых редколесьях соответственно (Иванова и др., 2019; Иванова, 2022). В еловых лесах после двух лет раз-

ложения в опаде вечнозеленых растений соотношение С: N возрастало с 38 до 61, лигнин: N — с 30 до 48 в фоновых условиях и в еловых редколесьях соответственно (Lukina et al., 2017). Все это привело в сосновых лесах к снижению скорости разложения опада листьев вечнозеленых кустарничков и хвои сосны с 27% в фоновых условиях до 17% в техногенных редколесьях; листьев березы — с 60 до 55% соответственно (Иванова и др., 2019; Иванова, 2022). В условиях воздушного загрязнения в еловых лесах наиболее существенное снижение скорости разложения наблюдалось для опада листьев вороники: с 36% в фоновых условиях до 13% в техногенных редколесьях (Lukina et al., 2017).

Сезонные и пространственные особенности разложения 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 кронами деревьев по сравнению с подкрановыми пространствами (Lukina et al., 2017; Иванова и др., 2019), что может объясняться различиями в биомассе грибов в вегетационный период (Никонов и др., 2001; Полянская 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).

Сравнение по типам леса показало, что в фоновых условиях в течение двух лет опад вечнозеленых растений еловых лесов (хвоя ели, листья брусники и вороники) по сравнению с опадом сосновых (хвоя сосны, листья брусники и вороники) разлагался заметно быстрее — 35 и 27% соответственно. Потери углерода при разложении также были выше в ельниках: 33 против 24% в сосняках (Иванова и др., 2019). Различия в скорости разложения опада в фоновых условиях были связаны с его качеством: опад вечнозеленых растений еловых лесов, как и почвы (Лукина и др., 2008), богаче элементами питания, кроме того, и отношение С: N в опаде еловых лесов ниже, чем в сосновых — 60 против 89. Примечательно, что опад листьев березы (*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*, доминирующей на более плодородных и влажных почвах, характерных для еловых лесов (Иванова и др., 2019; Иванова, 2022). 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).

В дефолирующих лесах и редколесьях опад вечнозеленых растений еловых и сосновых лесов разлагался с сопоставимыми скоростями (22% в дефолирующих

лесах и 17-18% в редколесьях), что связано с мощным негативным влиянием воздушного промышленного загрязнения на качество опада и почвенных деструкторов (Иванова и др., 2019; Иванова, 2022).

РАЗНООБРАЗИЕ ПОЧВЕННОЙ ФАУНЫ

Животное население почвы является ее облигатным структурно-функциональным компонентом, влияющим на формирование почвенного профиля, трансформацию и перераспределение органических и минеральных веществ, поток вещества и энергии через почвенный ярус наземных экосистем (Структурно-функциональная роль ..., 2003). Вопросам участия животных в этих процессах посвящена обширная литература, начиная с работ Ч. Дарвина в конце XIX в. о почвообразующей деятельности дождевых червей (Стриганова, 1980). В значительной степени изучены изменения разнообразия и структуры почвенного населения в широтно-зональных, высотно-поясных и антропогенных градиентах факторов в различных регионах России.

Количественное преобладание микроартропод — клещей (*Acari*) и первичнобескрылых насекомых — коллембол (*Collembola*) является характерной чертой почвенной фауны северных широт и объясняется устойчивостью этих групп к низким температурам, широко варьирующими термо- и гидропреферендумами видов, способностью избегать неблагоприятных

изменений гидротермического режима путем активных вертикальных миграций в почвенном ярусе и переживать зимний период на любой стадии жизненного цикла (Криволицкий, 1968; Бабенко, 2005). У клещей нормальное протекание процесса размножения подтверждено при температуре среды +3...+5 °С, питания — при +2...+3 °С; коллемболы активно питаются и развиваются при околонулевых температурах (Стриганова, 1980; Панцирные клещи, 1995).

В почвах тундрово-лесотундровой флористической области вдоль Мурманского побережья Баренцева моря (окрестности пос. Видяево, Териберка, Дальние Зеленцы) микроартроподы составляют около 99% при общей численности населения от 1.2 до 5.5 тыс. экз./м² в подзолистых почвах плакорных ландшафтов и до 11.8 тыс. экз./м² в полугидроморфных торфяно-подзолах (Евдокимова и др., 2006). В северотаежных подзолах на доли микроартропод и макрофауны приходится в среднем 97 и 3% соответственно при уровне общей численности беспозвоночных от 10 до 30 тыс. экз./м². Сходное соотношение представителей этих размерно-функциональных групп сохраняется и в зонах промышленного загрязнения, несмотря на снижение их разнообразия и обилия. В почве участков в 50 км (контрольный сосновый лес), 30, 15 (дефолирующие леса) и 5 км («техногенная пустошь») от медно-никелевого комбината «Североникель» доля микроартропод достигает

98, 94, 97 и 98% общей численности беспозвоночных, доля макрофауны — лишь 2, 6, 3 и 2% соответственно. На клещей на этих участках приходится 87, 52, 47 и 68% всей численности микроартропод, на коллембол — 13, 48, 53 и 32% (Зенкова, 2000).

Преобладание клещей над коллемболами характерно для почв Мурманской области под древесно-кустарниковой растительностью. В экосистемах лесотундры и северной тайги, где численность клещей оценивается в 18–24 тыс. экз./м², а коллембол — в 1–4 тыс. экз./м², доля клещей достигает в этих природных подзонах соответственно 82–98% и 80–90% от числа микроартропод (Зенкова, 2000). Более 87% всех клещей составляют сапрофильные панцирные клещи-орибатиды (*Oribatei*). В подзолах зональной тундры численность коллембол на порядок выше, чем в лесотундре (Евдокимова и др., 2006), и они преобладают над клещами (табл. 5).

«Коллемболоидный» облик населения микроартропод — типичная черта тундровых ландшафтов (Стебаев, 1962; Чернов, 1965), связанная с увеличением численности и степени доминирования небольшого числа наиболее адаптированных политопных видов коллембол на фоне снижения общего разнообразия. Реализация стратегии компенсации низкого видового разнообразия высокой плотностью считается специфической особенностью таксоцены коллембол в арктических широтах (Бабенко, 2005). Она отмечена и для зональной тундры, где среди 104 выявленных видов

в большинстве обследованных растительных группировок высокой степени доминирования достигают лишь немногие массовые виды (Бабенко, 2012).

Согласно классификации представителей сапротрофного комплекса почвенной фауны, микроартроподы по типу питания и пищеварения принадлежат к функциональной группе микрофитофагов, трофически связанных с почвенными водорослями и развивающейся на органических остатках микробиотой — микроскопическими грибами и бактериями. Для микрофитофагов характерна низкая пищевая избирательность. Так, спектр питания разных видов орибатид включает альго-, мико-, гифо-, споро-, детритофагию и неспециализированную сапрофагию) и зависимость сезонных ритмов развития от динамики обилия микробиоты (Стриганова, 1980).

На примере иллювиально-гумусовых подзолов и торфяно-подзолов тундры и лесотундры Мурманской области выявлены достоверные пространственные корреляции численности орибатид и бактерий, с одной стороны, и коллембол и микроскопических грибов — с другой (Евдокимова и др., 2006). Эти корреляции соответствуют степени биогенности почв, рассчитанной по количеству микробной биомассы на единицу органического вещества почвы с учетом его обогащенности азотом (Экологический атлас..., 1999). Высокая численность орибатид и бактерий в торфяно-подзолах лесотундры с мощ-

Таблица 5. Количественные показатели почвенной фауны, микробиоты и биологической активности органогенного горизонта почв в зональной тундре и лесотундре Мурманской области (по: Евдокимова и др., 2006, с изменениями)

| Показатели ↓ | Тундра воронично-лишайниковая* | Березовые редколесья воронично-лишайниковые (лесотундра) | | |
|--|---|--|--------------------|-------------------------------|
| Почвы → | Автоморфные иллювиально-гумусовые подзолы на рыхлых элювиально-делювиальные отложениях коренных пород | Полугидроморфные торфяно-подзолы на морских безвалунных песках | | |
| Мощность подстилки, см | 0–10 | 0–7 | 0–20 | |
| Кислотность, рН _{сол} / рН _{вод} | 3.36 / 3.92 | 2.96 / 3.72 | 6.60 / 7.03 | |
| Запасы, т/га | органического вещества | 65 | 79 | 158 |
| | азота | 1.1 | 1.6 | 7.7 |
| | микробной биомассы | 0.7 | 1.6 | 3.8 |
| Показатель биогенности почвы | 1.8 (низкая) | 4.1 (средняя) | 13.5 (высокая) | |
| Численность микробиоты, тыс./г почвы | сапротрофных бактерий | 66.7 | 223.3 | 850.0 |
| | олиготрофных бактерий | 100.0±15 | 183.3±20 | 926.7±29 |
| | микробиоты | 9.3±4 | 4.0±1 | 7.3±3 |
| Длина грибного мицелия, м/г почвы | 1566 | 1457 | 1718 | |
| Численность бактерий, млрд кл./г | 8.5 | 8.4 | 10.0 | |
| Численность беспозвоночных, тыс. экз./м ² | 5.5 | 2.3 | 11.3 | |
| Доля микроартропод, % в т. ч.: | коллемболы | 99.6 | 97.1 | 98.4 |
| | клещи | 55 | 5 | 2 |
| | | 45 | 95 | 98 |
| Доля макрофауны, % | 0.4 | 2.9 | 1.6 | |
| Численность, экз./м ² | 22 | 68 | 185 | |
| Биомасса, мг/м ² | 6 | 220 | 370 | |
| Таксоны макрофауны | сапрофаги | двукрылые, щелкуны, дождевые черви | двукрылые, щелкуны | двукрылые |
| | зоофаги | пауки, многоножки, мягкотелки, жуужелицы, стафилиниды | пауки | пауки, многоножки, мягкотелки |
| | фитофаги | трипсы, клопы | долгоносики | трипсы, клопы, щитовки |

Примечание: *средние значения по моховым, вороничным и лишайниковым парцеллам.

ным (до 20 см и более) органогенным горизонтом и нейтральной кислотностью отражает высокую биогенность этих почв и потенциальную биологическую способность к трансформации растительных остатков, минерализации органического вещества и накоплению гумуса. Напротив, повышенная численность коллембол и микромицетов в кислых иллювиально-гумусовых подзолах зональной тундры соответствует низким показателям их биогенности и устойчивости к внешним воздействиям (табл. 5).

Состав макрофауны в почвах тундры и лесотундры крайне беден и малочисленен. Комплекс сапрофагов формируют беспозвоночные со смешанным типом питания (миксофаги): личинки жуков-щелкунов (до 22 экз./м² в подстилке березняков) и личинки двукрылых (до 150 экз./м² в оторфованных почвах). Дождевые черви редки и представлены, как и в подбурах горно-тундрового пояса Хибин, единственным мелким подстилочным видом *Dendrobaena octaedra*, устойчивым к низким температурам и повышенной кислотности почв (Стриганова, 1973; Евдокимова и др., 2006; Zenkova, Rapoport, 2014). Более разнообразно население герпетобионтных беспозвоночных — обитателей поверхности подстилки и кустарничкового яруса, принадлежащих, как правило, к трофическим группам зоо- и фитофагов.

В северотаежной подзоне Мурманской области на широте 66–67°, в лесных подзолах на завалуненных песчаных моренах,

под спелыми (более 150 лет) древостоями с хорошо развитым напочвенным покровом из кустарничков, лишайников, мхов и травянистых растений, макрофауна характеризуется сходной таксономической структурой. Основу формируют насекомые (85–89% от общей численности), доля паукообразных (пауки, сенокосцы) составляет 7–9%, червей (дождевые черви, энхитреиды) 3–5%, брюхоногих моллюсков и многоножек (литобииды, геофилиды) 1–2%. Среди насекомых доминируют двукрылые и жесткокрылые (более 50%), среди жуков — мягкотелки (40–80), стафилиниды (10–35) и щелкуны (5–13).

Численность влаголюбивых подстилочных групп — личинок двукрылых, микро-фитофагов червецов, хищных жуков стафилинид и мягкотелок выше в более затененных и увлажненных ельниках. Численность доминирующей группы — личинок двукрылых в ельниках разных типов составляет 300–350 экз./м², или более 50% от всей макрофауны, в более сухих почвах сосняков — 100–170 экз./м², или около 30%. В результате общая численность макрофауны в сосновых лесах ниже, чем в еловых: 450–560 экз./м² против 560–750 экз./м² (Зенкова, 2000; Валькова, 2009).

Биомасса (сырая масса) макрофауны, напротив, выше в сосновых лесах из-за обитания в них крупных представителей местной фауны — многоножек-костянок, моллюсков, дождевых червей, личинок жуков-щелкунов, которые малочислен-

ны или отсутствуют в еловых лесах. Подстилки еловых лесов Мурманской области отличаются от сосновых повышенным содержанием биогенных элементов и более высокой микробиологической активностью. Они накапливают больше углерода (50% против 30–45% в сосняках), азотсодержащих компонентов, моно- и полисахаридов и меньше лигнина и клетчатки. Для ельников характерна двукратно повышенная численность бактерий по сравнению с сосняками и значительное преобладание грибной биомассы над бактериальной (Лукина, Никонов, 1998). Несмотря на эти преимущества, кислотность почвенных растворов (рН 3.9–4.2) ограничивает распространение в еловых лесах кальцефильных беспозвоночных, предпочитающих лесные подстилки с повышенной зольностью, пониженным уровнем кислотности (рН ≥ 5.0) и органическим веществом гуматного типа. Из дождевых червей, наряду с мелким подстилочным *D. octaedra*, здесь единично встречаются подстилочный *Dendrodrilus rubidus tenuis* и среднеразмерный почвенно-подстилочный *Lumbricus rubellus*. Их общая численность не превышает 16 экз./м², биомасса — 500 мг/м² (Валькова, 2009; Zenkova, 2010).

Примером лесного биоценоза с полноценным набором дождевых червей разных морфо-экологических типов (жизненных форм) является мониторинговый равнинный сосняк кустарничковый. Под ним, на отсортированных песках озерно-ледникового происхождения с высоким содер-

жанием Si, P, Al и Fe, сформирован подзол иллювиально-гумусовый с повышенной зольностью ($\geq 30\%$), пониженной кислотностью (рН ≥ 5.33) подстилки и органическим веществом гуматного типа (Ушакова, 1997). Это определяет типичный для хвойных лесов северной тайги, но разнообразный состав напочвенного покрова и растительного опада (Зенкова и др., 2016), которому соответствует нетипично высокая для зональных лесов Мурманской области численность кальцефильных дождевых червей (до 192 экз./м²), моллюсков (до 50 экз./м²) и многоножек-литобиид (до 80 экз./м²). Черви представлены здесь пятью видами: подстилочными *D. octaedra* и *De. rubidus*, почвенно-подстилочными *L. rubellus* (доминант) и *Eisenia fetida* и крупным почвенным видом *Aporrectodea caliginosa caliginosa* (Zenkova, 2010). Отсутствие видов четвертой — норной жизненной формы объясняется «карликовостью» зональных почв: укороченным профилем и малой мощностью генетических горизонтов.

По результатам ежемесячного отбора почвенных проб в мониторинговом сосняке с мая по октябрь 2016 г. встречаемость дождевых червей в пробах составила 100%, в каждой из них одновременно присутствовали от одного до трех видов в количестве от 1 до 12 экз. Численность червей варьировала от 32 до 120 экз./м². Неполовозрелые особи разных видов встречались на протяжении всего вегетационного сезона (Зенкова, Рапопорт, 2017).

Не выявлено значимого изменения численности дождевых червей в сосняке за 10-летний период: в 2016 г. показатели численности этой ключевой группы почвенных сапрофагов находились в границах естественных многолетних флуктуаций, установленных нами в 1997–2005 гг.: 10–60 экз./м², CV = 43% (Зенкова, 2000; Zenkova, 2010). На динамику численности достоверное влияние оказывают метеорологические условия региона, определяющие гидротермический режим почв. Наряду с дождевыми червями, для большинства обитателей подстилки сосняка (энхитреид, личинок двукрылых, пауков, многоножек, мягкотелок, стафилинид, жуужелиц, щелкунов и муравьев) получена высокая корреляционная зависимость ($0.70 \leq r \leq 0.99$) от среднегодовой температуры воздуха предыдущего года, температуры предыдущего вегетационного сезона, условий увлажнения текущего вегетационного сезона (с мая по сентябрь) и количества атмосферных осадков, выпавших за месяц, предшествующий месяцу отбора почвенных проб (Зенкова, 2000).

