

*На правах рукописи*



**ЕРШОВ ВЯЧЕСЛАВ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

**ФИТОГЕННОЕ ВАРЬИРОВАНИЕ СОСТАВА  
АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ И ПОЧВЕННЫХ ВОД  
СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ЛЕСОВ В УСЛОВИЯХ  
АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

1.5.15. Экология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
биологических наук по специальности

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Институте проблем промышленной экологии Севера – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН  
**Лукина Наталья Васильевна**

Официальные оппоненты: **Копчик Галина Николаевна**

доктор биологических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», профессор.

**Солодовников Антон Николаевич**

кандидат биологических наук, Институт леса – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук", научный сотрудник.

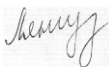
Ведущая организация: Институт биологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук».

Защита состоится «10» ноября 2021 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.002.02 при Ботаническом институте им. В.Л. Комарова Российской академии наук по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 2. Тел. (812) 342-54-42, факс (812) 372-54-43, адрес электронной почты: [dissovet.24100202@binran.ru](mailto:dissovet.24100202@binran.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ботанического института им. В.Л. Комарова Российской академии наук <https://www.binran.ru/dissertatsionnyye-sovety/dissovet-02/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
доктор биологических наук



Лянгузова Ирина Владимировна

## **Общая характеристика работы**

### **Введение**

Согласно современным представлениям, в настоящее время лесные экосистемы подвергаются множественному стрессу, представляющему собой комбинацию влияния изменения климата, рубок, пожаров, вспышек массового размножения насекомых, грибных и бактериальных болезней, а также воздушного промышленного загрязнения. Влияние последнего фактора наиболее ярко выражено в индустриально развитых регионах Севера.

Оценка влияния аэротехногенного загрязнения на леса остается актуальной проблемой, несмотря на многочисленные исследования. Одной из наименее изученных аспектов данной проблемы в лесах, формирующихся в условиях высокого уровня воздушного загрязнения, является состав атмосферных выпадений и почвенных вод - неотъемлемых компонентов лесных биогеоценозов. Показано, что количество и качество атмосферных осадков оказывает существенное влияние на состояние лесных экосистем, в том числе на состав почвенных вод [Кислотные осадки, 1990; Лукина, Никонов, 1996]. Почвенный раствор является наиболее активной фазой почвы. Именно в нем происходит подавляющее большинство всех химических реакций, протекающих в почве. Почвенные воды способствуют перераспределению веществ по генетическому профилю почвы и их выносу в сопредельные среды [Раудина, 2015]. Исследования химического состава атмосферных выпадений и почвенных вод необходимы для оценки биогеохимических циклов элементов. В условиях воздушного промышленного загрязнения происходит существенная трансформация состава атмосферных выпадений и почвенных вод, которая заключается в закономерных изменениях кислотности и концентраций загрязняющих веществ и элементов питания на разных стадиях дигрессии. Для оценки критических нагрузок на леса, прогнозирования динамики биогеохимических циклов и развития систем поддержки принятия решений, направленных на повышение устойчивости лесов в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов, необходимы оценки изменений состава и свойств атмосферных выпадений и почвенных вод с учетом внутри- и

межбиогеоценотической мозаичности лесного покрова на основе многолетних данных.

На Севере России мощными источниками выбросов в атмосферу являются предприятия цветной металлургии. Более восьмидесяти лет лесные экосистемы Мурманской области подвергаются интенсивному воздействию воздушного промышленного загрязнения, которое распространяется на значительные расстояния. Одним из крупнейших предприятий в России является АО "Кольская горно-металлургическая компания". Основным источником загрязнения воздуха выступает комбинат «Североникель», расположенный в центральной части Мурманской области в городе Мончегорске. Загрязняющими веществами, оказывающими влияние на функционирование лесных биогеоценозов, являются кислотообразующие соединения серы, а также тяжелые металлы (никель, медь, кобальт, свинец, кадмий, хром) [Лукина, Никонов 1996; Kashulina et al., 2014]. Загрязнение оказывает, как прямое, непосредственное (фумигация, выщелачивание элементов питания), так и опосредованное (изменение состава и свойств почв, снижение устойчивости к болезням и т.д.) влияние на леса [Смит, 1985; Лукина и др., 2008; Waldner et al., 2015].

Изучению химического состава атмосферных выпадений и почвенных вод, а также оценкам влияния аэротехногенного загрязнения на их состав, посвящен ряд отечественных и зарубежных работ [Лукина, Никонов 1996; Паткин, 2000; Fisher et al., 2007; Даувальтер и др., 2009; Derome, Lukina, 2010; Lorenz and Becher, 2012; De Vries et al., 2014; Kashulina et al., 2014; Pascaud et al., 2016; Maas and Grennfelt, 2016; Kowalska et. al., 2016 и др.]. Результаты этих исследований показывают, что химический состав атмосферных выпадений и почвенных вод значительно изменяется после контакта с пологом леса. На формирование состава атмосферных и почвенных вод существенное влияние оказывает воздушное промышленное загрязнение. Общая характеристика состава атмосферных выпадений и почвенных вод, отобранных в отдельные годы или в течение нескольких лет в северотаежных лесах Кольского полуострова, подверженных воздушному загрязнению и находящихся на различном удалении от источника загрязнения, дается в ряде научных работ [Лукина, Никонов, 1996;

Кислотные осадки, 1999; Раткин, 2000; Копчик и др., 2007; Лукина и др., 2008; Даувальтер и др., 2009; Kashulina et al., 2014 и др.]. Однако, для прогнозирования динамики биогеохимических циклов элементов и функционирования лесов необходимы оценки пространственного варьирования состава и свойств атмосферных выпадений и почвенных вод с учетом многолетних изменений. Также актуальной задачей является сравнение среднего многолетнего уровня выпадений и выноса с почвенными водами загрязняющих веществ на конкретных объектах с уровнем, рассматриваемым как критический для лесных экосистем. При этом важно выявление наиболее чувствительных типов хвойных лесов и элементов их мозаики для ранней диагностики состояния лесов.