Анализ изотопного состава углерода и азота в образцах почвы, растений и тканей трех доминирующих в мониторинговом сосняке видов дождевых червей *D. octaedra*, *L. rubellus*, *A. c. caliginosa*, показал наибольшее обогащение тяжелыми изотопами ¹³C и ¹⁵N тканей почвенного червя *A. c. caliginosa*, соответствующее обогащению почвы этими изотопами на глубине органогенного горизонта 10 см,

а также питанию этого вида разложившимся детритом. Меньшее обогащение тяжелыми изотопами тканей подстилочного *D. octaedra* и почвенно-подстилочного *L. rubellus* соотносилось с меньшим содержанием этих изотопов в верхних слоях подстилки (Зенкова и др., 2019). Следовательно, три вида дождевых червей, совместно обитающие в маломощном органогенном горизонте северотаежных подзолистых почв, используют разные источники углерода и в пределах единой (по азоту) трофической группы сапрофагов занимают разные (по углероду) трофические позиции. Трофический комплекс беспозвоночных-сапрофагов в целом в почвенном ярусе мониторингового сосняка организован в два блока в зависимости от субстрата, в котором они обитают и из которого получают энергию: подстилочный и почвенный. Подстилочные сапрофаги трофически более связаны с ферментативным F горизонтом подстилки и разлагающимся в нем опадом, чем с листовым L горизонтом. Почвенные сапрофаги — с гумусовым H горизонтом подстилки и подподстилочным минеральным слоем почвы. Преимущественное фракционирование изотопов $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ из растительного опада выявлено нами именно в F и H горизонтах лесной подстилки и подподстилочном слое почвы, что свидетельствует об участии беспозвоночных-сапрофагов в процессе биологического фракционирования.

Влияние дождевых червей на трансформацию мортмассы почвы общепризна-

но. В их экскрементах повышается зольность органического вещества (на 2-3%), содержание в нем углерода, аммонийной и нитратной форм азота (приводящее к сужению соотношения C:N), фосфора, гуминовых и фульвокислот (с преимущественным накоплением последних). Это свидетельствует о протекании процессов разложения растительных остатков с их частичной минерализацией в кишечнике дождевых червей и процессов синтеза гумусовых веществ в их копролитах (в частности, наиболее устойчивого гумусового соединения — гумата кальция) (обзор: Козловская, 1976). Однако в связи с потреблением дождевыми червями, особенно видами подстилочной и почвенно-подстилочной групп, доминирующими в Мурманской области, свежего опада, слабо затронутого микробной деструкцией, в результате пищеварительной деятельности этих крупных беспозвоночных — сапрофагов в почве активизируются лишь начальные стадии разложения органического вещества, тогда как процессы трансформации сложных углеводов — целлюлозы и гемицеллюлозы — выражены слабо. Так, для вида *L. rubellus* в составе свежего опада выявлено предпочтение трудноразлагаемой хвои сосны, а в составе лежалого прошлогоднего опада — листьев березы. Наряду с низкой численностью представленных видов червей, это приводит к консервации органического вещества в почвах Мурманской области и преобладанию этого про-

цесса над процессами минерализации и/или гумификации.

В горных экосистемах Мурманской области, как и в зональных лесах, разнообразие и численность дождевых червей связаны с литологическим фактором, определяющим различие гранулометрического, валового химического состава и физико-химических свойств почв (Зенкова, Рапопорт, 2017). В иллювиально-многогумусовых подзолах и подбурах, сформированных на щелочных нефелиновых сиенитах Хибинского горного массива с богатым минералогическим и химическим составом (Переверзев, 2010), выявлены шесть видов дождевых червей, принадлежащих к трем жизненным формам, в том числе почвенно-подстилочный вид *Eisenia nordenskioldi* (Eisen, 1879), не известный для Мурманской области за пределами Хибин (Рыбалов, 2006; Камаев, 2012; Zenkova, Rapoport, 2014).

Видовое и экологическое разнообразие дождевых червей варьируют в зависимости от экспозиции склона и горно-растительного пояса, достигая наибольших значений (до 100-130 экз./м² и 40 г/м²) в березовых криволесьях на склонах южной и юго-восточной экспозиции, что соответствует листовенному типу леса с хорошо разложившейся и высокогумусированной подстилкой, а также более оптимальному режиму увлажнения и прогрева почв на высоте произрастания березовых криволесий в Хибинах (370–450 м

над ур. м.) по сравнению с горно-таежным лесами в основании склонов (Штабровская, 2022). Обитание крупных влаголюбивых и термофильных видов *A. caliginosa* и компостного *E. fetida* свидетельствует об азональном характере горных березняков на южных склонах гор и полугидроморфном режиме горных почв. Разнообразие морфо-экологических типов, которые образуют ряд: подстилочные — подстилочно-почвенные — собственно почвенные, соответствующий стадийности разложения растительного опада, отражает более глубокую степень биотрансформации органического вещества в почвенном ярусе горно-лесных биоценозов по сравнению с зональными почвами Мурманской области. Предпочтение дождевыми червями и другими кальцефильными беспозвоночными горных почв Хибин определяет более высокие показатели численности (> 1 тыс. экз./м²) и биомассы макрофауны (десятки г/м²) в горно-лесных поясах этого заполярного массива по сравнению с зональной северной тайгой.

Промышленное загрязнение среды в зонах действия крупных предприятий Мурманской области — медно-никелевых комбинатов «Североникель», «Печенганикель» и Кандалакшского алюминиевого завода — приводит к значительным перестройкам структуры почвенной макрофауны (Степанов и др., 1991; Воздействие..., 1995; Зенкова, 2000; Евдокимова и др., 2002, 2005; Валькова, Зенкова 2008; Валькова, 2009). В лесных экосистемах,

подверженных многолетнему влиянию газозооценозов выбросов разного типа — соединений серы и тяжелых металлов (медно-никелевые комбинаты) и соединений фтора, алюминия и бенз(а)пиренов (алюминиевый завод), перестройки структуры макрофауны носят сходный, неспецифический, характер. Они выражаются в снижении таксономического и трофического разнообразия и общей биомассы макрофауны (главным образом из-за элиминации дождевых червей) и смене устойчивой полидоминантной структуры сообщества (численного преобладания представителей разных таксонов) на олигодоминантную с супердоминированием личинок двукрылых, временно использующих почвенную среду для своего развития (Зенкова, 2000; Валькова, Зенкова, 2008; Валькова, 2009). Биотрансформация растительного опада в почвах, загрязняемых выбросами тяжелых металлов и соединений серы, отличается усилением взаимосвязи присутствующих в них беспозвоночных-сапрофагов (энхитреид, орибатид, личинок двукрылых) с микроскопическими грибами, устойчивыми к данному типу промышленного загрязнения (Евдокимова и др., 2002).

Результатами проведенных исследований подтвержден ряд закономерностей организации почвенной фауны в наземных экосистемах Мурманской области:

- характерное для заполярных широт преобладание мелких и обильных микроартропод над более крупными беспозвоночными — представителями макрофауны;

- естественное пониженное таксономическое и трофическое разнообразие беспозвоночных в почвах зональной Кольской тундры и северной тайги и, напротив, повышенное — в аazonальных и антропогенно трансформированных равнинных и горных экосистемах;
- зависимость разнообразия и обилия беспозвоночных от метеоусловий региона, литологического фактора, физико-химических свойств подстилки и типа леса (вида древесной породы — эдификатора);
- угнетение почвенной фауны в зонах загрязнения среды газоздушными выбросами промышленных предприятий.

РАЗНООБРАЗИЕ ПОЧВЕННОЙ МИКОБИОТЫ

Микроорганизмы — наиболее активная и динамичная часть почвенной биоты (Семенов и др., 2013). Микроорганизмы играют первостепенную роль в почвообразовании, запуская процесс биологического выветривания горных пород, разложения и минерализации органических веществ и круговорота питательных веществ. Также они регулируют поток питательных веществ к растениям и поддерживают фиксацию азота и в конечном итоге способствуют детоксикации встречающихся в почве неорганических и органических загрязнителей природного происхождения (Kaviya et al., 2019).

Для наземных экосистем вклад грибов как редуцентов органического вещества

(Добровольская и др., 2014) в круговорот углерода гораздо больше, чем прокариот (Никитин и др., 2021), благодаря наличию широкого спектра гидролитических ферментов, наиболее активных в аэробных условиях (Kaviya et al., 2019).

Микобиота фоновых и антропогенно-измененных почв изучена в тундровой и северотаежной зонах Мурманской области. Исследования микобиоты фоновых почв в тундровой зоне проведены в районе населенных пунктов Дальние Зеленцы, Титовка, на территории полуостровов Средний и Рыбачий, около г. Лепсеч, в районе р. Западная Лица, в районе пгт Печенга. В таежной зоне исследована микобиота фоновых почв Апатитского, Кандалакшского, Ковдорского районов. Микобиота антропогенно-измененных почв, загрязненных тяжелыми металлами, изучена в импактной зоне медно-никелевых комбинатов «Североникель» (г. Мончегорск) и «Печенганикель» (пгт Никель). Микобиота почв, загрязненных нефтепродуктами, исследована из замазученных эродированных грунтов на горе Каскама и острове Варлама. Микобиота почв, загрязненных фтором, исследована в импактной зоне Кандалакшского алюминиевого завода. Урбанизированные почвы изучены на примере города Апатиты.

Отбор проб для микологического анализа проводили из органогенного горизонта почв и из слоя 0–5 см эродированного грунта; урбанизированные почвы отбирали по горизонтам. Разнообразие

культивируемых микромицетов определяли методом микробиологического посева на среду сусло-агар с добавлением молочной кислоты (4 мл/л) для ингибирования роста бактерий (Звягинцев, 1991). Анализ биологического разнообразия микроскопических грибов выполнен на основе культурально-морфологических признаков (микроскоп Olympus CX41) с использованием классических определителей (Klich, 2002; Domsh et al., 2007; Seifert et al., 2011). Наименование видов и систематическое положение дано по базе данных SABI Bioscience Databases (Index Fungorum, 2023).

Представленность видов оценивали по индексу относительного обилия видов. Градации видов по обилию применяли следующие: доминирующие $\geq 30\%$ > типичные $\geq 10\%$ > редкие (Мирчинк, 1988). Анализ сходства видового состава про-

водили с помощью кластерного анализа, реализованного в пакете «vegan» в программном пакете R 4.2.2, с помощью критерия сходства Сёренсена. Кластеризацию проводили методом Варда.

Видовое разнообразие микроскопических грибов в фоновой почве тундровой зоны представлено 35 видами (рис. 3), относящимися к 17 родам, 15 семействам, 8 порядкам, 6 классам и 2 отделам и грибами со стерильным мицелием (Корнейкова, 2018). По числу видов преобладал род *Penicillium*, который является доминирующим в почвах Кольского полуострова. Виды данного рода составляли 40% от общего количества видов, выделенных в тундровых почвах. Род *Talaromyces* представлен тремя видами (8% от общего количества видов), рр. *Mucor*, *Trichoderma*, *Torula* по два вида (по 6% от общего количества видов), остальные роды — по 3%.

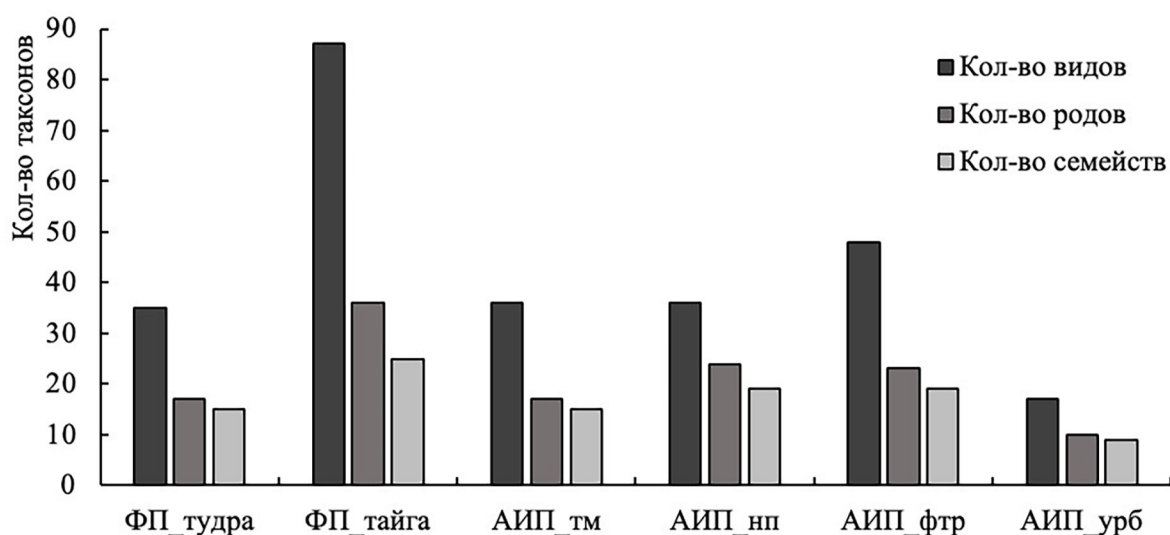


Рисунок 3. Количество выделенных видов из антропогенно-измененных (АИП) и фоновых почв (ФП) Мурманской области (по: Evdokimova, Korneukova, 2010; Корнейкова и др., 2012; Evdokimova et al., 2013; Корнейкова, 2013; Корнейкова, 2015; Корнейкова, Лебедева, 2015; Корнейкова, 2018; Корнейкова и др., 2020; Redkina et al., 2020; Корнейкова, Никитин, 2021, с изменениями). Обозначения: тундра — тундровая зона, тайга — таежная зона, тм — загрязнение тяжелыми металлами, нп — загрязнение нефтепродуктами, фтр — загрязнение фтором, урб — влияние урбанизации

Видовое разнообразие микроскопических грибов в почвах, загрязненных тяжелыми металлами, представлено 36 видами (рис. 3), относящимися к 17 родам, 15 семействам, 8 порядкам, 5 классам и 2 отделам (Корнейкова и др., 2012; Evdokimova et al., 2013; Корнейкова, 2015, Корнейкова, Лебедева, 2015). В этих почвах доминировали грибы рода *Penicillium* и составляли 36% от общего количества видов. Род *Aspergillus* представлен 4 видами, что составляет 11% от общего количества видов. Роды *Lecanicillium*, *Oidiodendron*, *Talaromyces* и *Trichoderma* — по 2 вида (по 6% от общего количества видов), остальные роды — по 3%.

Видовое разнообразие микроскопических грибов в почвах, загрязненных нефтепродуктами, представлено 36 видами (рис. 3), относящимися к 24 родам, 19 семействам, 11 порядкам, 7 классам и 3 отделами и грибами со стерильным мицелием (Корнейкова и др., 2012; Корнейкова, 2013; Evdokimova et al., 2013). В этих почвах были типичными грибы рода *Penicillium*, составляющие 22% от общего количества видов. Роды *Aureobasidium* и *Mucor* представлены по 3 вида (по 8% от общего количества видов), остальные роды — по 3%.

Видовое разнообразие микроскопических грибов в почвах, загрязненных фтором, представлено 48 видами (рис. 3), относящимися к 23 родам, 19 семействам, 11 порядкам, 6 классам и 2 отделам и грибами со стерильным мицелием (Evdokimova, Korneykova, 2010; Корнейкова и др., 2012;

Evdokimova et al., 2013; Корнейкова, 2015; Redkina et al., 2020; Корнейкова, Никитин, 2021). В этих почвах доминировали грибы рода *Penicillium* и составляли 35% от общего количества видов. Грибы рр. *Torula* и *Umbelopsis* представлены по 3 вида (по 6% от общего количества видов), рр. *Acremonium*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Talaromyces* и *Trichoderma* — по 2 вида (по 4% от общего количества видов), остальные роды — по 2%.

Видовое разнообразие микроскопических грибов в урбанизированных почвах представлено 17 видами (рис. 3), относящимися к 10 родам, 9 семействам, 6 порядкам, 5 классам и 2 отделам и грибами со стерильным мицелием (Корнейкова и др., 2020). В этих почвах доминировали грибы рода *Penicillium* и составляли 41% от общего количества видов. Род *Umbelopsis* представлен 2 видами (по 11% от общего количества видов), остальные роды — по 6%.

Всего в антропогенно-измененных и фоновых почвах Кольского полуострова выделено 122 вида микроскопических грибов из классов *Eurotiomycetes* (46 видов), *Sordariomycetes* (34 вида), *Dothideomycetes* (20 видов), *Leotiomycetes* (8 видов), *Mucoromycetes* (8 видов), *Umbelopsidomycetes* (3 вида), *Mortierellomycetes* (2 вида) и *Microbotryomycetes* (1 вид) (рис. 4).

Доля отделов микроскопических грибов в разных районах была примерно равной (рис. 5). Но в почве, загрязненной тяжелыми металлами, отмечена наименьшая доля отдела *Mucoromycota* — 8%, предста-

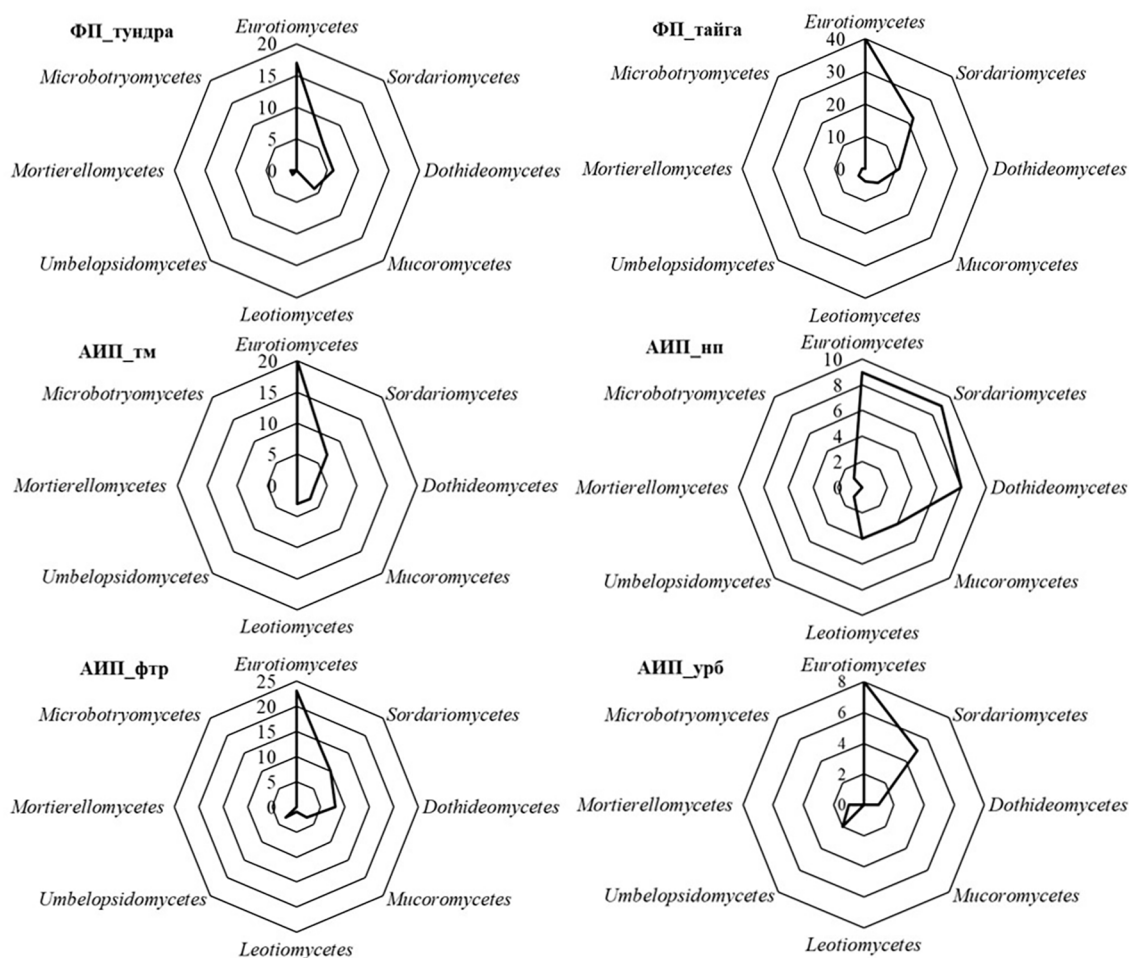


Рисунок 4. Видовое разнообразие микромицетов антропогенно-измененных (AIP) и фоновых почв (ФП) Мурманской области на уровне классов области (по: Evdokimova, Korneykova, 2010; Корнейкова и др., 2012; Evdokimova et al., 2013; Корнейкова, 2013; Корнейкова, 2015; Корнейкова, Лебедева, 2015; Корнейкова, 2018; Корнейкова и др., 2020; Redkina et al., 2020; Корнейкова, Никитин, 2021, с изменениями). Обозначения: тундра — тундровая зона, тайга — таежная зона, тм — загрязнение тяжелыми металлами, нп — загрязнение нефтепродуктами, фтр — загрязнение фтором, урб — влияние урбанизации

вители которого, как известно, чувствительны к разного рода антропогенным загрязнениям. В тундровой и урбанизированной почве, наоборот, отмечена наибольшая доля отдела *Mucoromycota* — 17-18%.

Доминирующими по показателю обилия в почве тундры были *Penicillium melinii*, *P. raistrickii*, *P. simplicissimum*, *Umbelopsis longicollis*; в тайге — *P. decumbens*, *P. implicatum*, *U. isabellina* и *U. longicollis*.

Доминирующими по показателю обилия в почве, загрязненной тяжелыми металлами, были *Penicillium spinulosum*, *P. glabrum*, *Trichoderma viride*; в почве, загрязненной нефтепродуктами — *Aureobasidium microstictum* и *Umbelopsis isabellina*; в почве, загрязненной фтором — *P. miczynskii*, *P. spinulosum* и *P. trzebinskii*; в урбанизированных почвах — *P. dierckxii*, *P. melinii* и *Trichocladium griseum*.

Кластерный анализ видового состава комплексов микромицетов в антропогенно-измененных и фоновых почвах Кольского полуострова выявил схожесть сообществ микромицетов почвы таежной зоны с почвой, загрязненной фтором (рис. 6, табл. 6). Видовой состав этих местообитаний близок к почве тундровой зоны.

Это свидетельствует о сходстве видового состава микромицетов почвы, загрязненной фтором, и фоновых почв. Видовой состав почвы, загрязненной тяжелыми металлами, и почвы, загрязненной нефтепродуктами, образовал второй кластер, свидетельствуя об отличии этих местообитаний от фоновых. Урбанизированные почвы отличались специфичным видовым составом, несхожим с остальными изученными местообитаниями.

Во всех районах были выделены виды *Penicillium canescens*, *P. simplicissimum* и *P. spinulosum*. Семь видов микроскопических грибов было выделено только в фоновой почве тундровой зоны: *Fusarium caeruleum*, *Gamsiella stylospora*, *Gliomastix roseogrisea*, *P. camemberti*, *P. janczewskii*, *Torula expansa* и *Trichosporum macrosporum*; 22 вида — в фоновой почве таежной зоны: *Acremonium egyptiacum*, *Albifimbria verrucaria*, *Cephalosporium bonordenii*, *Clonostachys rosea*, *Cordyceps farinosa*, *Fusarium* sp. st 1, *Mucor circinelloides*, *P. adametzii*, *P. brevicompactum*, *P. citreonigrum*, *P. cyaneum*, *P. dipodomyus*, *P. granulatatum*, *P. velutinum*, *P. verrucosum*, *Phoma* sp., *Sarocladium kiliense*, *S. strictum*, *Thermomyces stellatus*, *Torula* sp. st 1, *Trichoderma aureoviride*, *Wardomyces anomalus*; 5 ви-

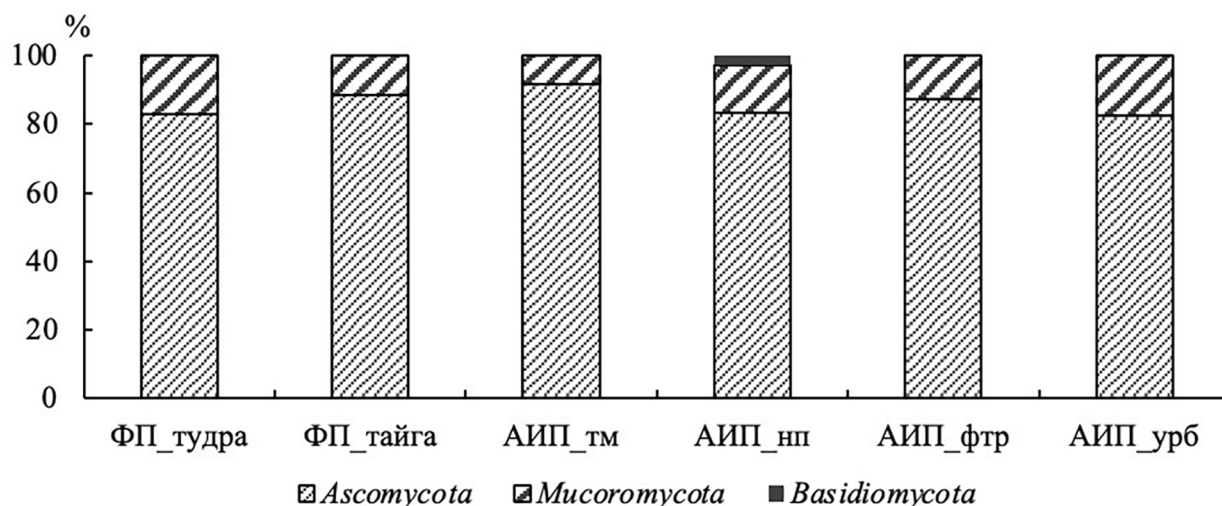


Рисунок 5. Доля отделов микроскопических грибов, выделенных из антропогенно-измененных (АИП) и фоновых почв (ФП) Мурманской области (по: Evdokimova, Korneykova, 2010; Корнейкова и др., 2012; Evdokimova et al., 2013; Корнейкова, 2013; Корнейкова, 2015; Корнейкова, Лебедева, 2015; Корнейкова, 2018; Корнейкова и др., 2020; Redkina et al., 2020; Корнейкова, Никитин, 2021, с изменениями). Обозначения: тундра — тундровая зона, тайга — таежная зона, тм — загрязнение тяжелыми металлами, нп — загрязнение нефтепродуктами, фтр — загрязнение фтором, урб — влияние урбанизации

дов — в почве, загрязненной тяжелыми металлами: *Cadophora melinii*, *Chaetomium* sp., *Lecanicillium* sp., *P. chrysogenum*, *T. lucifuga*; 12 видов — в почве, загрязненной нефтепродуктами: *Akanthomyces lecanii*, *Amorphotheca resiniae*, *Aureobasidium melanogenum*, *Didymella glomerata*, *Gibberella fujikuroi* var. *fujikuroi*, *Humicola grisea* var. *grisea*, *L. psalliota*, *M. griseocyaneus*, *Oidiodendron rhodogenum*, *Ph. herbarum*, *Pseudogymnoascus pannorum*, *Rhodotorula* sp.; 5 видов — в почве,

загрязненной фтором: *Exophiala jeanselmei*, *Ph. medicaginis* var. *medicaginis*, *Scopulariopsis brumptii*, *Talaromyces verruculosus*, *Torula* sp. st 2; 3 вида — из урбанизированных почв: *Acremonium* sp., *Fusarium* sp. st 2, *Torula* sp. st 3.

Штаммы микроскопических грибов, выделенные из почв Мурманской области, включены в коллекцию микроорганизмов, являющуюся частью Гербария ИППЭС КНЦ РАН.

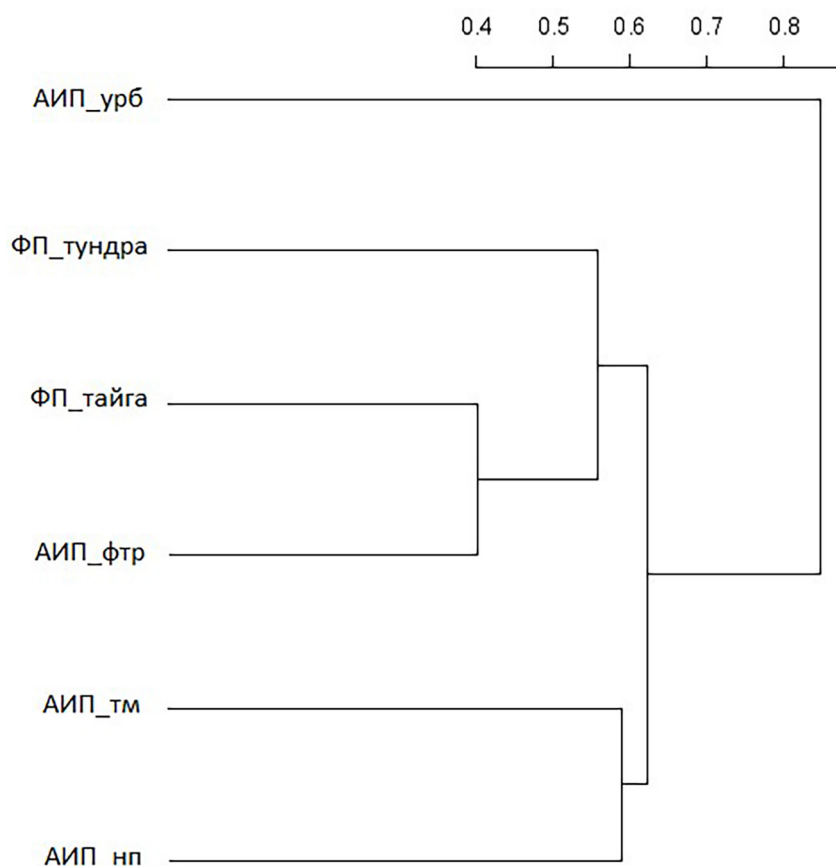


Рисунок 6. Дендрограмма сходства видового состава микромицетов антропогенно-измененных (АИП) и фоновых почв (ФП) Мурманской области (по: Evdokimova, Korneykova, 2010; Корнейкова и др., 2012; Evdokimova et al., 2013; Корнейкова, 2013; Корнейкова, 2015; Корнейкова, Лебедева, 2015; Корнейкова, 2018; Корнейкова и др., 2020; Redkina et al., 2020; Корнейкова, Никитин, 2021, с изменениями). По оси абсцисс: расстояние между вариантами на основе коэффициента Сёренсена, по оси ординат: изученные местообитания. Обозначения: тундра — тундровая зона, тайга — таежная зона, тм — загрязнение тяжелыми металлами, нп — загрязнение нефтепродуктами, фтр — загрязнение фтором, урб — влияние урбанизации

Таблица 6. Коэффициент Сёренсена для сообществ микромицетов антропогенно-измененных (АИП) и фоновых почв (ФП) Мурманской области (по: Evdokimova, Korneykova, 2010; Корнейкова и др., 2012; Evdokimova et al., 2013; Корнейкова, 2013; Корнейкова, 2015; Корнейкова, Лебедева, 2015; Корнейкова, 2018; Корнейкова и др., 2020; Redkina et al., 2020; Корнейкова, Никитин, 2021, с изменениями)

| Вариант | ФП_тундра | ФП_тайга | АИП_тм | АИП_нп | АИП_фтр |
|----------|-----------|----------|--------|--------|---------|
| ФП_тайга | 46.8 | – | – | – | – |
| АИП_тм | 38.9 | 50.0 | – | – | – |
| АИП_нп | 43.8 | 38.4 | 41.1 | – | – |
| АИП_фтр | 49.4 | 59.9 | 42.4 | 46.5 | – |
| АИП_урб | 25.9 | 26.4 | 18.5 | 32.7 | 32.8 |

Обозначения:

тундра — тундровая зона, тайга — таежная зона, тм — загрязнение тяжелыми металлами, нп — загрязнение нефтепродуктами, фтр — загрязнение фтором, урб — влияние урбанизации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Мурманской области основными природными факторами, определяющими функционирование наземных экосистем, в том числе регулирование циклов углерода, являются климат, рельеф, почвообразующие породы, почвы и населяющая их биота. Короткий вегетационный период и недостаток тепла ограничивают продуцирование органического вещества, микробиологическую активность и разнообразие крупных беспозвоночных-сапрофагов. Это снижает темпы разложения мортмассы, интенсивность и емкость биогеохимического круговорота.

На содержание и запасы углерода и азота в наземных экосистемах региона значительное влияние оказывают антропогенные факторы — рубки, пожары, воздушное промышленное загрязнение, из-

меняющие формационный состав лесов, возраст и полнота древостоя, сомкнутость крон деревьев, качество опада доминирующих видов растений, активность почвенной фауны и микобиоты. Изменение условий произрастания северотаежных лесов в результате комбинированного действия природных и техногенных факторов может приводить к нарушениям экосистемных функций лесов: влиять на циклы углерода и элементов минерального питания, плодородие почв, продуктивность экосистем.

В северотаежных лесах на фоновых и нарушенных техногенным загрязнением территориях концентрации углерода в атмосферных и почвенных водах, так же как выпадения углерода из атмосферы и вынос его с почвенными водами, как правило, выше в подкروновых пространствах ело-

вых и сосновых лесов, чем в межкрупных. Это связано со смывом и выщелачиванием соединений элементов из крон деревьев, опада и почв. В почвенных водах наблюдается снижение выноса углерода с глубиной почвенного профиля. В дефолирующих лесах и техногенных редколесьях по сравнению с фоном обнаружено снижение концентраций, выпадений из атмосферы и выноса с почвенными водами углерода, что объясняется снижением количества опада из-за ухудшения состояния и гибели деревьев.

В фоновых еловых и сосновых лесах показатель минерального азота (N_{min}) в почвенных водах уменьшается с глубиной почвенного профиля, как под кронами, так и между крон деревьев, что может объясняться активным биологическим поглощением. В фоновых еловых и сосновых лесах внутрибиогеоценотические различия для N_{min} в водах из всех горизонтов не достоверны, что подтверждает представления об ограничениях вымывания соединений азота из крон древесных растений. На техногенно нарушенных территориях, напротив, наблюдаются более высокие концентрации минерального азота под кронами деревьев в почвенных водах, что можно объяснить повреждением хвои и вымыванием соединений азота из крон деревьев с поврежденной хвоей.

В связи со сложным сочетанием природных и антропогенных факторов, определяющих функционирование наземных

экосистем Мурманской области, им свойственна высокая вариабельность содержания и запасов углерода в почвах, фитомассе. Подзолы северотаежных лесов Мурманской области имеют малую мощность органогенного горизонта и небольшие запасы органического вещества, низкое содержание азота и гумуса в минеральных горизонтах, кислую реакцию почвенного раствора. Для подзолов характерно бимодальное распределение гумуса по профилю с максимумами в органогенном и иллювиальном горизонтах. Содержание углерода в органогенном горизонте почв еловых и сосновых лесов варьирует от 12 до 54%, азота — от 4.7 до 18.7 г/кг. Высокие запасы почвенного углерода сосредоточены в органогенном горизонте подкрупных пространств (до 27–34 т/га). Запасы углерода в метровом слое почвы по данным прямых измерений с использованием данных о плотности минеральных горизонтов почвенного профиля в еловых лесах выше (60 т/га), чем в сосновых (47 т/га).