Изучению химического состава атмосферных выпадений и почвенных вод и их влияния на лесные экосистемы посвящено множество зарубежных работ. Однако в зарубежных исследованиях не уделяется внимание влиянию микромозаичной структуры биогеоценоза (подкروновые и межкroновые пространства) на состав атмосферных выпадений и почвенных вод. В этих исследованиях выделяют осадки и почвенные воды под пологом леса и на безлесных территориях. При этом состав атмосферных и почвенных вод многими зарубежными исследователями часто изучается уже в многолетней динамике, что позволяет обнаружить долговременные тренды в изменениях их состава. В России многолетние (более 20 лет) режимные наблюдения за составом атмосферных выпадений и почвенных вод в лесах, подверженных атмосферному загрязнению, проводятся на Кольском полуострове. Химический состав атмосферных выпадений и почвенных вод является информативной матрицей для оценки негативного воздействия поллютантов на лесные экосистемы. Одним из активно развивающихся подходов к такой оценке является концепция критических нагрузок. Однако в оценке критических нагрузок на леса в зарубежных работах не учитывается их микромозаичная структура.

**Цель данной работы:** дать оценку меж- и внутрибиогеоценотического варьирования химического состава атмосферных и почвенных вод в хвойных лесах на северном пределе распространения в условиях аэротехногенного загрязнения на основе данных многолетнего мониторинга.

### **Задачи:**

1. Исследовать меж- и внутрибиогеоценотическое варьирование состава атмосферных выпадений в сосновых и еловых лесах на северном пределе распространения при различных уровнях аэротехногенного загрязнения.

2. Исследовать меж- и внутрибиогеоценотическое варьирование состава почвенных вод в сосновых и еловых лесах на северном пределе распространения при различных уровнях аэротехногенного загрязнения

3. Оценить отклонения от критических пределов индикаторов состава атмосферных и почвенных вод северотаежных лесов с выявлением наиболее чувствительных элементов мозаики лесного биогеоценотического покрова.

### **Научная новизна.**

Впервые дана оценка внутри- и межбиогеоценотического варьирования состава атмосферных выпадений и почвенных вод в лесах на северном пределе распространения в фоновой, буферной и импактной зонах с учетом многолетних данных (более 20 лет). Более высокие концентрации элементов в атмосферных выпадениях и почвенных водах под кронами древесных растений, как в еловых, так и сосновых лесах, объясняется смывом и выщелачиванием из крон древесных растений, опада и почв. Более высокие концентрации элементов в атмосферных выпадениях и почвенных водах в еловых лесах по сравнению с сосновыми связано с различиями в строении крон доминирующих лесобразующих древесных растений.

Впервые в 20-летней динамике дана оценка отклонений от критических пределов индикаторов химического состава атмосферных выпадений и почвенных вод в лесах на северном пределе распространения как в фоновых условиях, так и буферной и импактной зонах, формирующихся под влиянием аэротехногенного загрязнения. Показано, что для ранней диагностики состояния северотаежных лесов наиболее информативным элементом мозаики являются подкروновые пространства ели в еловых лесах.

Впервые на основе данных многолетнего мониторинга установлено возрастание концентраций никеля в атмосферных и почвенных водах в фоновых условиях в последние годы (с 2013 года), что объясняется более интенсивным переносом никеля в

составе микроскопических частиц с аэрозолями на дальние расстояния.

### **Практическая значимость.**

Проведённые многолетние исследования состава атмосферных выпадений и почвенных вод в северотаежных лесах наиболее распространенных типов с учетом внутри- и межбиогеоценотического варьирования вносят важный вклад в совершенствование системы мониторинга лесов и систем поддержки принятия решений в целях устойчивого управления лесами Севера, формирующимися в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов. Результаты проведенных исследований создают основу для верификации моделей, нацеленных на прогнозирование динамики лесных биогеоценозов в условиях комбинированного влияния природных и антропогенных факторов.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Обоснованная и достоверная оценка динамики состава атмосферных выпадений и почвенных вод в таежных лесах может быть дана с учетом внутри- и межбиогеоценотической мозаичности лесного покрова.

2. Достоверная оценка превышения критических уровней загрязняющих веществ в атмосферных выпадениях и почвенных водах в таежных лесах может быть проведена с учетом как меж-, так и внутрибиогеоценотической мозаичности лесного покрова.

**Личный вклад соискателя.** Полевые исследования, сбор материала, анализ и обобщение полученных результатов осуществлены соискателем лично или при непосредственном участии.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на XV Межрегиональной научно-практической конференции (Апатиты 2012 г.), научной конференции «Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана» (Сыктывкар 2013 г.), XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем» (Киров 2014 г.), IV, V и VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения»

(Апатиты 2012, 2014, 2016 г.), XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностика живых систем» (Киров 2015 г.), Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН (Апатиты 2017). XV Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии (Апатиты 2018 г.). VIII всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов» (Волгоград 2018 г.), XVI Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии (Апатиты 2019 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 17 печатных работ, из них 9 включены в текущий перечень ВАК, из которых 3 находятся в системе цитирования Scopus и 4 - в Web of Science.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 188 страницах машинописного текста, состоит из введения, 6 глав, 29 иллюстраций, 56 таблиц, 9 выводов и 1 приложения. Список цитируемой литературы включает 157 источников, в том числе 58 иностранных работ.