Запасы фитомассы северотаежных лесов характеризуются невысокими значениями (12–188 т/га). Одной из основных особенностей лесных экосистем является наличие значительных запасов растительного органического вещества, заключенных в напочвенном покрове (5–17 т/га). Содержание углерода в ассимилирующих органах (листья/хвоя, побеги) растений варьирует от 35 до 73%, азота — от 5.4 до 23.6 г/кг. Скорость разложения раститель-

ных остатков и потери углерода при разложении опада вечнозеленых растений в еловых лесах выше, чем в сосновых.

Структурно-функциональная организация почвенной фауны в пределах Мурманской области определяется факторами широтной зональности и высотной поясности почвенно-растительного покрова и корректируется метеоусловиями конкретных лет и антропогенными факторами. В почвах тундрово-лесотундровой зоны участие микроартропод (панцирных клещей и коллембол) в процессах биотрансформации органического вещества и почвообразования более значимо, по сравнению с представителями макрофауны. В лесных почвах северотаежной подзоны приоритет микроартропод в составе почвенного населения сохраняется, но возрастает функциональная значимость макрофауны. В подзоне северной тайги разнообразие и обилие наиболее крупных и функционально значимых представителей сапротрофного блока почвенной фауны связано главным образом с типом леса (породой эдификатора) и физико-химическими свойствами лесной подстилки, в меньшей степени — с местоположением лесных биоценозов на территории региона. В целом, гумидному режиму функционирования лесных подзолов соответствует преобладание вторичных разрушителей растительного опада — гумификаторов дождевых червей и миксофагов (личинок щелкунов, подстилочных моллюсков) и отсутствие кальцефильных

групп минерализаторов (мокриц, двупарноногих многоножек). Показано, что три вида дождевых червей, совместно обитающие в маломощном органогенном горизонте северотаежных подзолистых почв, используют разные источники углерода и в пределах единой (по азоту) трофической группы сапрофагов занимают разные (по углероду) трофические позиции.

Из ненарушенных и антропогенно-измененных почв Мурманской области выделено 122 вида микроскопических грибов. Среди фоновых почв наибольшим видовым разнообразием характеризовались комплексы микроскопических грибов таежной зоны (87 видов), среди антропогенно-измененных почв — микокомплексы почв, загрязненных фтором (48 видов). Наименьшее видовое разнообразие микромицетов отмечено в урбанизированных почвах (17 видов). Доминирующим родом микроскопических грибов в почвах являлся *Penicillium*: в исследованных местообитаниях виды этого рода составляли 22–41% от общего количества выделенных видов. Выявлена схожесть сообществ микромицетов фоновых почв с почвой, загрязненной фтором (степень сходства составляет 49–60%). Урбанизированные почвы отличались специфичным видовым составом, несхожим с остальными изученными местообитаниями. Доминирующими по показателю обилия в фоновой почве были виды pp. *Penicillium* и *Umbelopsis*, в антропогенно-измененных почвах — виды pp. *Aureobasidium*, *Penicillium*, *Trichocladium*,

Trichoderma и *Umbelopsis*. Во всех районах были выделены виды *Penicillium canescens*, *P. simplicissimum* и *P. spinulosum*. Среди фоновых почв наибольшее количество видов, встречающихся только в одном местообитании, характерно для микокомплексов таежной зоны (22 вида), среди антропогенно-измененных почв — для микокомплексов почв, загрязненных нефтепродуктами (12 видов).

Анализ литературных данных показал, что информации по пулам и потокам углерода и азота в наземных экосистемах Мурманской области недостаточно. Исследования циклов углерода и азота должны включать сопряженный анализ атмосферных выпадений, почвы, почвенных вод, фито- и мортмассы с учетом внутри- и межбиогеоценотической мозаичности растительного покрова. Недостаточно изучен вклад почвенной биоты в перераспределение органических и минеральных веществ в почве. Особое внимание исследователей необходимо сосредоточить на процессах разложения и минерализации

растительного опада в тундровых и лесных экосистемах Севера. Дальнейшие исследования этих научных направлений важны для развития концепции о биогеохимических циклах углерода и азота, совершенствования методологии их оценки и устойчивого управления наземными экосистемами Арктики в условиях воздействия экстремальных природных и антропогенных факторов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аксенова О. В., Бочарников В. Н., Боровичёв Е. А., Данилов А. Ф., Денисов Д. Б., Зацаринный И. В., Иванова Л. В., Ключникова Е. М., Кожин М. Н., Королёва Н. Е., Костина В. А., Макаров Д. В., Маслобоев В. А., Мурашко О. А., Петрова О. В., Рябова Л. А., Сенников А. Н., Суляндзига П. В., Суляндзига Р. В., Терентьев П. М., Тураев В. А., Химич Ю. Р. Природа и коренное население Арктики под влиянием изменения климата и индустриального освоения: Мурманская область / под ред. Е. А. Боровичёва и Н. В. Вронского. Москва: Изд. Дом «Графит», 2020. 180 с.
- Алексеев В. А., Лянгузова И. В. Влияние загрязнения на изменение морфоструктуры деревьев // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. С. 87–94.
- Алексеева Н. С., Кислых Е. Е., Переверзев В. Н. Состав органического вещества целинных и освоенных иллювиально-гумусовых подзолов // Органическое вещество в почвах Кольского полуострова. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1975. С. 23–38.
- Алексеев Н. А., Боровичёв Е. А., Волкова А. А., Давыдов Д. А., Данилова А. Д., Денисов Д. Б., Дудорева Д. А., Зацаринный И. В., Зенкова И. В., Ильин Г. С., Коноплёва Н. Г., Копеина Е. И., Королёва Н. Е., Петров В. Н., Петрова О. В., Терентьев П. М., Химич Ю. Р. Хибинь: природа и человек / под ред. Е. А. Боровичёва и Н. Е. Королёвой. СПб.: ООО «Своё издательство», 2022. 308 с.
- Атлас Мурманской области. Москва: Изд-во Главного Управления геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1971. 44 с.
- Бабенко А. Б. Коллемболы Арктики: Структура фауны и особенности хорологии: Дисс. ... докт. биол. наук (спец. 03.00.08). Москва, 2005. 382 с.
- Бабенко А. Б. Ногохвостки (*Hexapoda, Collembola*) тундровых ландшафтов Кольского полуострова // Зоологический журнал. 2012. Т. 91. № 4. С. 411–427.
- Барановская А. В., Левина В. И., Переверзев В. Н. Сезонная динамика почвенных процессов на Полярном Севере. Л.: Наука, 1969. 118 с.
- Белов Н. П., Барановская А. В. Почвы Мурманской области. Л.: Наука, 1969. 147 с.
- Биопродукционный процесс в лесных экосистемах Севера / под ред. К. С. Бобковой, Э. П. Галенко. СПб.: Наука, 2001. 278 с.
- Валькова С. А. Комплексы беспозвоночных-сапрофагов в лесных экосистемах Кольского Севера: Дисс. ... канд. биол. наук (спец. 03.00.16, 03.00.08). Апатиты, 2009. 129 с.
- Валькова С. А., Зенкова И. В. Изменения трофической структуры мезофауны в зонах воздействия промышленных предприятий разного типа // Экологические проблемы Северных регионов и пути их решения: Матер.

- Всеросс. конф. с междунар. участием. В 2 ч. г. Апатиты, 14-16 октября 2008 г. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2008. Ч. 1. С. 55–58.
- Ветчинникова Л. В.* Береза: вопросы изменчивости (морфо-физиологические и биохимические аспекты). М.: Наука, 2004. 183 с.
- Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова / под ред. Б. Н. Норина и В. Т. Ярмишко. Л.: Ботанический институт АН СССР, 1990. 195 с.
- Воздействие металлургических производств на лесные экосистемы Кольского полуострова / под ред. В. В. Сычева. СПб.: Родники, 1995. 251 с.
- Воробьева И. Г., Наумова А. Н.* Интенсивность процесса деструкции растительного опада в почвах сухих местообитаний // Продуктивность и устойчивость лесных почв: Матер. III междунар. конф., г. Петрозаводск, 7–11 сентября 2009, г. Петрозаводск: Изд-во Карельского НЦ РАН, 2009. С. 192–195.
- Второва В. Н.* Круговорот веществ некоторых типов северотаежных еловых лесов при техногенном загрязнении // Почвоведение. 1986. № 4. С. 90–102.
- Головко Э. А., Переверзев В. Н., Алексеева Н. С.* Влияние органических веществ на азотный режим, состав микрофлоры торфяной почвы и урожай растений // Агрохимия. 1967. № 3. С. 60–69.
- Гришина Л. А., Орлов Д. С.* Система показателей гумусного состояния почв // Проблемы почвоведения (Советские почвоведы к 6-му Междунар. конгрессу почвоведов в Канаде). М.: Наука, 1978. С. 42–47.
- Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. 2009. СПб. 276 с.
- Добровольская Т. Г., Головченко А. В., Звягинцев Д. Г.* Анализ экологических факторов, ограничивающих деструкцию верхового торфа // Почвоведение. 2014. № 3. С. 304–316.
- Евдокимова Г. А., Зенкова И. В., Мозгова Н. П., Переверзев В. Н.* Почва и почвенная биота в условиях загрязнения фтором. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. 135 с.
- Евдокимова Г. А., Зенкова И. В., Переверзев В. Н.* Биодинамика процессов трансформации органического вещества в почвах Северной Фенноскандии. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. 154 с.
- Евдокимова Г. А., Зенкова И. В., Переверзев В. Н., Похилько А. А.* Комплексная экологическая оценка территории предстоящего строительства завода по сжижению газа Штокманского месторождения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. 49 с.
- Ершов В. В.* Фитогенное варьирование состава атмосферных выпадений и почвенных вод северотаежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения: Автореф. дис. ...канд. биол. наук (спец. 1.5.15). СПб., 2021. 26 с.

- Ершов В. В., Лукина Н. В., Орлова М. А., Исаева Л. Г., Смирнов В. Э., Горбачева Т. Т. Оценка динамики состава почвенных вод северотаежных лесов при снижении аэротехногенного загрязнения выбросами медно-никелевого комбината // Сибирский экологический журнал. 2019. № 1. С. 119–132.
- Ершов В. В., Сухарева Т. А., Иванова Е. А., Исаева Л. Г. Содержание углерода в различных компонентах северотаежных лесов Мурманской области. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022623848 от 27.12.2022 г.
- Жукова Л. А. Луговик извилистый // Биологическая флора Московской области. Вып. 5. М.: Изд-во Московского университета, 1980. С. 46–57.
- Замолодчиков Д. Г., Кобяков К. Н., Кокорин А. О., Алейников А. А., Шматков Н. М. Лес и климат. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2015. 40 с.
- Звягинцев Д. Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 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.
- Зенкова И. В., Боровичев Е. А., Королева Н. Е., Давыдов Д. А. Биота северотаежного соснового леса на иллювиально-гумусовом подзоле // Научные основы устойчивого управления лесами. М.: ЦЭПЛ, 2016. С. 31.
- Зенкова И. В., Рапопорт И. Б. Мониторинг разнообразия и численности дождевых червей в лесных подзолах Мурманской области // Материалы Всеросс. науч. конф. (с международ. участием), посвященной 85-летию организации Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника и 100-летию заповедной системы России «Вклад заповедной системы в сохранение биоразнообразия и устойчивое развитие». Тверь: ТГУ, 2017. С. 178–184.
- Зенкова И. В., Тиунов А. В., Розанова О. Л. Трофическая структура почвенной фауны в лесных экосистемах Кольской субарктики (по данным изотопного состава азота $\delta^{15}\text{N}$ и углерода $\delta^{13}\text{C}$) // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всеросс. научн. конф. с междунар. уч., посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения д. б. н., проф. В. В. Никонова, г. Апатиты, 16–22 июня 2019 г. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2019. С. 28–30.
- Иванова Е. А. Формирование и разложение древесного опада в сосновых лесах на северном пределе распространения при аэротехногенном загрязнении: Дисс. ... канд. биол. наук (спец. 06.03.02.). Москва–Апатиты, 2022. 114 с.

- 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.
- Иванова Е. А., Лукина Н. В., Смирнов В. Э., Исаева Л. Г.* Влияние воздушного промышленного загрязнения на химический состав опада хвои сосны в сосновых лесах на северном пределе распространения // *Лесоведение*. 2022. № 2. С. 157–171.
- Камаев И. О.* Население почвенной мезофауны в экологических градиентах северной тайги Восточной Фенноскандии: Дисс. ... канд. биол. наук (спец. 03.02.08). Москва, 2012. 240 с.
- Караванова Е. И.* Водорастворимые органические вещества: фракционный состав и возможности их сорбции твердой фазой лесных почв (обзор литературы) // *Почвоведение*. 2013. № 8. С. 924–936.
- Козловская Л. С.* Роль беспозвоночных в трансформации органического вещества болотных почв. Л.: Наука, 1976. 211 с.
- Константинов А. А., Волков К. А.* Структура и надземная фитомасса древостоев в верхней части горно-лесного пояса Вудъяврчорр, Хибинь // *Леса России и хозяйство в них*. 2022. № 2. С. 52–58.
- Корнейкова М. В.* Комплексы почвенных микроскопических грибов в долине р. Паз Кольского полуострова // *Материалы IV международной научной конференции «Современные проблемы загрязнения почв»*. Москва, МГУ, 27–31 мая 2013 г. М.: МГУ, 2013. С. 234–237.
- Корнейкова М. В.* Микроскопические грибы в воздухе и почве в зоне воздействия выбросов предприятий цветной металлургии // *Современная микология в России: материалы III Международного Микологического Форума*. Москва, 14–15 апреля 2015 г. М.: Национальная академия микологии, 2015. Т. 4. С. 209–213.
- Корнейкова М. В.* Сравнительный анализ численности и структуры комплексов микроскопических грибов в почвах тундры и тайги Кольского Севера // *Почвоведение*. 2018. № 1. С. 86–92.
- Корнейкова М. В., Евдокимова Г. А., Лебедева Е. В.* Комплексы потенциально патогенных микроскопических грибов в антропогенно загрязненных почвах Кольского Севера // *Микология и фитопатология*. 2012. Т. 46. № 5. С. 322–328.
- Корнейкова М. В., Лебедева Е. В.* Комплексы микроскопических грибов в лесных экосистемах в зоне воздействия выбросов медно-никелевых предприятий на Кольском полуострове // *Материалы IX Международной конфе-*

- ренции, посвященной 90-летию со дня рождения проф. Н. И. Федорова «Проблемы лесной фитопатологии и микологии». Минск — Москва — Петрозаводск, 19–24 октября 2015 г. Минск: БГТУ, 2015. С. 110–112.
- Корнейкова М. В., Никитин Д. А.* Качественные и количественные характеристики почвенного микробиома в зоне воздействия выбросов Кандалакшского алюминиевого завода // Почвоведение. 2021. № 6. С. 725–734.
- Корнейкова М. В., Никитин Д. А., Долгих А. В., Сошина А. С.* Микобиота почв города Апатиты (Мурманская область) // Микология и фитопатология. 2020. Т. 54. № 4. С. 264–277.
- Кравцова В. И., Лошкарева А. Р.* Исследование северной границы леса по космическим снимкам разного разрешения // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2010. № 6. С. 49–57.
- Криволицкий Д. А.* Некоторые закономерности зонального распределения панцирных клещей // Oikos. 1968. Т. 19. № 2. С. 339–344.
- Кузнецова А. И., Лукина Н. В., Орлова М. А., Тебенькова Д. Н.* Сравнительная оценка размеров выноса углерода с почвенными водами в таежных и хвойно-широколиственных лесах // Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / под ред. Н. В. Лукиной. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. С. 140–146.
- Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / под ред. В. А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. 200 с.
- Лихачев А. И.* Некоторые данные по биологии берез пушистой и бородавчатой // Ученые записки Орловского педагогического института. 1959. Т. 14. Вып. 5. С. 107–119.
- Лукина Н. В., Ершов В. В., Горбачева Т. Т., Орлова М. А., Исаева Л. Г., Тебенькова Д. Н.* Оценка состава почвенных вод северотаежных хвойных лесов фоновых территорий индустриально развитого региона // Почвоведение. 2018б. № 3. С. 284–296.
- 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 КНЦ РАН, 1998. 316 с.
- Лукина Н. В., Никонов В. В.* Состояние еловых биогеоценозов в условиях техногенного загрязнения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1993. 134 с.
- Лукина Н. В., Полянская Л. М., Орлова М. А.* Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 342 с.
- Лукина Н. В., Сухарева Т. А., Исаева Л. Г.* Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаежных лесах. М.: Наука, 2005. 245 с.

- Лукина Н. В., Тихонова Е. В., Шевченко Н. Е., Горнов А. В., Кузнецова А. И., Гераськина А. П., Смирнов В. Э., Горнова М. В., Ручинская Е. В., Анищенко Л. Н., Тебенькова Д. Н., Данилова М. А., Бахмет О. Н., Крышень А. М., Князева С. В., Шашков М. П., Быховец С. С., Чертов О. Г., Шанин В. Н. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / под ред. чл.-корр. РАН Н. В. Лукиной. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018а. 232 с.
- Лянгузова И. В., Примак П. А. Пространственное распределение запасов напочвенного покрова и лесной подстилки в средневозрастных сосновых лесах Кольского полуострова // Растительные ресурсы. 2019. Т. 55. № 4. С. 473–489.
- Лянгузова И. В., Примак П. А., Волкова Е. Н., Салихова Ф. С. Пространственное распределение запасов напочвенного покрова и лесной подстилки в фоновых и дефолирующих сосновых лесах Кольского полуострова // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56. № 4. С. 335–350.
- Манаков К. Н. Продуктивность и биологический круговорот в сосновых лесах // Биологическая продуктивность и обмен в лесных биогеоценозах Кольского полуострова. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1978. С. 3–18.
- Манаков К. Н. Элементы биологического круговорота на Полярном Севере. Л.: Наука, 1970. 160 с.
- Манаков К. Н., Никонов В. В. Биологический круговорот минеральных элементов и почвообразование в ельниках Крайнего Севера. Л.: Наука, 1981. 196 с.
- Манаков К. Н., Никонов В. В. Закономерности биологического круговорота минеральных элементов и почвообразование в биогеоценозах трех горнорастворительных поясов // Почвообразование в биогеоценозах Хибинских гор. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1979. С. 65–93.
- Манаков К. Н., Ушакова Г. И. Состав органического вещества почв Хибинского горного массива // Органическое вещество в почвах Кольского полуострова. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1975. С. 69–75.
- Маслов М. Н. Углерод, азот и фосфор в тундровых экосистемах Северной Фенноскандии: Дисс. ... канд. биол. наук (спец. 03.02.13). Москва, 2015. 233 с.
- Методика мониторинга лесов по международной программе ICP Forests. Москва, 2008. 46 с.
- Мирчинк Т. Г. Почвенная микология: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1988. 220 с.
- Моисеев П. А., Галимова А. А., Бубнов М. О., Дэви Н. М., Фомин В. В. Динамика древостоев и их продуктивности на верхнем пределе произрастания в Хибинах на фоне современных изменений климата // Экология. 2019. № 5. С. 341–355.
- Никитин Д. А., Лысак Л. В., Бадмадашиев Д. В., Холод С. С., Мергелов Н. С., Долгих А. В., Горячкин С. В. Биологическая активность

почв в условиях покровного оледенения в северной части архипелага Новая Земля // Почвоведение. 2021. № 10. С. 1207–1230.

Никонов В. В. Биогеохимические особенности минерального обмена между почвой и растительностью в ельнике воронично-черничном // Биологическая продуктивность и обмен в лесах Кольского полуострова. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1978. С. 18–36.

Никонов В. В. Почвообразование на северном пределе сосновых биогеоценозов. Л.: Наука, 1987. 141 с.

Никонов В. В., Зайцева И. В., Кобяков К. Н., Смирнов Д. Ю., Лукина Н. В. Коренные старовозрастные леса Мурманской области // Лесоведение. 2002. № 2. С. 15–23.

Никонов В. В., Лукина Н. В. Биогеохимические функции лесов на северном пределе распространения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1994. 315 с.

Никонов В. В., Лукина Н. В., Безель В. С., Бельский Е. А., Беспалова А. Ю., Головченко А. В., Горбачева Т. Т., Добровольская Т. Г., Добровольский В. В., Зукерт Н. В., Исаева Л. Г., Лапенис А. Г., Максимова И. А., Марфенина О. Е., Паникова А. Н., Пинский Д. Л., Полянская Л. М., Стайннес Е., Уткин А. И., Фронтасьева М. В., Цибульский В. В., Чернов И. Ю., Яценко-Хмелевская М. А. Рассеянные элементы в бореальных лесах / отв. ред. А. С. Исаев М.: Наука, 2004. 616 с.

Никонов В. В., Лукина Н. В., Полянская Л. М., Паникова А. Н. Особенности распро-

странения микроорганизмов в Al-Fe-гумусовых подзолах северотаежных еловых лесов: природные и техногенные аспекты // Микробиология. 2001. Т. 70. № 3. С. 319–328.

Никонов В. В., Манаков К. Н. Экологические и биогеохимические особенности северо-таежных лесов Кольского полуострова // Экология. 1979. № 5. С. 33–38.

Никонов В. В., Переверзев В. Н. Почвообразование в Кольской Субарктике. Л.: Наука, 1989. 168 с.

Новикова М. А. Особенности естественного возобновления березы в условиях Ленинградской и Тверской областей: Дисс. ... канд. с.-х. наук (спец. 06.03.02). Санкт-Петербург, 2016. 156 с.

Панцирные клещи: Морфология, развитие, филогения, экология, методы исследования, характеристика модельного вида *Nothrus palustris* C. L. Koch, 1839 / под ред. А. Д. Криволицкого. М.: Наука, 1995. 224 с.

Отчет о научно-исследовательской работе «Сравнительная оценка динамики поступления соединений углерода с атмосферными выпадениями и выноса с почвенными водами в хвойных лесах на северном пределе распространения на северо-западе Российской Федерации на основе данных многолетнего мониторинга». Апатиты, 2022. 92 с.

Переверзев В. Н. Биохимия гумуса и азота почв Кольского полуострова. Л.: Наука, 1987. 305 с.

Переверзев В. Н. Влияние окультуривания на изменение химического состава

- и агрохимических свойств болотных почв в Мурманской области // Почвоведение. 1963. № 5. С. 41–52.
- Переверзев В. Н.* Генетические особенности почв природных поясов Хибинских гор (Кольский полуостров) // Почвоведение. 2010. № 5. С. 548–557.
- Переверзев В. Н.* Лесные почвы Кольского полуострова. М.: Наука, 2004. 232 с.
- Переверзев В. Н.* Почвообразование на рыхлых и кристаллических породах в Северной Фенноскандии / под ред. Г. М. Кашулиной. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2013. 158 с.
- Переверзев В. Н.* Почвы тундр Северной Фенноскандии. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2001. 127 с.
- Переверзев В. Н.* Превращение растительных остатков в окультуренных почвах // Органическое вещество в почвах Кольского полуострова. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1975. С. 122–130.
- Переверзев В. Н.* Современные почвенные процессы в биогеоценозах Кольского полуострова. М.: Наука, 2006. 154 с.
- Переверзев В. Н., Алексеева Н. С.* Органическое вещество в почвах Кольского полуострова. Л., Наука, 1980. 227 с.
- 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.
- Раменская М. Л.* Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука, 1983. 215 с.
- Решетникова Т. В.* Лесные подстилки как депо биогенных элементов // Вестник КрасГАУ. 2011. № 12. С. 74–81.
- Руководство по комплексному мониторингу. Перевод с английского. Москва: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2013. 153 с.
- Рыбалов Л. Б.* Сравнительная характеристика населения дождевых червей в Карелии и полярно-альпийском ботаническом саду на Кольском п-ове // Современные экологические проблемы Севера. В 2-х ч. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. Ч. 2. С. 176–177.
- Семенов В. М., Тулина А. С., Семенова Н. А., Иванникова Л. А.* Гумификационные и негумификационные пути стабилизации органического вещества в почве (обзор) // Почвоведение. 2013. № 4. С. 393–393.
- Семко А. П.* Гидротермический режим почв лесной зоны Кольского полуострова. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1982. 144 с.
- Стебаев И. В.* Зоологическая характеристика тундровых почв // Зоологический журнал. 1962. Т. 41. № 6. С. 816–825.
- Степанов А. М., Черненькова Т. В., Верещагина Т. Н., Безукладова Ю. О.* Оценка влияния техногенных выбросов на почвенных беспозвоночных и растительный покров // Журнал общей биологии. 1991. Т. 52. № 5. С. 699–706.

- Стриганова Б. Р. Питание почвенных сапрофагов. М.: Наука, 1980. 283 с.
- Стриганова Б. Р. Почвенная фауна северного побережья Кольского п-ова // Экология почвенных беспозвоночных. М.: Наука, 1973. С. 75–83.
- Структурно-функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере / под ред. Г. В. Добровольского. М.: Наука, 2003. 363 с.
- Султанбаева Р. Р., Копчик Г. Н., Смирнова И. Е. Поступление и миграция растворимого органического углерода в почвах лесных экосистем подзоны широколиственно-хвойных лесов // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2015. № 4. С. 37–42.
- Сухарева Т. А. Сезонная динамика химического состава хвои ели сибирской на Кольском полуострове // Лесоведение 2014. № 2. С. 27–37.
- Сухарева Т. А. Особенности накопления химических элементов древесными растениями северотаежных лесов на фоновых и техногенно нарушенных территориях // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 438–441.
- Сухарева Т. А. Химический состав дикорастущих кустарничков северотаежных лесов на фоновых и техногенно нарушенных территориях // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. № 19. С. 351–356.
- Сухарева Т. А. Элементный состав зеленых мхов фоновых и техногенного нарушенных территорий // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2018. № 3 (172). С. 89–96.
- Сухарева Т. А., Ершов В. В., Иванова Е. А., Исаева Л. Г. Содержание азота в репрезентативных лесных экосистемах Мурманской области. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023622301 от 07.08.2023 г.
- Сухарева Т. А., Ершов В. В., Исаева Л. Г., Шкондин М. А. Оценка состояния северотаежных лесов в условиях снижения промышленных выбросов комбинатом «Североникель» // Цветные металлы. 2020. № 8. С. 33–41.
- Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Кренке А. Н., Тertiцкий Г. М. «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики Арктической биоты // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2 (30). С. 31–44.
- Тишков А. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Морозова О. В., Пузаченко А. Ю., Тertiцкий Г. М., Титова С. В. Биотически значимые тренды климата и динамика биоты Российской Арктики // Арктика: экология и экономика. 2019. № 1 (33). С. 71–87.
- Ушакова Г. И. Биогеохимическая миграция элементов и почвообразование в лесах Кольского п-ова. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. 150 с.
- Ушакова Г. И., Шмакова Н. Ю., Королева Н. Е. Влияние видового состава и структуры

- фитомассы растительных сообществ на накопление углерода в горных и предгорных биогеоценозах Хибин // Бюллетень МОИП. Отделение биологии. 2004. Т. 109. Вып. 2. С. 57–65.
- Федорец Н. Г., Бахмет О. Н.* Особенности формирования почв и почвенного покрова Карело-Кольского региона. Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 12. С. 39–51.
- Цветков В. Ф.* Сосняки Кольской лесорастительной области и ведение хозяйства в них. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 377 с.
- Цветков В. Ф., Семенов Б. А.* Сосняки Крайнего Севера. М.: Агропромиздат, 1985. 116 с.
- Цинзерлинг Ю. Д.* География растительного покрова Северо-Запада Европейской части СССР. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. 378 с.
- Черненко 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.
- Чернов Ю. И.* Некоторые особенности животного населения пятнистых тундр // Зоологический журнал. 1965. Т. 44. Вып. 4. С. 507–512.
- Чертов О. Г., Меньшикова Г. П.* Изменение лесных почв под действием кислых осадков // Известия АН СССР. Серия биологическая. 1983. № 6. С. 110–115.
- Шляков Р. Н.* Флора листостебельных мхов Хибинских гор. Мурманск: Мурманское книж. изд-во, 1961. 249 с.
- Шмакова Н. Ю., Ушакова Г. И., Костюк В. И.* Горно-тундровые сообщества Кольской Субарктики (эколого-физиологический аспект). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2008. 167 с.
- Штабровская И. М.* Температурный режим и биоразнообразие заполярных горных систем: выпускная квалиф. раб. (дисс.). Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2022. 139 с.
- Экологический атлас Мурманской области. Москва, Апатиты: Изд-во ИППЭС КНЦ РАН, 1999. 115 с.
- Ярмишко В. Т.* Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 1997. 210 с.
- Ярмишко В. Т.* Состояние и продуктивность растений напочвенного покрова сосновых лесов в условиях аэротехногенного загрязнения на Европейском Севере // Успехи современного естествознания. 2012. № 11-1. С. 18–21.
- Ярмишко В. Т., Баккал И. Ю., Борисова О. В., Горшков В. В., Катютин П. Н., Лянгузова И. В., Мазная Е. А., Ставрова Н. И., Ярмишко М. А.* Динамика лесных сообществ северо-запада России / отв. ред. В. Т. Ярмишко. СПб.: ВВМ, 2009. 276 с.
- Яшин И. М., Раскатов В. А., Шишов Л. Л.* Водная миграция химических элементов в почвенном покрове. М.: Изд-во МСХА, 2003. 316 с.

- Artemkina N. A., Orlova M. A., Lukina N. V.* Micromosaic structure of vegetation and variability of the chemical composition of l layer of the litter in dwarf shrub–green moss spruce forests of the northern taiga // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. T. 11. No. 7. C. 754–761.
- Bödeker I. T. M., Lindahl B. D., Olson Å., Clemmensen K. E.* Mycorrhizal and saprotrophic fungal guilds compete for the same organic substrates but affect decomposition differently // *Functional Ecology*. British Ecological Society. 2016. Vol. 30. Iss. 12. P. 1967–1978.
- Bolan N. S., Adriano D. C., Kunhikrishnan A., James T., McDowell R., Senesi N.* Dissolved organic matter: Biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils // *Advances in Agronomy*. 2011. Vol. 110. P. 1–75.
- Brække F. H.* Diagnostic concentrations of nutrient elements in Norway spruce and Scots pine needles (in Norwegian) // *Aktuelt Skogforsk*. 1994. Vol. 15. P. 1–11.
- Camino-Serrano M., Gielen B., Luysaert S., Ciais P., Vicca S., ..., & Janssens I.* Linking variability in soil solution dissolved organic carbon to climate, soil type, and vegetation type // *Global Biogeochemical Cycles*. 2014. Vol. 28. P. 497–509.
- Camino-Serrano M., Pannatier E. G., Vicca S., Luysaert S., Jonard M., ..., & Janssens I. A.* Trends in soil solution dissolved organic carbon (DOC) concentrations across European forests // *Biogeosciences*. 2016. Vol. 13. P. 5567–5585.
- Derome J., Lindroose 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. No. 2. P. 225–232.
- Domsch K. H., Gams W., Anderson T. H.* Compendium of Soil Fungi, 2nd ed. IHW-Verlag, Eching, 2007. 672 p.
- Erdman J. A., Gough L. P.* Variation in the element content of *Parmelia chlorochroa* from the Powder River Basin of Wyoming and Montana // *Briologist*. 1977. Vol. 80. No. 2. P. 292–303.
- Ermolaeva O. V., Shmakova N. Yu., Lukanova L. M.* On the growth of *Polytrichum*, *Pleurozium* and *Hylocomium* in the forest belt of the Khibiny Mountains // *Arctoa*. 2013. Vol. 22. P. 7–14.
- Ershov V. V., Lukina N. V., Danilova M. A., Isaeva L. G., Sukhareva T. A., Smirnov V. E.* Assessment of the composition of rain deposition in coniferous forests at the Northern tree line subject to air pollution // *Russian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 51. No. 4. P. 319–328.
- Ershov V. V., Lukina N. V., Orlova M. A., Zukert N. V.* Dynamics of snowmelt water composition in conifer forests exposed to airborne industrial pollution // *Russian Journal of Ecology*. 2016. Vol. 47. No. 1. P. 46–52.
- Ershov V., Sukhareva T., Isaeva L., Ivanova E., Urbanavichus G.* Pollution-induced changes in the composition of atmospheric deposition and soil waters in coniferous forests

- at the northern tree line // Sustainability 2022. Vol. 14. Iss. 23. Article ID: 15580.
- Evdokimova G. A., Korneykova M. V.* Microfungal communities in soil polluted with fluoride // Natural Science. 2010. Vol. 2. No. 9. P. 1022–1029.
- Evdokimova G. A., Korneykova M. V., Lebedeva E. V.* Complexes of potentially pathogenic microscopic fungi in anthropogenic polluted soils // Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering. 2013. Vol. 48. No. 7. P. 746–752.
- Iavorivska L., Boyer E. W., De Walle D. R.* Atmospheric deposition of organic carbon via precipitation // Atmospheric Environment. 2016. Vol. 146. P. 153–163.
- Index Fungorum. A nomenclatural database. 2023. URL: <http://www.indexfungorum.org> (дата обращения 23.03.2023)
- Kaiser K., Guggenberger G., Zech W.* Sorption of DOM and DOM fractions to forest soils // Geoderma. 1996. Vol. 74 (3–4). P. 281–303.
- Kalbitz K., Solinger S., Park J. H., Michalzik B., Matzner E.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review // Soil Science. 2000. Vol. 165 (4). P. 277–304.
- Kaviya N., Upadhyay V. K., Singh J., Khan A., Panwar M., Singh A. V.* Role of microorganisms in soil genesis and functions / In: A. Varma, D. Choudhary (Eds.) Mycorrhizosphere and Pedogenesis. Springer, Singapore, 2019. P. 25–52.
- Klich M. A.* Identification of common *Aspergillus* species. CBS Fungal Biodiversity Centre, Utrecht, 2002. 116 p.
- 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.
- 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.
- Pan Y., Wang Y., Xin J., Tang G., Song T., Wang Y., Li X., Wu F.* Study on dissolved organic carbon in precipitation in Northern China // Atmospheric Environment. 2010. Vol. 44. P. 2350–2357.
- 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 and Management. 1999. Vol. 114. P. 55–70.
- Raal A., Boikova T., Püssa T.* Content and dynamics of polyphenols in *Betula* spp. leaves naturally growing in Estonia // Records of Natural Products. 2015. Vol. 9. No. 1. P. 41–48.
- Redkina V. V., Shalygina R. R., Korneykova M. V.* Microfungi, algae and cyanobacteria in soils polluted with fluorine (Kola Peninsula, Russia) // Czech Polar Reports. 2020. Vol. 10. No. 1. P. 94–109.