**Благодарности.** Выражаю искреннюю благодарность своему научному руководителю Лукиной Н. В. за постоянную помощь, ценные советы и замечания, терпение, понимание. Особую благодарность Исаевой Л. Г. за возможность находиться в этом удивительном мире науки, ценные замечания и поддержку. Огромная благодарность всем сотрудникам лаборатории наземных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера за помощь в полевых и аналитических работах. Отдельные слова благодарности отцу, матери и брату за веру в меня и поддержку во всех моих начинаниях.

## **Глава 1. Современное состояние проблемы**

В обзоре литературы по теме диссертации рассматриваются разработанные зарубежными и отечественными авторами различные оценки влияния воздушного промышленного загрязнения на лесные экосистемы и их компоненты [Евдокимова и



др, 1984; Раткин, 2000; Derome, Lukina, 2010; Lorenz and Becher, 2012; Цветков, Цветков 2012; De Vries et al., 2014; Maas and Grennfelt, 2016 и др.]. Особое внимание уделяется изучению изменения состава атмосферных выпадений и почвенных вод [Никонов, Лукина, 2000; Копчик, 2004; Herrmann et. al., 2006; Даувальтер и др., 2009; Vanguelovaetal., 2010; Kashulina et al., 2014; Kowalska et. al., 2016 и др.]. В обзоре рассматривается состав атмосферных выпадений и почвенных вод с учетом концепции критических нагрузок [Башкин и др., 2005; Копчик и др., 2008; Lorenz, Granke, 2009; Verstraeten et al., 2012 и др.].

Проведенный анализ позволяет заключить, что получены ценные и с научной, и практической точки зрения результаты по составу атмосферных выпадений и почвенных вод, однако в этих исследованиях недостаточно учтена внутри- и межбиогеоценотическая мозаичность лесов на северном пределе распространения. Для прогнозирования динамики биогеохимических циклов в лесных экосистемах необходимы оценки многолетних изменений состава и свойств атмосферных выпадений и почвенных вод.

## **Глава 2. Объекты и методы исследования**

Полевые исследования были проведены на 6 площадях постоянного наблюдения (ППН) Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН. Объектами исследования послужили ельники кустарничково-зеленомошные и сосняки лишайниково-кустарничковые. ППН расположены на различном удалении от источника загрязнения комбината «Североникель»: импактная зона находится в 7–10 км, буферная зона в 28–31 км, фоновая зона в более чем 150 км. в юго-западном направлении от источника загрязнения [Лукина, Никонов, 1996].

Каждая ППН оборудована осадкоприемниками для дождевых выпадений (5 – под кронами, 5 – между крон) и лизиметрами гравитационного типа (12 шт. на ППН), расположенными на разной глубине в соответствии с генетическими горизонтами почв (A0, E+B, BC/C) и с учетом мозаичной структуры биогеоценоза (под кронами и между крон) [Лукина, Никонов, 1998].

Снег отбирался в конце марта – начале апреля в период максимального снегонакопления. Дождевые выпадения и почвенные воды отбирались ежемесячно с начала мая по начало октября.

Образцы вод фильтровали через бумажный фильтр «синяя лента». Показатель pH определяли потенциометрически, металлы методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии,  $\text{SO}_4^{2-}$  – методом ионообменной хроматографии, С – хроматометрией, либо перманганатометрией, в зависимости от концентрации. Аммонийный азот определяли по методу Къельдаля (Mahera et al., 2002). Для характеристики состава снеговых вод использовались данные за период с 1991/95 по 2017 гг., для дождевых вод с 1999 по 2017 гг., для почвенных вод с 1991/1995 по 2017 гг. С 2000 года по данным АО «Кольская ГМК» наблюдается снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу [[www.nornik.ru](http://www.nornik.ru)].

Кислотонейтрализующую способность (ANC) рассчитывали, как разность суммы основных катионов и анионов минеральных кислот в ммоль/л. Для почвенных вод рассчитывали молярные отношения  $(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K}) / \text{Al}$ , а также концентрацию минерального азота как сумму концентраций нитратного и аммиачного азота.

Расчет описательной статистики проводили в Microsoft Excel 2007. В той же программе эмпирически подбирали тренды для оценки многолетней динамики состава атмосферных выпадений и почвенных вод. Для сравнения состава атмосферных выпадений и почвенных вод на разных пробных площадях, а также для сопоставления состава подкроновых и межкroновых выпадений использовали  $\nu$ -критерий. Расчет  $\nu$ -критерия выполнялся в среде статистического программирования R [Husson et al., 2017; R CoreTeam. 2017].

### **Глава 3. Состав снеговых вод в хвойных лесах в условиях аэротехногенного загрязнения**

Химический состав снеговых вод в еловых и сосновых лесах на фоновой территории характеризуется значительной внутри- и межбиогеоценоотической пространственной изменчивостью. Концентрации соединений элементов достоверно выше в снеговых

водах подкроновых пространств по сравнению с межкроновыми, что объясняется смывом и выщелачиванием соединений этих элементов из растительных тканей деревьев (табл. 1). Размеры выпадений соединений элементов не имели выраженных внутрибиогеоценотических различий, что связано с одной стороны, с повышенными концентрациями элементов под кронами деревьев, а с другой, с более высоким количеством осадков в межкроновых пространствах.

Воздушное промышленное загрязнение оказывает существенное влияние на формирование состава снеговых выпадений. В снеговых водах в буферной и импактной зонах концентрации и выпадения многих элементов выше в подкроновых пространствах по сравнению с межкроновыми. Актуальная кислотность под кронами выше, чем в межкроновых пространствах, как на фоновой территории, так и в буферной и импактной зонах. В снеговых водах в буферной и импактной зонах содержание тяжелых металлов до 100 раз и сульфатов до 3 раз выше по сравнению с фоновой территорией (табл. 1). При этом содержание элементов питания в этих зонах увеличивается, по сравнению с фоном, что связано с их вымыванием и выщелачиванием из крон деревьев. Также возрастает актуальная кислотность, что более ярко выражено в подкроновых пространствах.