- Schulze K., Borken W., Matzner E. Dynamics of dissolved organic ^{14}C in throughfall and soil solution of a Norway spruce forest // *Biogeochemistry*. 2011. Vol. 106. No. 3. P. 461–473.
- Seifert K., Morgan-Jones G., Gams W., Kendrick B. The genera of Hyphomycetes. CBS, Reus, Utrecht, 2011. 997 p.
- Shotbolt L., Bölker P., Ashmore M. Reconstructing temporal trends in heavy metal deposition: Assessing the value of herbarium moss samples // *Environmental Pollution*. 2007. Vol. 147. No. 1–3. P. 120–130.
- UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute for Forests Ecosystems, Eberswalde, Germany, 2020. URL: <http://www.icp-forests.org/Manual.htm> (дата обращения 25.05.2023).
- World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Fourth edition. International Union of Soil Sciences. (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.
- Zenkova I. V. Diversity of earthworms and ecology of the dominating species *Lumbricus rubellus* Hoffmeister, 1843 in the northern taiga podzols of the Murmansk region (*Oligochaeta*, *Lumbricidae*) // *Zoology in the Middle East Supplementum*. 2010. Vol. 2. P. 141–150.
- Zenkova I. V., Rapoport I. B. Species richness and high altitude distribution of earthworms in the Khibiny Mountain Massive (Murmansk Region) // *Advances in Earthworm Taxonomy VI (Annelida: Oligochaeta)*, Proc. XI International Oligochaete Taxonomy Meeting Palmeira de Faro, Portugal, 22-25 April, 2013. Heidelberg: Kasperek Verlag, 2014. P. 141–151.

REFERENCES

- Aksenova O. V., Bocharnikov V. N., Borovichev E. A., Danilov A. F., Denisov D. B., ... & Khimich Yu. R., *Priroda i korennoe naselenie Arktiki pod vliyaniem izmeneniya klimata i industrial'nogo osvoeniya: Murmanskaya oblast'* (Nature and indigenous population of the arctic under the influence of climate change and industrial development: Murmansk Region), Moscow: Izd. Dom "Grafit", 2020, 180 p.
- Alekseenko N. A., Borovichev E. A., Volkova A. A., Davydov D. A., Danilova A. D., ... & Khimich Yu. R., *Khibiny: priroda i chelovek* (Khibiny: nature and people), St. Petersburg: "Svoe izdatel'stvo", 2022, 308 p.
- Alekseev V. A., Lyanguzova I. V., Vliyanie zagryazneniya na izmenenie morfostruktury derev'ev (The effect of pollution on the changes of morphological structure of trees), In: *Lesnye ekosistemy i atmosfernoe zagryaznenie* (Forest ecosystems and aerial pollution), Leningrad: Nauka, 1990, pp. 87–94.

- Alekseeva N. S., Kislykh E. E., Pereverzev V. N., Sostav organicheskogo veshchestva tselinnykh i osvoennykh illyuvial'no-gumusovykh podzolov (Organic matter composition of virgin and developed illuvial-humus podzols), In: *Organicheskoe veshchestvo v pochvakh Kol'skogo poluostrova* (Organic matter in the soils of the Kola Peninsula), Apatity: Kol'skii filial AN SSSR, 1975, pp. 23–38.
- Artemkina N. A., Orlova M. A., Lukina N. V., Micromosaic structure of vegetation and variability of the chemical composition of l layer of the litter in dwarf shrub–green moss spruce forests of the northern taiga, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 11, No 7, P. 754–761.
- Atlas Murmanskoy oblasti* (Atlas of Murmansk region), Moscow: Izd-vo Glavnogo Upravleniya geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR, 1971, 44 p.
- Babenko A. B., *Kollemboly Arktiki: Struktura fauny i osobennosti khorologii: Diss. ... dokt. biol. nauk* (Springtails of the Arctic: The structure of the fauna and features of chorology. Candidate's biol. sci. thesis), Moscow, 2005, 382 p.
- Babenko A. B., Nogokhvostki (*Hexapoda, Collembola*) tundrovykh landshaftov Kol'skogo poluostrova (Springtails (*Hexapoda, Collembola*) of tundra landscapes of the Kola Peninsula), *Zoologicheskii zhurnal*, 2012, Vol. 91, No 4, pp. 411–427.
- Baranovskaya A. V., Levina V. I., Pereverzev V. N., *Sezonnaya dinamika pochvennykh protsessov na Polyarnom Severe* (Seasonal dynamics of soil processes in the Polar North), Leningrad: Nauka, 1969, 118 p.
- Belov N. P., Baranovskaya A. V., *Pochvy Murmanskoi oblasti* (Soils of the Murmansk region), Leningrad: Nauka, 1969, 147 p.
- Bioproduktsionnyi protsess v lesnykh ekosistemakh Severa* (Bioproduction process in forest ecosystems of the North), St. Petersburg: Nauka, 2001, 278 p.
- Bödeker I. T. M., Lindahl B. D., Olson Å., Clemmensen K. E., Mycorrhizal and saprotrophic fungal guilds compete for the same organic substrates but affect decomposition differently, *Functional Ecology. British Ecological Society*, 2016, Vol. 30, Iss. 12, pp. 1967–1978.
- Bolan N. S., Adriano D. C., Kunhikrishnan A., James T., McDowell R., Senesi N., Dissolved organic matter: Biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils, *Advances in Agronomy*, 2011, Vol. 110, pp. 1–75.
- Brække F. H., Diagnostic concentrations of nutrient elements in Norway spruce and Scots pine needles (in Norwegian), *Aktuelt Skogforsk*, 1994, Vol. 15, pp. 1–11.
- Camino-Serrano M., Gielen B., Luyssaert S., Ciais P., Vicca S., ..., & Janssens I., Linking variability in soil solution dissolved organic carbon to climate, soil type, and vegetation type, *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, Vol. 28, pp. 497–509.
- Camino-Serrano M., Pannatier E. G., Vicca S., Luyssaert S., Jonard M., ..., & Janssens I. A., Trends in soil solution dissolved organ-

- ic carbon (DOC) concentrations across European forests, *Biogeosciences*, 2016, Vol. 13, pp. 5567–5585.
- Chernen'kova T. V., Koroleva N. E., Borovichev E. A., Melekhin A. V., *Izmenenie organizatsii lesnogo pokrova makrosklonov k ozeru Imandra v usloviyakh tekhnogen-nogo 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.
- Chernov Yu. I., *Nekotorye osobennosti zhivot-nogo naseleniya pyatnistyh tundr* (Some features of the animal population of the spotted tundra), *Russian Journal of Zoology*, 1965, Vol. 44, No 4, pp. 507–512.
- Chertov O. G., Men'shikova G. P., *Izmenenie le-snyh pochv pod dejstviem kislyh osadkov*, *Izvestija AN SSSR. Serija biologija*, 1983, No 6, pp. 110–115.
- Derome J., Lindroose 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, No 2, pp. 225–232.
- Dinamika lesnyh soobshhestv Severo-Zapada Rossii* (Dynamics of forest communities in the North-West of Russia), 2009, St. Petersburg: OOO "BBM", 276 p.
- Domsch K. H., Gams W., Anderson T. H., *Compendium of Soil Fungi*, 2nd ed., IHW-Verlag, Eching, 2007, 672 p.
- Erdman J. A., Gough L. P., *Variation in the element content of *Parmelia chlorochroa* from the Powder River Basin of Wyoming and Montana*, *Briologist*, 1977, Vol. 80, No 2, pp. 292–303.
- Ermolaeva O. V., Shmakova N. Yu., Lukyanova L. M., *On the growth of *Polytrichum*, *Pleurozium* and *Hylocomium* in the forest belt of the Khibiny Mountains*, *Arctoa*, 2013, Vol. 22, pp. 7–14.
- Ershov V. V., *Fitogennoe var'irovanie sostava atmosferynyh vypadenij i pochvennyh vod severotaezhnyh lesov v usloviyah ajerrotehnogen-nogo zagryaznenija* (Phyto-genic variation of the composition of atmospheric precipitation and soil waters of the North taiga forests in conditions of aerotechnogenic pollution): avtoref. dis. ...kand. biol. nauk (1.5.15. Jekologija), St. Petersburg, 2021, 26 p.
- Ershov V. V., Lukina N. V., Orlova M. A., Zukert N. V., *Dynamics of snowmelt water composition in conifer forests exposed to airborne industrial pollution*, *Russian Journal of Ecology*, 2016, Vol. 47, No 1, pp. 46–52.
- Ershov V. V., Lukina N. V., Orlova M. A., Isaeva L. G., Smirnov V. E., Gorbacheva T. T., *Ocenka dinamiki sostava pochvennyh vod severotaezhnyh lesov pri snizhenii ajerrotehnogen-nogo zagryaznenija vybrosami medno-nikelevogo kombinata* (Assessment of Soil-Water Composition Dynamics in the North Taiga Forests upon the Reduction of Industrial Air Pollution by Emis-

- sions of a Copper—Nickel Smelter), *Sibirskij jekologicheskij zhurnal*, 2019, No 1, pp. 119–132.
- Ershov V. V., Lukina N. V., Danilova M. A., Isaeva L. G., Sukhareva T. A., Smirnov V. E., Assessment of the composition of rain deposition in coniferous forests at the Northern tree line subject to air pollution, *Russian Journal of Ecology*, 2020, Vol. 51, No 4, pp. 319–328.
- Ershov V., Sukhareva T., Isaeva L., Ivanova E., Urbanavichus G., Pollution-induced changes in the composition of atmospheric deposition and soil waters in coniferous forests at the northern tree line, *Sustainability*, 2022, Vol. 14, Iss. 23, Article ID: 15580.
- Ershov V. V., Sukhareva T. A., Ivanova E. A., Isaeva L. G., *Soderzhanie ugleroda v razlichnykh komponentah severotaezhnykh lesov Murmanskoy oblasti* (Carbon content in various components of the North Taiga forests of the Murmansk region), *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannykh № 2022623848 ot 27.12.2022*.
- Evdokimova G. A., Korneykova M. V., Microfungal communities in soil polluted with fluoride, *Natural Science*, 2010, Vol. 2, No 9, pp. 1022–1029.
- Evdokimova G. A., Zenkova I. V., Pereverzev V. N., *Biodinamika protsessov transformatsii organicheskogo veshchestva v pochvakh Severnoi Fennoskandii* (Biodynamics of organic matter transformation in soils of Northern Fennoscandia), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 2002, 154 p.
- Evdokimova G. A., Zenkova I. V., Mozgova N. P., Pereverzev V. N., *Pochva i pochvennaya biota v usloviyakh zagryazneniya ftorom* (Soil and soil biota under fluorine pollution), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 2005, 135 p.
- Evdokimova G. A., Zenkova I. V., Pereverzev V. N., Pokhil'ko A. A., *Kompleksnaya ekologicheskaya otsenka territorii predstoyashchego stroitel'stva zavoda po szhizheniyu gaza Shtokmanskogo mestorozhdeniya* (Comprehensive environmental assessment of the territory of the upcoming construction of a gas liquefaction plant at the Shtokmanskoye field), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 2006, 49 p.
- Evdokimova G. A., Korneykova M. V., Lebedeva E. V., Complexes of potentially pathogenic microscopic fungi in anthropogenic polluted soils, *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2013, Vol. 48, No 7, pp. 746–752.
- Fedorec N. G., Bahmet O. N., *Osobennosti formirovaniya pochv i pochvennogo pokrova Karelo-Kol'skogo regiona* (Features of soil formation and soil cover of the Karelo-Kola region). *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*, 2016, No 12, pp. 39–51.
- Golovko E. A., Pereverzev V. N., Alekseeva N. S., *Vliyanie organicheskikh veshchestv na azotnyi rezhim, sostav mikroflory torfya-*

- noi pochvy i urozhai rastenii (The influence of organic substances on the nitrogen regime, the composition of microflora of peat soil and plant yield), *Agrokhimiya*, 1967, No 3, pp. 60–69.
- Grishina L. A., Orlov D. S., Sistema pokazatelei gumusnogo sostoyaniya pochv (The system of indicators of the humus state of soils), In: *Problemy pochvovedeniya* (Sovetskie pochvovedy k 6-mu Mezhdunar. kongressu pochvovedov v Kanade) (Problems of soil science (Soviet soil scientists for the 6th International Congress of Soil Scientists in Canada)), Moscow: Nauka, 1978, pp. 42–47.
- Iavorivska L., Boyer E. W., De Walle D. R., Atmospheric deposition of organic carbon via precipitation, *Atmospheric Environment*, 2016, Vol. 146, pp. 153–163.
- Index Fungorum. A nomenclatural database*, 2023, URL: <http://www.indexfungorum.org> (accessed on 23.03.2023)
- Ivanova E. A., Lukina N. V., Danilova M. A., Artemkina N. A., Smirnov V. E., Ershov V. V., Isaeva L. G., Vliyanie aerotekhnogennogo 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., *Formirovanie i razlozhenie drevesnogo opada v sosnovykh lesakh na severnom predele rasprostraneniya pri aerotekhnogennom zagryaznenii: Diss. ... kand. biol. nauk* (Formation and decomposition of tree litter in pine forests at the northern distribution limit under aerotechnogenic pollution. Candidate's biol. sci. thesis), Moscow-Apatity, 2022, 114 p.
- Ivanova E. A., Lukina N. V., Smirnov V. E., Isaeva L. G., Effect of industrial airborne pollution on the chemical composition of pine needle litterfall at the northern distribution limit of pine forests, *Contemporary Problems of Ecology*, 2022, Vol. 15, No 7, pp. 851–862.
- Jekologicheskij atlas Murmanskoy oblasti* (Ecological Atlas of the Murmansk region). Moscow, Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 1999, 115 p.
- Kaiser K., Guggenberger G., Zech W., Sorption of DOM and DOM fractions to forest soils, *Geoderma*, 1996, Vol. 74 (3–4), pp. 281–303.
- Kalbitz K., Solinger S., Park J. H., Michalzik B., Matzner E., Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review, *Soil Science*, 2000, Vol. 165 (4), pp. 277–304.
- Kamaev I. O., *Naselenie pochvennoi mezofauny v ekologicheskikh gradientakh Severnoi taigi Vostochnoi Fennoskandii: Dis. ... kand. biol. nauk* (Population of the soil mesofauna in the ecological gradients of the Northern taiga in Eastern Fennoscandia), Candidate's biol. sci. thesis, Moscow, 2012, 240 p.
- Karavanova E. I., *Dissolved organic matter: fractional composition and sorbability by the soil solid phase* (review of literature), *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No 8, pp. 833–844.