Многолетняя динамика концентраций и выпадений тяжелых металлов и сульфатов в снеговых водах отличается значительной вариабельностью во всех зонах, как в подкроновых, так и в межкроновых пространствах. На фоновой территории многолетняя динамика демонстрирует увеличение концентраций никеля в последние годы (с 2013 года), что может объясняться возрастанием содержания поллютантов в аэрозолях, распространяющихся на значительные расстояния.

Таблица 1. Концентрация соединений элементов в снеге в еловых лесах за период 1995-2017 гг., мг/л, ANC в ммоль/л

Параметры	Среднее			Ст. отклонение			$p^*$		
	Ф	Б	И	Ф	Б	И	Ф	Б	И
Межкروновые пространства									
ANC	0,01	0,01	0,001	0,01	0,02	0,02	0,13	0,21	0,21
pH	4,82	4,69	4,65	0,61	0,46	0,50	0,06	0,80	0,30
Ca	0,25	0,26	0,39	0,12	0,16	0,24	0,02	0,04	0,00
Mg	0,06	0,07	0,10	0,04	0,04	0,06	0,00	0,13	0,00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,47	0,70	1,47	0,25	0,28	0,68	0,00	0,00	0,00
Cu	0,001	0,02	0,06	0,004	0,01	0,08	0,00	0,01	0,00
Ni	0,001	0,02	0,12	0,004	0,01	0,13	0,00	0,00	0,00
C	1,21	1,51	1,46	0,93	1,64	1,25	0,28	0,48	0,69
Подкروновые пространства									
ANC	0,02	0,005	-0,01	0,02	0,03	0,02	0,00	0,94	0,00
pH	4,71	4,48	4,48	0,54	0,43	0,53	0,00	0,50	0,43
Ca	0,34	0,50	0,60	0,17	0,31	0,38	0,00	0,73	0,00
Mg	0,09	0,15	0,17	0,05	0,09	0,13	0,00	0,74	0,00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,93	1,88	2,85	0,49	1,54	1,64	0,00	0,07	0,00
Cu	0,002	0,02	0,13	0,002	0,04	0,15	0,00	0,01	0,00
Ni	0,003	0,02	0,27	0,01	0,02	0,25	0,00	0,00	0,00
C	2,47	2,36	2,04	1,94	2,00	1,70	0,05	0,12	0,95

*Примечание: здесь, а также в таблицах 2 и 3 Ф – фоновая территория, Б – Буферная зона, И – импактная зона. Показатель достоверности различий  $p$  рассчитан на основе  $v$ -test в среде R.*

В буферной зоне в еловых и сосновых лесах наблюдаются тенденции к снижению концентраций тяжелых металлов и сульфатов, что наиболее выражено в межкроновых пространствах, это может свидетельствовать о снижении выпадений загрязняющих веществ в составе крупных частиц вблизи комбината. В импактной зоне в ельнике и сосняке наблюдается значительная вариабельность, значимых трендов не обнаружено.

Концентрации элементов в подкроновых пространствах еловых лесов во всех зонах, как правило выше, чем в сосновых. Это можно объяснить тем, что ель осуществляет более глубокую

трансформацию, чем сосна, из-за более протяженной и плотной кроны.

#### **Глава 4. Состав дождевых вод в хвойных лесах в условиях аэротехногенного загрязнения**

Состав дождевых вод, как и снеговых, во всех зонах в еловых и сосновых лесах характеризуется выраженной внутрибиогеоценотической изменчивостью: концентрации и выпадения многих элементов с дождем в подкروновых пространствах выше, чем между крон деревьев (табл. 2). В еловых лесах концентрации и выпадения элементов, как правило, выше, чем в сосновых, что обусловлено большей поверхностью и более выраженными барьерными функциями кроны деревьев ели.

По сравнению с фоновой территорией, в буферной и импактной зонах в дождевых водах еловых и сосновых лесов наблюдается увеличение кислотности вод и концентраций соединений элементов входящих в состав выбросов: меди – до 70 раз, никеля – до 237 раз и сульфатов до 6 раз, что наиболее ярко выражено в подкроновых пространствах (табл. 2). Также в составе дождевых вод в буферной и импактной зонах наблюдается увеличение концентраций основных элементов питания, что обусловлено их выщелачиванием из древесного полога, а также происходит снижение концентраций углерода в связи с дефолиацией крон деревьев.

Многолетняя динамика состава дождевых вод фоновых сосновых и еловых лесов демонстрирует высокую вариабельность и тренд увеличения концентраций никеля в подкроновых и межкроновых пространствах, что свидетельствует о возрастании техногенных нагрузок (рис. 1)

Таблица 2. Концентрация соединений элементов в дожде в еловых лесах за период 1999-2017 гг., мг/л, ANC в ммоль/л

Параметры	Среднее			Ст. отклонение			<i>p</i>		
	Ф	Б	И	Ф	Б	И	Ф	Б	И
Межкروновые пространства									
ANC	0,04	0,02	-0,04	0,07	0,04	0,07	0,00	0,20	0,00
pH	5,26	4,65	4,10	0,71	0,65	0,40	0,00	0,81	0,00
Ca	0,43	0,72	1,29	0,37	0,77	0,96	0,00	0,18	0,00
Mg	0,10	0,15	0,25	0,11	0,16	0,21	0,00	0,24	0,00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,99	2,91	6,46	0,70	2,68	4,57	0,00	0,11	0,00
Cu	0,003	0,01	0,08	0,005	0,01	0,10	0,00	0,00	0,00
Ni	0,002	0,01	0,10	0,004	0,02	0,11	0,00	0,00	0,00
C	6	4,44	4,51	7,83	2,45	2,88	0,03	0,26	0,33
Подкroновые пространства									
ANC	0,71	0,19	-0,05	0,32	0,20	0,24	0,00	0,02	0,00
pH	4,14	3,61	3,54	0,46	0,30	0,30	0,00	0,00	0,00
Ca	3,78	6,05	4,15	2,09	4,86	2,37	0,01	0,00	0,12
Mg	1,23	1,49	1,14	0,83	1,36	0,85	0,59	0,04	0,14
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	11,01	30,7	26,2	8,25	25,6	18,3	0,00	0,00	0,06
Cu	0,01	0,24	1,08	0,01	0,30	1,09	0,00	0,01	0,00
Ni	0,01	0,28	1,38	0,01	0,26	1,20	0,00	0,00	0,00
C	84,4	50,1	26,6	34,4	32,9	13,9	0,00	0,33	0,00

Многолетняя динамика состава дождевых вод в буферной зоне в сосновых лесах демонстрирует тренды к увеличению концентраций никеля и сульфатов в последние годы в межкroновых пространствах. В импактной зоне не выявлено отчетливых многолетних трендов снижения концентраций основных поллютантов.

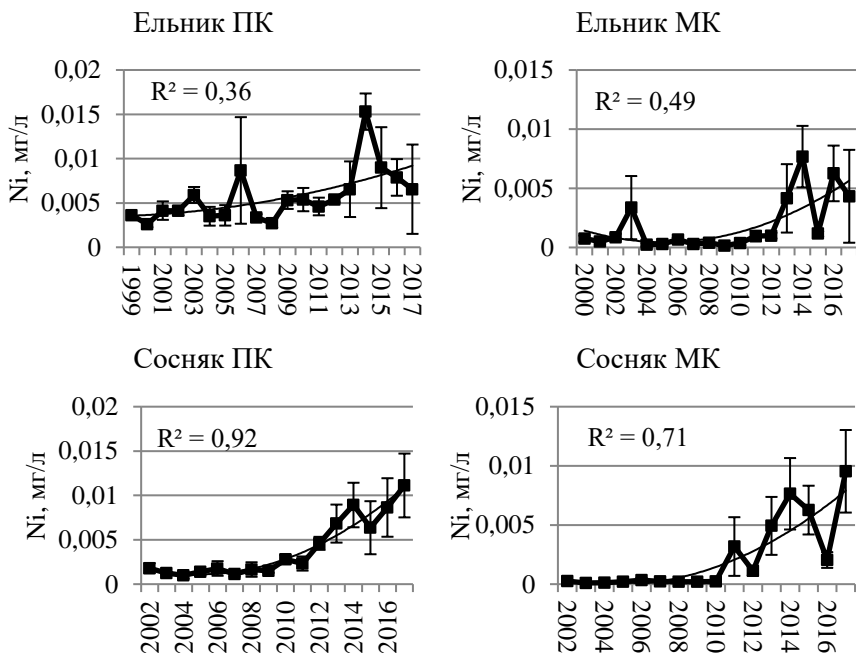


Рисунок 1. Многолетняя динамика концентраций никеля в дожде в фоновых ельниках и сосняках. ПК – под кронами, МК – между крон деревьев

## Глава 5. Состав почвенных вод в хвойных лесах в условиях аэротехногенного загрязнения

Состав лизиметрических вод из органогенных и минеральных горизонтов почв на фоновой территории, в буферной и импактной зонах характеризуется значительным внутри- и межбиогеоценоотическим варьированием (табл. 3). Концентрации и вынос элементов, как правило, выше в почвенных водах подкروновых пространств по сравнению с межкроновыми.

Таблица 3. Концентрация соединений элементов в лизиметрических водах из органогенного горизонта почв в еловых лесах за период 1991/ 1995-2017 гг., мг/л, ANC в ммоль/л

Параметры	Среднее			Ст. отклонение			<i>p</i>		
	Ф	Б	И	Ф	Б	И	Ф	Б	И
Межкروновые пространства									
ANC	0,19	0,33	0,03	0,12	0,19	0,08	0,91	0,00	0,00
pH	4,20	3,84	4,16	0,38	0,3	0,38	0,00	0,00	0,00
Ca	1,37	3,45	4,03	0,74	1,75	2,85	0,00	0,02	0,00
Mg	0,31	0,78	0,97	0,16	0,45	0,65	0,00	0,07	0,00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,93	6,67	18,9	0,6	5,23	14,5	0,00	0,01	0,00
Cu	0,01	0,03	0,17	0,01	0,02	0,16	0,00	0,00	0,00
Ni	0,003	0,07	0,74	0,004	0,06	0,58	0,00	0,00	0,00
C	26,3	53,5	17,6	12,8	22,6	15,1	0,00	0,00	0,00
Подкروновые пространства									
ANC	0,65	0,15	-0,002	0,34	0,15	0,13	0,00	0,00	0,00
pH	4,42	3,53	3,91	0,43	0,18	0,4	0,00	0,00	0,89
Ca	6,23	5,71	4,51	3,68	2,88	2,37	0,01	0,22	0,00
Mg	1,58	1,09	1,24	0,98	0,53	0,68	0,00	0,00	0,50
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7,29	27,5	28,7	4,89	15,8	17,7	0,00	0,00	0,00
Cu	0,01	0,26	0,91	0,01	0,17	1,15	0,00	0,01	0,00
Ni	0,01	0,23	1,21	0,004	0,17	0,91	0,00	0,00	0,00
C	83,8	34,7	17,7	43,4	13,5	13,9	0,00	0,01	0,00

В буферной и импактной зонах наблюдается существенное влияние аэротехногенного загрязнения на формирование состава лизиметрических вод из всех горизонтов почв. Это выражается в повышенном содержании тяжелых металлов и кислотообразующих веществ: никеля – до 600 раз, меди – до 100 раз и сульфатов – до 20 раз, а также в повышении кислотности почвенных вод по сравнению с фоновой территорией, что наиболее выражено под кронами деревьев. Помимо этого, следует отметить снижение концентраций углерода в водах из органогенных и минеральных горизонтов почв в буферной и импактной зонах, что связано с резким снижением продуктивности и количеством опада. По сравнению с фоновой территорией ANC почвенных вод снижается, что наиболее ярко выражено в импактной зоне (Таблица 3, рис. 2).