- Klich M. A., *Identification of common Aspergillus species*, CBS Fungal Biodiversity Centre, Utrecht, 2002, 116 p.
- Konstantinov A. A., Volkov K. A., Структура и надземная фитомасса дровостоев в верхней части горно-лесного пояса Вуд"яврчорр, Хибинь (Structure and aboveground phytomass of stands in the upper part of the mountain-forest belt of Woodyavrchorr, Khibiny), *Lesa Rossii i khozyaistvo v nikh*, 2022, No 2, pp. 52–58.
- Korneykova M. V., Комплексы почвенных микроскопических грибов в долине р. Paz Kol'skogo полуострова (Complexes of soil microscopic fungi in the valley of the river. Groove of the Kola Peninsula), *Materialy IV mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Sovremennye problemy zagryazneniya pochv"* (Proc. IV International Scientific Conference "Modern Problems of Soil Pollution"), Moscow, MGU, 27–31 May 2013, Moscow: MGU, 2013, pp. 234–237.
- Korneykova M. V., Микроскопические грибы в воздухе и почве в зоне воздействия выбросов предприятия цветной металлургии (Microscopic fungi in the air and soil in the area affected by emissions from non-ferrous metallurgy enterprises), *Sovremennaya mikologiya v Rossii, materialy III Mezhdunarodnogo Mikologicheskogo Foruma* (Modern Mycology in Russia: proc. III International Mycological Forum), Moscow, 14–15 April 2015, Moscow: Natsional'naya akademiya mikologii, 2015, Vol. 4, pp. 209–213.
- Korneykova M. V., Sravnitel'nyi analiz chislenosti i struktury kompleksov mikroskopicheskikh gribov v pochvakh tundry i taigi Kol'skogo Severa (Comparative analysis of the abundance and structure of complexes of microscopic fungi in the soils of the tundra and taiga of the Kola North), *Pochvovedenie*, 2018, No 1, pp. 86–92.
- Korneykova M. V., Lebedeva E. V., Комплексы микроскопических грибов в лесных экосистемах в зоне воздействия выбросов медно-никелевых предприятий на Колском полуострове (Complexes of microscopic fungi in the forest ecosystem impact zone emissions copper-nickel enterprises on the Kola Peninsula), *Problems of Forest Phytopathology and Mycology*, Materials of the IX International Conference in commemoration of 90th anniversary of Professor Nikolai Ilyich Fedorov, Minsk–Moscow–Petrozavodsk, 19–24 October, 2015, Minsk: BSTU, 2015, pp. 110–112.
- Korneykova M. V., Nikitin D. A., Qualitative and quantitative characteristics of the soil microbiome in the impact zone of the Kandalaksha aluminum smelter, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No 6, pp. 897–906.
- Korneykova M. V., Evdokimova G. A., Lebedeva E. V., Комплексы потенциально патогенных микроскопических грибов в антропогенно загрязненных почвах Колского Севера (The complexes of potentially pathogenic microscopic fungi in anthropogenic polluted soils of Kola

- North), *Mikologiya i fitopatologiya*, 2012, Vol. 46, No 5, pp. 322–328.
- Korneykova M. V., Nikitin D. A., Dolgikh A. V., Soshina A. S., Mikobiota pochv goroda Apatity (Murmanskaya oblast') (Soil mycobiota of the Apatity city (Murmansk region)), *Mikologiya i fitopatologiya*, 2020, Vol. 54, No 4, pp. 264–277.
- 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.
- Kravtsova V. I., Loshkareva A. R., Issledovanie severnoi granitsy lesa po kosmicheskim snimkam raznogo razresheniya (Study of the northern forest line using space imagery of different resolutions), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2010, No 6, pp. 49–57.
- Krivolutsky D. A., Some regularities in the zonal distribution of oribatoid mites, *Oikos*, 1968, Vol. 19, No 2, pp. 339–344.
- Kuznetsova A. I., Lukina N. V., Orlova M. A., Teben'kova D. N., Sravnitel'naya otsenka razmerov vynosa ugleroda s pochvennymi vodami v taezhnykh i khvoino-shirokolistvennykh lesakh (Comparative assessment of the amount of carbon removal with soil water in taiga and coniferous-broad-leaved forests), In: *Akkumulyatsiya ugleroda v lesnykh pochvakh i suksessionnyi status lesov* (Carbon accumulation in forest soils and succession status of forests), Moscow: KMK, 2018, pp. 140–146.
- Lesnye ekosistemy i atmosfernoe zagryaznenie* (Forest Ecosystems and Air Pollution), Leningrad: Nauka, 1990, 200 p.
- Likhachev A. I., Nekotorye dannye po biologii berez pushistoi i borodavchatoi (Some data on the biology of downy and warty birches), *Uchenye zapiski Orlovskogo pedagogicheskogo instituta*, 1959, Vol. 14, Iss. 5, pp. 107–119.
- Lukina N. V., Nikonov V. V., *Sostoyanie elovykh biogeotsenozov v usloviyakh tekhnogenogo zagryazneniya* (The state of spruce biogeocenoses under conditions of technogenic pollution), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 1993, 134 p.
- Lukina N. V., Nikonov V. V., *Biogekhimicheskie tsikly v lesakh Severa v usloviyakh aerotekhnogenogo zagryazneniya* (Biogeochemical cycles in the Northern forest ecosystems subjected to air pollution), Apatity: Izd-vo KNTs 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 KNTsRAN, 1998, 316 p.
- Lukina N. V., Sukhareva T. A., Isaeva L. G., *Tekhnogennye digressii i vosstanovitel'nye suksessii v severotaezhnykh lesakh* (Technogenic Digressions and Restorative Successions in Northern Taiga Forests), Moscow: Nauka, 2005, 245 p.

- Lukina N. V., Polyanskaya L. M., Orlova M. A., *Pitatel'nyi rezhim pochv severotaezhnykh lesov* (Nutrient regime of soils of the north taiga forests), Moscow: Nauka, 2008, 342 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.
- Lukina N. V., Tikhonova E. V., Shevchenko N. E., Gornov A. V., Kuznetsova A. I., Geras'kina A. P., Smirnov V. E., Gornova M. V., Ruchinskaya E. V., Anishchenko L. N., Tebenkova D. N., Danilova M. A., Bakhmet O. N., Kryshen' A. M., Knyazeva S. V., Shashkov M. P., Bykhovets S. S., Chertov O. G., Shanin V. N., *Akkumulyatsiya ugleroda v lesnykh pochvakh i suksessionnyi status lesov* (Carbon accumulation in forest soils and succession status of forests), Moscow: Tovarichestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2018a, 232 p.
- Lukina N. V., Ershov V. V., Gorbacheva T. T., Orlova M. A., Isaeva L. G., Tebenkova D. N., Assessment of soil water composition in the northern taiga coniferous forests of background territories in the industrially developed region, *Eurasian Soil Science*, 2018b, Vol. 51, No 3, pp. 285–297.
- Lyanguzova I. V., Primak P. A., Prostranstvennoe raspredelenie zapasov napochvennogo pokrova i lesnoi podstilki v srednevozrastnykh sosnovykh lesakh Kol'skogo poluostrova (Distribution of ground vegetation and forest litter stock in middle-aged pine forests of the Kola Peninsula), *Rastitel'nye resursy*, 2019, Vol. 55, No 4, pp. 473–489.
- Lyanguzova I. V., Primak P. A., Volkova E. N., Salihova F. S., Prostranstvennoe raspredelenie zapasov napochvennogo pokrova i lesnoj podstilki v fonovykh i defoliirujushchih sosnovykh lesakh Kol'skogo poluostrova (Spatial distribution of ground cover and forest litter reserves in background and defoliating pine forests of the Kola Peninsula), *Rastitel'nye resursy*, 2020, Vol. 56, No 4, pp. 335–350.
- Manakov K. N., *Elementy biologicheskogo krugovorota na Polyarnom Severe* (Elements of the biological cycle in the Polar North), Leningrad: Nauka, 1970, 160 p.
- Manakov K. N., Produktivnost' i biologicheskii krugovorot v sosnovykh lesakh (Productivity and biological cycle in pine forests), In: *Biologicheskaya produktivnost' i obmen v lesakh Kol'skogo poluostrova* (Biological productivity and exchange in the forests of the Kola Peninsula), Apatity: Kol'skii filial AN SSSR, 1978, pp. 3–18.
- Manakov K. N., Nikonov V. V., Zakonomernosti biologicheskogo krugovorota mineral'nykh elementov i pochvoobrazovanie v biogeotsenozakh trekh gornorastitel'nykh poyasov (Patterns of the biological circulation of mineral elements and soil formation in the biogeocenoses of three mountain-vegetation

- belts), In: *Pochvoobrazovanie v biogeotse-
nozakh Khibinskikh gor* (Soil formation in
the biogeocenoses of the Khibiny Moun-
tains), Apatity: Kol'skii filial AN SSSR,
1979, pp. 65–93.
- 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.
- Manakov K. N., Ushakova G. I., *Sostav organ-
icheskogo veshchestva pochv Khibin-
skogo gornogo massiva* (Composition of
organic matter in the soils of the Khib-
iny mountain range), In: *Organicheskoe
veshchestvo v pochvakh Kol'skogo poluos-
trova* (Organic matter in the soils of the
Kola Peninsula), Apatity: Kol'skii filial AN
SSSR, 1975, pp. 69–75.
- Maslov M. N., *Uglerod, azot i fosfor v tundrovyykh
ekosistemakh Severnoi Fennoskandii: Diss.
... kand. biol. nauk* (Carbon, nitrogen and
phosphorus in the tundra ecosystems of
Northern Fennoscandia. Candidate's biol.
sci. thesis), Moscow, 2015, 233 p.
- Metodika monitoringa lesov po mezhdunarod-
noi programme ICP Forests* (Forest moni-
toring methodology under the interna-
tional program ICP Forests), Moscow,
2008, 46 p.
- Mirchink T. G., *Pochvennaya mikologiya:
Uchebnik* (Soil Mycology: Textbook), Mos-
cow: Izd-vo MGU, 1988, 220 p.
- Moiseev P. A., Galimova A. A., Bubnov M. O.,
Devi N. M., Fomin V. V., *Tree stands and
their productivity dynamics at the up-
per growing limit in Khibiny on the
background of modern climate changes*,
Russian Journal of Ecology, 2019, Vol. 50,
No 5, pp. 431–444.
- Nikonov V. V., *Biogeokhimicheskie osoben-
nosti mineral'nogo obmena mezhdru
pochvoi i rastitel'nost'yu v el'nike vo-
ronichno-chernichnom* (Biogeochemical
features of mineral exchange between
soil and vegetation in the crowberry-bil-
berry spruce forest), In: *Biologicheskaya
produktivnost' i obmen v lesakh Kol'skogo
poluostrova* (Biological productivity and
exchange in the forests of the Kola Pen-
insula), Apatity: Kol'skii filial AN SSSR,
1978, pp. 18–36.
- Nikonov V. V., *Pochvoobrazovanie na severnom
predele sosnovykh biogeotsenozov* (Soil
formation at the northern limit of pine
biogeocenoses), Leninrad: Nauka, 1987,
141 p.
- Nikonov V. V., Lukina N. V., *Biogeokhimiche-
skie funktsii lesov na severnom predele
rasprostraneniya* (Biogeochemical func-
tions of forests at the northern limit of
distribution), Apatity: Izd-vo KNTs RAN,
1994, 315 p.
- Nikonov V. V., Manakov K. N., *Ekologicheskie i
biogeokhimicheskie osobennosti severo-
taezhnykh lesov Kol'skogo poluostrova*
(Ecological and biogeochemical fea-
tures of the northern taiga forests of the

- Kola Peninsula), *Ekologiya*, 1979, No 5, pp. 33–38.
- Nikonov V. V., Pereverzev V. N., *Pochvoobrazovanie v Kol'skoi Subarktike* (Soil formation in the Kola Subarctic), Leninrad: Nauka, 1989, 168 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 microorganism's distribution in Al-Fe-humus podzols under northern taiga spruce forests: natural and technogenic aspects), *Mikrobiologiya*, 2001, Vol. 70, No 3, pp. 319–328.
- Nikonov V. V., Zaitseva I. V., Kobayakov K. N., Smirnov D. Yu., Lukina N. V., *Korennye starovozrastnye lesa Murmanskoi oblasti* (Primary old-growth forests of the Murmansk region), *Lesovedenie*, 2002, No 2, pp. 15–23.
- Nikonov V. V., Lukina N. V., Bezel' V. S., Bel'skii E. A., Besspalova A. Yu., Golovchenko A. V., Gorbacheva T. T., Dobrovolskaya T. G., Dobrovolskii V. V., Zuckert N. V., Isaeva L. G., Lapenis A. G., Maksimova I. A., Marfenina O. E., Panikova A. N., Pinskiy D. L., Polyanskaya L. M., Stainnes E., Utkin A. I., Frontas'eva M. V., Tsibul'skii V. V., Chernov I. Yu., Yatsenko-Khmelevskaya M. A., *Rasseyannye elementy v boreal'nykh lesakh* (Scattered elements in boreal forests), Moscow: Nauka, 2004, 616 p.
- Novikova M. A., *Osobennosti estestvennogo vozobnovleniya berezy v usloviyakh Leningradskoi i Tverskoi oblastei: Diss. ... kand. s.-kh. nauk* (Features of the natural renewal of birch in the conditions of the Leningrad and Tver regions. Candidate's agricult. sci. thesis), St. Petersburg, 2016, 156 p.
- Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote "Sravnitel'naja ocenka dinamiki postupleniya soedinenij ugleroda s atmosferynymi vypadenijami i vynosa s pochvennymi vodami v hvoynyh lesah na severnom predele rasprostraneniya na severo-zapade Rossijskoj Federacii na osnove dannyh mnogoletnego monitoring"* (Report on the research work "Comparative assessment of the dynamics of carbon compounds intake from atmospheric precipitation and removal from soil waters in coniferous forests at the northern limit of distribution in the north-west of the Russian Federation based on long-term monitoring data"), Apatity, 2022, 92 p.
- Pan Y., Wang Y., Xin J., Tang G., Song T., Wang Y., Li X., Wu F., *Study on dissolved organic carbon in precipitation in Northern China*, *Atmospheric Environment*, 2010, Vol. 44, pp. 2350–2357.
- Pantsirnye kleshchi: Morfologiya, razvitie, filogeniya, ekologiya, metody issledovaniya, kharakteristika model'nogo vida Nothrus palustris C. L. Koch, 1839* (Shell mites: Morphology, development, phylogeny, ecology, research methods, characteris-

- tics of the model species *Nothrus palustris* C. L. Koch, 1839), Moscow: Nauka, 1995, 224 p.
- 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 and Management*, 1999, Vol. 114, pp. 55–70.
- Pereverzev V. N., Vliyanie okul'turivaniya na izmenenie khimicheskogo sostava i agrokhimicheskikh svoistv bolotnykh pochv v Murmanskoi oblasti (The influence of cultivation on the change in the chemical composition and agrochemical properties of bog soils in the Murmansk region), *Pochvovedenie*, 1963, No 5, pp. 41–52.
- Pereverzev V. N., Prevrashchenie rastitel'nykh ostatkov v okul'turenykh pochvakh (Transformation of plant residues in cultivated soils), In: *Organicheskoe veshchestvo v pochvakh Kol'skogo poluostrova* (Organic matter in the soils of the Kola Peninsula), Apatity: Kol'skii filial AN SSSR, 1975, pp. 122–130.
- Pereverzev V. N., *Biokhimiya gumusa i azota pochv Kol'skogo poluostrova* (Biochemistry of humus and nitrogen in soils of the Kola Peninsula), Leninrad: Nauka, 1987, 305 p.
- Pereverzev V. N., *Pochvy tundr Severnoi Fennoskandii* (Tundra soils of the Northern Fennoscandia), Apatity: Izd. KNTs RAN, 2001, 127 p.
- Pereverzev V. N., *Lesnye pochvy Kol'skogo poluostrova* (Forest soils of the Kola Peninsula), Moscow: Nauka, 2004, 232 p.
- Pereverzev V. N., *Sovremennye pochvennye protsessy v biogeotsenozakh Kol'skogo poluostrova* (Actual soil processes in the biogeocenoses of the Kola Peninsula), Moscow: Nauka, 2006, 154 p.
- Pereverzev V. N., Genetic features of soils in altitudinal natural zones of the Khibiny Mountains, *Eurasian Soil Science*, 2010, Vol. 43, No 5, pp. 509–518.
- Pereverzev V. N., *Pochvoobrazovanie na ryklykh i kristallicheskikh porodakh v Severnoi Fennoskandii* (Soil formation on loose and crystalline rocks in Northern Fennoscandia), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 2013, 158 p.
- Pereverzev V. N., Alekseeva N. S., *Organicheskoe veshchestvo v pochvakh Kol'skogo poluostrova* (Soil organic matter of the Kola Peninsula), Leningrad: Nauka, 1980, 227 p.
- 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.
- Raal A., Boikova T., Püssa T., Content and dynamics of polyphenols in *Betula* spp. leaves naturally growing in Estonia, *Re-*

- cords of Natural Products*, 2015, Vol. 9, No 1, pp. 41–48.
- Ramenskaya M. L., *Analiz flory Murmanskoi oblasti i Karelii* (Analysis of the flora of the Murmansk region and Karelia), Leningrad: Nauka, 1983, 215 p.
- Redkina V. V., Shalygina R. R., Korneykova M. V., Microfungi, algae and cyanobacteria in soils polluted with fluorine (Kola Peninsula, Russia), *Czech Polar Reports*, 2020, Vol. 10, No 1, pp. 94–109.
- Reshetnikova T. V., Lesnye podstilki kak depo biogenykh elementov (Forest litters as the biogenic element depo), *Vestnik KrasGAU*, 2011, No 12, pp. 74–81.
- Rukovodstvo po kompleksnomu monitoringu* (Integrated Monitoring Guide), Moscow: FGBU "IGKE Rosgidrometa i RAN", 2013, 153 p.
- Rybalov L. B., Sravnitel'naya kharakteristika naseleniya dozhdevykh chervei v Karelii i polyarno-al'piiskom botanicheskom sadu na Kol'skom p-ove (Comparative characteristics of the population of earthworms in Karelia and the polar-alpine botanical garden on the Kola Peninsula), In: *Sovremennye ekologicheskie problemy Severa. V 2-kh ch.* (Actual ecological problems of the North. In 2 parts), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 2006, Part. 2, pp. 176–177.
- Schulze K., Borken W., Matzner E., Dynamics of dissolved organic ^{14}C in throughfall and soil solution of a Norway spruce forest, *Biogeochemistry*, 2011, Vol. 106, No 3, pp. 461–473.
- Seifert K., Morgan-Jones G., Gams W., Kendrick B., *The genera of Hyphomycetes*, CBS, Reus, Utrecht, 2011.
- Semko A. P., *Gidrotermicheskii rezhim pochv lesnoi zony Kol'skogo poluoostrova* (Hydrothermal regime of soils in the forest zone of the Kola Peninsula), Apatity: Kol'skii filial AN SSSR, 1982, 144 p.
- Shlyakov R. N., *Flora listostebel'nykh mkhov Khibinskikh gor* (Flora of mosses in the Khibiny Mountains), Murmansk: Murmanskoe knizh. izd-vo, 1961, 249 p.
- Shmakova N. Yu., Ushakova G. I., Kostyuk V. I., *Gorno-tundrovye soobshchestva Kol'skoi Subarktiki (ekologo-fiziologicheskii aspekt)* (Mountain-tundra communities of the Kola Subarctic (ecological and physiological aspect)), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 2008, 167 p.
- Shotbolt L., Bükler P., Ashmore M., Reconstructing temporal trends in heavy metal deposition: Assessing the value of herbarium moss samples, *Environmental Pollution*, 2007, Vol. 147, No 1–3, pp. 120–130.
- Shtabrovskaya I. M., *Temperaturnyj rezhim i bioraznoobrazie zapolyarnykh gornyh sistem: VKR (aspir. diss.)* (Temperature regime and biodiversity of polar mountain systems: Graduation work), Apatity: FRC KSC RAS, 2022, 139 p.
- Stebaev I. V., Zoologicheskaya kharakteristika tundrovyyh pochv (Zoological characteristics of tundra soils), *Russian Journal of Zoology*, 1962, Vol. 41, No 6, pp. 816–825.