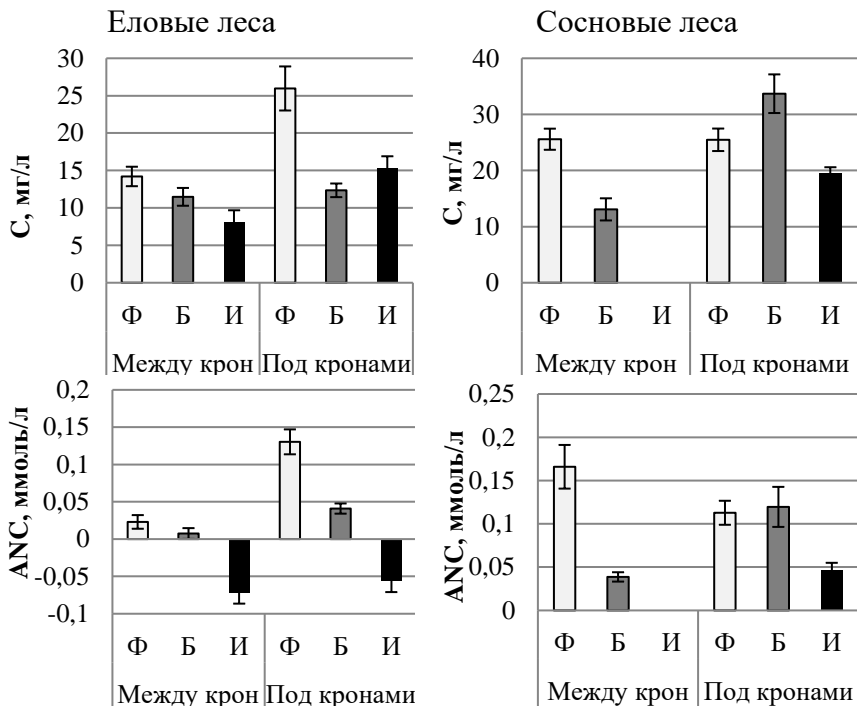


Рисунок 2. Концентрации углерода и показатель ANC в водах из иллювиальных горизонтов почв в еловых и сосновых лесах в разных зонах загрязнения. Ф – фоновая территория, Б – буферная зона, И – импактная зона. Данные по водам в межкрупных пространствах сосняков импактной зоны отсутствуют.

Многолетняя динамика в водах из всех горизонтов почв сосновых и еловых лесов демонстрирует достоверный тренд к увеличению концентраций тяжелых металлов, в том числе никеля в фоновой и буферной зонах, что свидетельствует о возрастании техногенных нагрузок. Многолетняя динамика состава лизиметрических вод в импактной зоне демонстрирует тренды снижения концентраций тяжелых металлов и сульфатов, что наиболее ярко выражено в еловых лесах (рис. 3). Это может свидетельствовать о снижении выпадений загрязняющих веществ в составе крупных частиц вблизи комбината, а также может объясняться снижением концентраций органического вещества,

связанным с резким снижением продуктивности и количества опада.

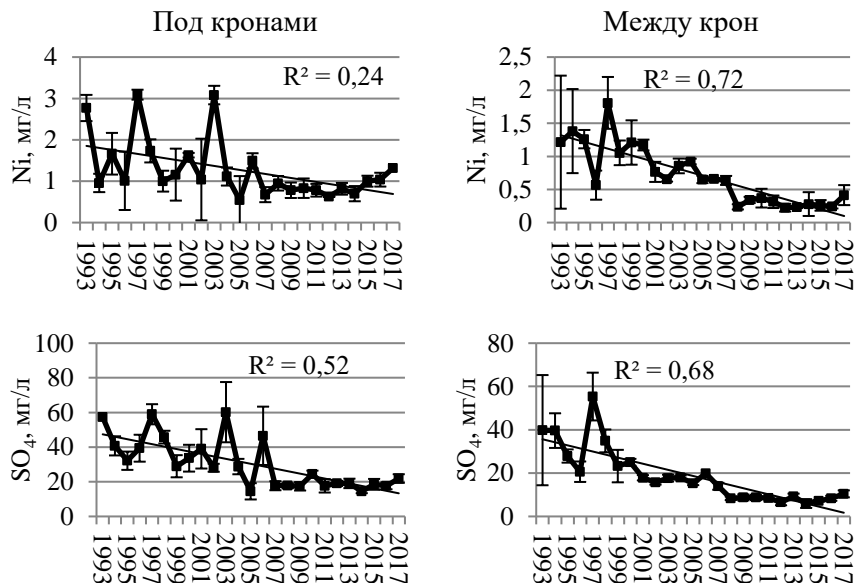


Рисунок 3. Многолетняя динамика концентраций никеля и сульфатов в лизиметрических водах из органогенных горизонтов почв в ельнике в импактной зоне

Выявлено, что в большинстве случаев концентрации и вынос элементов в подкروновых пространствах еловых лесов выше, чем в сосновых лесах.

## Глава 6. Сравнение уровней загрязнения атмосферных выпадений и почвенных вод с известными критическими нагрузками

Информация о химическом составе атмосферных выпадений и почвенных вод имеет высокое индикативное значение для оценки возможных негативных воздействий на леса. Более четверти века развивается концепция критических нагрузок, которые определяются как «количественная оценка воздействия уровня

одного или нескольких поллютантов, ниже которого значительных негативных последствий для наиболее чувствительных компонентов экосистем не наблюдается, в соответствии с современным уровнем знаний» [Nilsson, Greenfelt, 1988; Копчик, 2004]. Критические нагрузкоцениваются использованием химических индикаторов, таких как, концентрации тяжелых металлов или сульфатной серы в атмосферных выпадениях или почвенных растворах. Для оценки процессов подкисления почв предложен такой индикатор как молярное отношение суммы основных катионов и алюминия в почвенных растворах. Для оценки эвтрофикации, насыщения азотом, используют концентрации минерального азота в почвенных растворах.

Из приведенных в главах 3 – 5 результатов исследований установлено, что содержание соединений тяжелых металлов и серы в атмосферных выпадениях и почвенных водах в буферной и импактной зонах многократно превышают фоновые уровни. Целесообразно сравнить уровни выпадений и выноса поллютантов на объектах исследований, особенно в фоновых условиях, с установленным в международной практике критическим уровнем. Поскольку на основе результатов исследований установлены существенные меж- и внутрибиогеоэценотические различия состава атмосферных выпадений и почвенных вод, сравнения следует проводить с учетом этих различий.

Критический уровень общих выпадений (с дождем и снегом) сульфатной серы из атмосферы в Центральной Лапландии составляет  $0.3 \text{ г/м}^2$  в год [Korhola et al., 1999]. Критический уровень содержания сульфатов в почвенных водах на Кольском полуострове составляет 500 экв/га в год [Reinds et. al; 2008]. Уровень нижних критических пределов для экосистемы по никелю и меди составляет – 10 и 5 г/га в год [Reinds et al., 2006; Лукина и др., 2018].

Содержание тяжелых металлов в атмосферных выпадениях и почвенных водах превышали годовые критические уровни (до 8 раз) уже в фоновых условиях, что наиболее ярко выражено в подкороновых пространствах ельника (рис. 5).

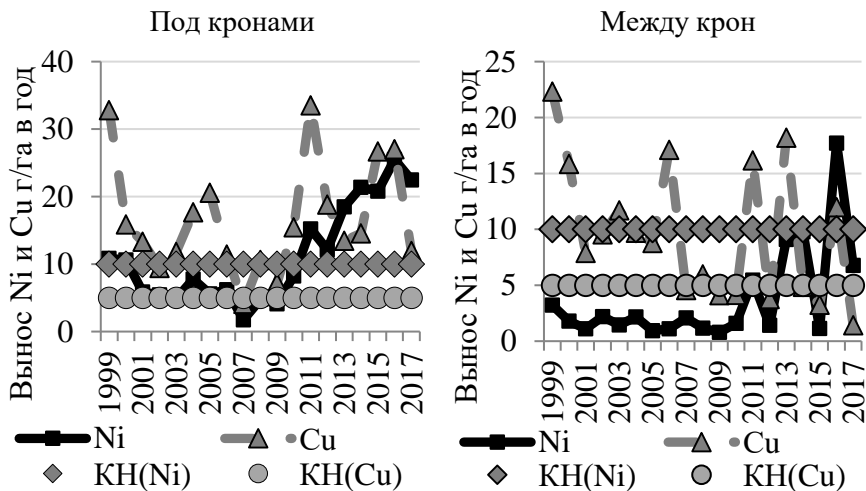


Рисунок 5. Многолетняя динамика выноса никеля и меди в водах из органогенных горизонтов почв в еловых лесах на фоновой территории: КН(элемент) – критическая нагрузка элемента.

Наиболее значительные превышения наблюдаются в атмосферных и почвенных водах подкروновых пространств в еловых лесах по сравнению с сосновыми. В буферной и импактной зонах максимальные превышения уровня критических нагрузок выпадений сульфатов достигали 9 раз и тяжелых металлов – 600 раз.

При повышенных кислотных нагрузках почва постепенно истощается основными катионами, в основном кальцием и магнием. При подкислении в почве образуются токсичные формы алюминия. Повышенная концентрация таких форм Al в почвенном растворе может привести к ингибированию роста корней, повреждению тонких корней и микоризы. Увеличение выпадений азота может вызвать эвтрофикацию почвы, а также интенсифицировать вымывание нитратов, что называют насыщением азота. Для оценки превышений критического уровня использованы такие международные химические индикаторы, как молярное отношение основных катионов и алюминия (BC/Al) и концентрации минерального азота (Nmin) в почвенном растворе: для первого

показателя этот уровень для лесов, доминантами которых являются *Pinus sylvestris* и *Picea abies* составляет –  $< 1,2$ , а для второго –  $> 0,2$  мг/л [Jost et al., 2012].

Показатель  $BC/Al$  в почвенных водах сосновых и еловых лесов, как под кронами, так и между крон деревьев во всех зонах значительно превышает критические значения. Это можно объяснить богатством почвообразующих пород региона исследований основными катионами. Критический уровень для минерального азота превышен во всех зонах (до 3,5 раз), при этом в подкروновых пространствах превышения, как правило, выше, чем в межкروновых. Данные по атмосферным выпадениям и выносу с почвенными водами основных поллютантов в подкروновых пространствах еловых лесов являются более информативными для выявления превышений уровня критических нагрузок.

## **Выводы**

1. На фоновой территории, в буферной и импактной зонах концентрации элементов в снеговых, дождевых и почвенных водах, их выпадения из атмосферы и вынос с почвенными водами в еловых лесах, как правило, выше, чем в сосновых: в снеге до 3 раз, в дожде до 5 раз и в почвенных водах до 12 раз. Это объясняется тем, что ель осуществляет более глубокую трансформацию, чем сосна, из-за более протяженной и плотной кроны.