- Stepanov A. M., Chernen'kova T. V., Vereshchagina T. N., Bezukladova Yu. O., Otsenka vliyaniya tekhnogennykh vybrosov na pochvennykh bespozvonochnykh i rastitel'nyi pokrov (Assessment of the impact of technogenic emissions on soil invertebrates and vegetation), *Zhurnal Obshchei Biologii*, 1991, Vol. 52, No 5, pp. 699–706.
- Striganova B. R., Pochvennaya fauna severnogo poberezh'ya Kol'skogo p-ova (Soil fauna of the northern coast of the Kola Peninsula), In: *Ekologiya pochvennykh bespozvonochnykh* (Ecology of soil invertebrates), Moscow: Nauka, 1973, pp. 75–83.
- Striganova B. R., *Pitanie pochvennykh saprofitov* (Nutrition of soil saprophages), Moscow: Nauka, 1980, 283 p.
- Strukturno-funktsional'naya rol' pochv i pochvennoi bioty v biosfere* (Structural and functional role of soils and soil biota in the biosphere), Moscow: Nauka, 2003, 363 p.
- Sukhareva T. A., Sezonnaya dinamika himicheskogo sostava hvoi eli sibirskoy na Kol'skom poluostrove (Seasonal dynamics of the chemical composition of spruce needles on the Kola Peninsula), *Lesovedenie*, 2014, No 2, pp. 27–37.
- Sukhareva T. A., Osobennosti nakopleniya khimicheskikh elementov drevesnymi rasteniyami severotaezhnykh lesov na fonovykh i tekhnogenno narushennykh territoriyakh (Features of the chemical elements accumulation by woody plants of northern taiga forests in the background and technogenically disturbed territories), *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN*, 2017, No 14, pp. 438–441.
- Sukhareva T. A., Elementnyi sostav zelenykh mkhov fonovykh i tekhnogenno narushennykh territorii (The green moss elemental composition of the background and industrially disturbed areas), *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No 3 (172), pp. 89–96.
- Sukhareva T. A., Khimicheskii sostav dikorastushchikh kustarnichkov severotaezhnykh lesov na fonovykh i tekhnogenno narushennykh territoriyakh (Chemical composition of leaves of wild shrubs of northern taiga forests in the background and technogenically disturbed territories), *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN*, 2022, No 19, pp. 351–356.
- Sukhareva T. A., Ershov V. V., Ivanova E. A., Isaeva L. G., *Soderzhanie azota v reprezentativnykh jekosistemah Murmanskoy oblasti* (Nitrogen content in representative ecosystems Murmansk region), Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy daniy No 2023622301 ot 07.08.2023.
- Sukhareva T. A., Ershov V. V., Isaeva L. G., Shkondin M. A., Otsenka sostoyaniya severotaezhnykh lesov v usloviyakh snizheniya promyshlennykh vybrosov kombinatom "Severonikel" (Analyzing the

- status of northern taiga forests amid reduced Severonikel emissions), *Tsvetnye metally*, 2020, No 8, pp. 33–41.
- Sultanbaeva R. R., Koptsik G. N., Smirnova I. E., Postuplenie i migratsiya rastvorimogo organicheskogo ugleroda v pochvakh lesnykh ekosistem podzony shirokolistvenno-khvoinykh lesov (Input and migration of dissolved organic carbon in soils of forest ecosystems of deciduous-coniferous forests subzone), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 17: Pochvovedenie*, 2015, No 4, pp. 37–42.
- Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Vaisfel'd M. A., Glazov P. M., Krenke A. N., Tertitskii G. M., “Pozelenenie” tundry kak draiver sovremennoi dinamiki Arkticheskoi bioty (“The greening” of the tundra as a driver of the modern dynamics of Arctic biota), *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2018, No 2 (30), pp. 31–44.
- Tishkov A. A., Vaisfel'd M. A., Glazov P. M., Morozova O. V., Puzachenko A. Yu., Tertitskii G. M., Titova S. V., Bioticheski znachimye trendy klimata i dinamika bioty Rossiiskoi Arktiki (Biotic significant climate trends and biota dynamics of the Russian Arctic), *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2019, No 1 (33), pp. 71–87.
- Tsinzerling Yu. D., *Geografiya rastitel'nogo pokrova Severo-Zapada Evropeiskoi chasti SSSR* (Vegetation geography of the Northwest of the European part of the USSR), Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1934, 378 p.
- Tsvetkov V. F., Semenov B. A., *Sosnyaki Krainego Severa* (Pine forests of the Far North), Moscow: Agropromizdat, 1985, 116 p.
- Tsvetkov V. F., *Sosnyaki Kol'skoi lesorastitel'noi oblasti i vedenie khozyaistva v nikh* (Pine forests of the Kola forest region and management in them), Arkhangelsk: Izd-vo AGTU, 2002, 377 p.
- UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre: *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*, Thünen Institute for Forests Ecosystems, Eberswalde, Germany, 2020, URL: <http://www.icp-forests.org/Manual.htm> (accessed on 25.05.2023).
- Ushakova G. I., *Biogeokhimicheskaya migratsiya elementov i pochvoobrazovanie v lesakh Kol'skogo p-ova* (Biogeochemical migration of elements and soil formation in the forests of the Kola Peninsula), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 1997, 150 p.
- Ushakova G. I., Shmakova N. Yu., Koroleva N. E., Vliyanie vidovogo sostava i struktury fitomassy rastitel'nykh soobshchestv na nakoplenie ugleroda v gornyykh i predgornyykh biogeocenozach Hibin (Influence of Species Composition and Phytomass Structure of Plant Communities on Carbon Accumulation in Mountain and Foothill Biogeocenoses of the Khibiny), *Byulleten' MOIP. Otdelenie biologii*, 2004, Vol. 109, Iss. 2, pp. 57–65.

- Val'kova S. A., *Kompleksy bespozvonochnykh-sapروفagov v lesnykh ekosistemakh Kol'skogo Severa: Diss. ... kand. biol. nauk* (Saprophagous Invertebrate Complexes in Forest Ecosystems of the Kola North. Candidate's biol. sci. thesis), Apatity, 2009, 129 p.
- Vetchinnikova L. V., *Bereza: voprosy izmenchivosti (morfo-fiziologicheskie i biokhimicheskie aspekty)* (Birch: variability problems (morpho-physiological and biochemical aspects)), Moscow: Nauka, 2004, 183 p.
- Vorob'eva I. G., Naumova A. N., *Intensivnost' protsessy destruktivnoy razrukhny 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.
- Vozdeistvie metallurgicheskikh proizvodstv na lesnye ekosistemy Kol'skogo poluostrova* (The impact of metallurgical industries on the forest ecosystems of the Kola Peninsula), St. Petersburg: Rodniki, 1995, 251 p.
- Vliyaniye promyshlennogo atmosfernogo zagryazneniya na sosnovyye lesa Kol'skogo poluostrova* (The influence of industrial air pollution on pine forests of Kola Peninsula), Leningrad: Botanicheskii institut im. V. L. Komarova AN SSSR, 1990, 195 p.
- Vtorova V. N., *Krugovorot veshchestv nekotorykh tipov severotaezhnykh elovykh lesov pri tekhnogennom zagryaznenii* (Substances cycle in some types of northern taiga spruce forests under technogenic pollution), *Pochvovedenie*, 1986, No 4, pp. 90–102.
- World reference base for soil resources 2014*, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. World soil resources reports 106, FAO, Rome, 192 p.
- Yakovlev B. A., *Klimat Murmanskoy oblasti* (The climate of the Murmansk region), Murmansk: Murmanskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1961, 180 p.
- Yarmishko V. T., *Sosna obyknovennaya i atmosfernoye zagryaznenie na Evropeiskom Severe* (Scots pine and aerial pollution in the European North), St. Petersburg: Izdvo NII khimii SPbGU, 1997, 210 p.
- Yarmishko V. T., Bakkal I. Yu., Borisova O. V., Gorshkov V. V., Katyutin P. N., Lyanguzova I. V., Maznaya E. A., Stavrova N. I., Yarmishko M. A., *Dinamika lesnykh soobshchestv severo-zapada Rossii* (Dynamics of forest communities of North-West Russia) St. Petersburg: VVM, 2009, 276 p.
- Yarmishko V. T., *Sostoyaniye i produktivnost' rasteniy napochvennogo pokrova sosnovykh lesov v usloviyakh aerotekhnogennogo zagryazneniya na Evropeiskom Severe* (State and productivity of overground plants in pine forests under aero-industrial contamination on European North), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2012, No 11-1, pp. 18–21.
- Yashin I. M., Raskatov V. A., Shishov L. L., *Vodnaya migratsiya khimicheskikh elementov*

- v pochvennom pokrove* (Water migration of chemical elements in the soil), Moscow: Izd-vo MSKhA, 2003, 316 p.
- Zamolodchikov D. G., Kobayakov K. N., Kokorin A. O., Aleinikov A. A., Shmatkov N. M., *Les i klimat* (Forest and climate), Moscow: Vsemirnyi fond dikoi prirody (WWF), 2015, 40 p.
- Zenkova I. V., *Struktura soobshchestv bespozvonochnykh zivotnykh 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.
- Zenkova I. V., Diversity of earthworms and ecology of the dominating species *Lumbricus rubellus* Hoffmeister, 1843 in the northern taiga podzols of the Murmansk region (*Oligochaeta, Lumbricidae*), *Zoology in the Middle East Supplementum*, 2010, Vol. 2, pp. 141–150.
- Zenkova I. V., Rapoport I. B., Species richness and high altitude distribution of earthworms in the Khibiny Mountain Massive (Murmansk Region), *Advances in Earthworm Taxonomy VI (Annelida: Oligochaeta)*, Proc. XI International Oligochaete Taxonomy Meeting, Palmeira de Faro, Portugal, 22–25 April, 2013, Heidelberg: Kasperek Verlag, 2014, pp. 141–151.
- Zenkova I. V., Rapoport I. B., Monitoring raznoobraziya i chislennosti dozhdevykh chervei v lesnykh podzolakh Murmanskoj oblasti (Monitoring of diversity and abundance of earthworms in forest podzols of the Murmansk region), *Materialy Vseross. nauch. konf. (s mezhdunarod. uchastiem), posvyashchennoi 85-letiyu organizatsii Tsentral'no-Lesnogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika i 100-letiyu zapovednoi sistemy Rossii "Vklad zapovednoi sistemy v sokhranenie bioraznoobraziya i ustoichivoe razvitie"* (Proc. All-Russian conference with International Participation dedicated to the 85th anniversary of the organization of the Central Forest State Natural Biosphere Reserve and the 100th anniversary of the reserve system of Russia "Contribution of the Protected System to Biodiversity Conservation and Sustainable Development"), Zapovednyi, 14–17 August, 2017, Tver: TGU, 2017, pp. 178–184.
- Zenkova I. V., Val'kova S. A., Mollyuski tselinykh i tekhnogenno-transformirovannykh podzolov Kol'skogo Severa (Mollusks of virgin and technogenically transformed podzols of the Kola North), *Zoologicheskii zhurnal*, 2008, Vol. 87, No 3, pp. 259–267.
- Zenkova I. V., Borovichev E. A., Koroleva N. E., Davydov D. A., Biota severotaezhnogo osnovogo lesa na illyuvial'no-gumusovom podzole (Biota of the northern taiga pine forest on illuvial-humus podzol), *Nauchnye osnovy ustoichivogo upravleniya lesami, Mater. II. Vseross. konf. s mezhdunar. uchastiem* (Scientific Foundations of Sustainable Forest Management, Proc. II All-Russian Conference with International Participation), Moscow: CEPF RAS, 2016, p. 31.

- Zenkova I. V., Tiunov A. V., Rozanova O. L., Troficheskaya struktura pochvennoi fauny v lesnykh ekosistemakh Kol'skoi subarktiki (po dannym izotopnogo sostava azota $\delta^{15}\text{N}$ i ugleroda $\delta^{13}\text{C}$) (Trophic structure of the soil fauna in the subarctic forest ecosystems of the Kola Peninsula (based on the isotopic composition of nitrogen $\delta^{15}\text{N}$ and carbon $\delta^{13}\text{C}$)), *Ekologicheskie problemy severnykh regionov i puti ikh resheniya*, Tezisy dokladov VII Vseross. nauchn. konf. s mezhdunar. uch., posvyashchennoi 30-letiyu Instituta problem promyshlennoi ekologii Severa FITs KNTs RAN i 75-letiyu so dnya rozhdeniya d. b. n., prof. V. V. Nikonova (Ecological Problems of the Northern Regions and Ways to Their Solution, Abstracts VII All-Russian Scientific Conference with International Participation, dedicated to the 30th anniversary of the Institute of North Industrial Ecology Problems and to the 75th anniversary celebration of Professor V. V. Nikonov), Apatity, 16-22 June, 2019, Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 2019, pp. 28–30.
- Zhukova L. A., *Lugovik izvilistyi (Meadow winding)*, In: *Biologicheskaya flora Moskovskoi oblasti*. Vyp. 5. (Biological flora of the Moscow region. Issue. 5), Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1980, pp. 46–57.
- Zvyagintsev D. G., *Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii (Methods of soil microbiology and biochemistry)*, Moscow: Izd-vo MGU, 1991, 304 p.

CARBON AND NITROGEN CONTENT AND RESERVES IN TERRESTRIAL ECOSYSTEMS OF THE MURMANSK REGION

T. A. Sukhareva^{1*}, E. A. Ivanova¹, V. V. Ershov¹, I. V. Zenkova¹,
M. V. Korneykova^{1,2}, I. M. Shtabrovskaya¹, A. S. Soshina¹

¹ Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
Akademgorodok, 14a, Apatity, Murmansk region, 184209, Russia

² Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, 117198, Russia

* E-mail: t.sukhareva@ksc.ru

Received: 10.04.2023

Revised: 15.06.2023

Accepted: 18.06.2023

The article provides an overview of own and literature data on phytomass reserves, carbon and nitrogen content, diversity of soil fauna and mycobiota in terrestrial ecosystems of the Murmansk region under conditions of combined action of natural and anthropogenic factors. The environmental factors determining the functioning of ecosystems, including the regulation of carbon cycles, are considered. It is shown that in representative spruce and pine forests, the concentrations and precipitation of carbon compounds from the atmosphere and its removal from soil waters are higher in the subcrown spaces than in the intercrown spaces. In soil waters, there is a decrease in carbon removal with the depth of the soil profile. The podzols are characterized by a bimodal distribution of humus over the soil profile with maxima in the organogenic and illuvial horizons. The carbon content in the organogenic horizon of the soils of spruce and pine forests varies from 12 to 54%, nitrogen — from 4.7 to 18.7 g/kg. The main carbon reserves in the organogenic horizon of forest soils are concentrated in the sub-crown spaces and reach 27–34 t/ha. Carbon reserves in the meter layer of soil (mineral horizons) are 47–60 t/ha. The phytomass reserves of the North taiga forests are characterized by low values (12–188 t/ha). Significant reserves of plant organic matter of the North Taiga forests are concentrated in the ground cover. The carbon content in the assimilating organs (leaves/needles, shoots) of plants of the North Taiga forests varies from 35 to 73%, nitrogen — from 5.4 to 23.6 g/kg. The rate of decomposition of plant residues and carbon loss during the decomposition of the fall of evergreen plants in spruce forests is higher than in pine forests, as are the indicators of the number of soil macrofauna. The podzols of the North Taiga forests correspond to the predominance of secondary destroyers of plant litter — humifiers of earthworms and mixophages (wireworms, litter mollusks) and the absence of calcifilic groups of mineralizers (woodlice, bipedal millipedes). 122 species of microscopic fungi have been isolated from the soils of the Murmansk region. Species of pp. *Penicillium* and *Umbelopsis* were dominant in terms of abundance in the background soil, in anthropogenically altered soils — species of pp. *Aureobasidium*, *Penicillium*, *Trichocladium*, *Trichoderma* and *Umbelopsis*.

Key words: North taiga forests, tundra, phytomass, soils, carbon, nitrogen, soil fauna and mycobiota, natural and anthropogenic factors, Arctic

Рецензент: к. б. н., м. н. с. Кузнецова А. И.