2. На фоновой территории, в буферной и импактной зонах концентрации элементов в атмосферных и почвенных водах, так же как их выпадения из атмосферы и вынос с почвенными водами, как правило, выше в подкروновых пространствах еловых и сосновых лесов, чем в межкروновых: в снеге - до 3 раз, в дожде - до 40 раз и в почвенных водах - до 14 раз. Это связано со смывом и выщелачиванием соединений элементов из крон деревьев, опада и почв.

3. В буферной зоне концентрации тяжелых металлов и сульфатов возрастают в снеговых водах до 11 и 2 раз, в дождевых водах - до 48 и 5 раз, в почвенных водах – до 40 и 4 раз, соответственно, по сравнению с фоном. В импактной зоне концентрации тяжелых металлов и сульфатов возрастают в снеге до

100 и 3 раз, в дожде - до 240 и 6 раз, в почвенных водах – до 600 раз и 20 раз, соответственно, по сравнению с фоном.

4. В буферной и импактной зонах по сравнению с фоном концентрации кальция и магния возрастают в снеге – до 2 раз, в дожде и в почвенных водах – до 3 раз в еловых и сосновых лесах, что связано с их вымыванием и выщелачиванием из древесного полога, опада и почв. В окрестностях комбината дополнительным источником кальция и магния являются промышленные выбросы и пыление территорий, не покрытых растительностью.

5. В буферной и импактной зонах по сравнению с фоном подтверждается возрастание актуальной кислотности атмосферных и почвенных вод, вызванное увеличением количества кислотообразующих веществ, а также обнаружено снижение концентраций углерода в снеговых водах подкроновых пространств – до 2 раз, в дожде – до 3 раз и почвенных водах – до 5 раз, что объясняется снижением количества опада из-за ухудшения состояния и гибели деревьев.

6. Многолетняя динамика состава атмосферных выпадений и почвенных вод в хвойных лесах на фоновой территории демонстрирует значимые тренды увеличения концентраций никеля в последние годы (с 2013 года). Это может быть обусловлено повышением концентраций никеля в аэрозолях, распространяющихся на значительные расстояния. В снеговых и почвенных водах хвойных лесов в буферной и импактной зонах наблюдаются тенденции снижения концентраций поллютантов, что может свидетельствовать о снижении выпадений загрязняющих веществ в составе более крупных частиц вблизи комбината.

7. На фоновой территории в атмосферных выпадениях обнаружено превышение уровня критических пределов тяжелых металлов до 5 раз, соединений серы до 2 раз и превышение критических пределов тяжелых металлов в почвенных водах до 3 раз. В буферной и импактной зонах превышение критических пределов в атмосферных и почвенных водах для тяжелых металлов составляло сотни раз, а сульфатной серы достигало 7 раз.

8. Учет внутри- и межбиогеоценотических различий в составе атмосферных выпадений и почвенных вод позволяет провести более раннюю диагностику превышения критических нагрузок. Данные об атмосферных выпадениях и почвенных водах в

подкроновых пространствах ели в еловых лесах являются наиболее информативными для ранней диагностики превышения уровня критических нагрузок.

9. Данные исследования отчетливо демонстрируют, что изучение состава и свойств атмосферных выпадений и почвенных вод, а также оценка превышения критических пределов концентраций тяжелых металлов и соединений серы в лесных экосистемах должна проводиться с учетом как меж-, так и внутробиогеоценотического варьирования.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

#### ***Публикации в журналах из списка рекомендованных ВАК:***

1. Лукина, Н. В. Оценка критериев устойчивого управления лесами с использованием индикаторов международной программы ICP Forests / Н. В. Лукина, М. А. Орлова, А. В. Горнов, А. М. Крышень, П. В. Кузнецов, С. В. Князева, В. Э. Смирнов, О. Н. Бахмет, С. П. Эйдлина, **В. В. Ершов**, Н. В. Зукерт, Л. Г. Исаева // Лесоведение. – 2013. – № 5. – С. 62–75 (Scopus).

2. **Ершов, В. В.** Мониторинг состояния окружающей среды в лесных экосистемах Мурманской области / В. В. Ершов, Л. Г. Исаева, Т. Т. Горбачева // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2014. – № 3 (40). – С. 133-137.

3. **Ershov, V. V.** Dynamics of Snowmelt Water Composition in Conifer Forests Exposed to Airborne Industrial Pollution / V. V. Ershov, N. V. Lukina, M. A. Orlova, N.V. Zukert // Russian Journal of Ecology. – 2016. Vol. 47. – №1. – P. 46-52. (WoS, Scopus).

4. Lukina, N. V. Assessment of soil water composition in the northern taiga coniferous forests of background territories in the industrially developed region / N. V. Lukina, **V. V. Ershov**, Т. Т. Gorbacheva, M. A. Orlova, L. G. Isaeva and D. N. Teben'kova // Eurasian Soil Science. – 2018. – Vol. 51. – No. 3. – pp. 285-297. (WoS, Scopus).

5. **Ershov, V. V.** Assessment of soil-water composition dynamics in the north taiga forests upon reduction of industrial air pollution by emissions of a copper-nickel smelter / V. V. Ershov, L. G. Isaeva, Т. Т.

Gorbacheva, N. V. Lukina, M. A. Orlova, V. E. Smirnov // Contemporary Problems of Ecology. – 2019. – Т. 12. – № 1. – С. 97–108. (Wos, Scopus)

6. Иванова, Е. А. Влияние аэротехногенного загрязнения на скорость разложения растительных остатков в сосновых лесах на северном пределе распространения / Е. А. Иванова, Н. В. Лукина, М. А. Данилова, Н. А. Артемкина, В. Э. Смирнов, **В. В. Ершов**, Исаева Л. Г. // Лесоведение. – 2019. – № 6. – С. 533-546. (Scopus).

7. **Ершов, В. В.**, Содержание тяжелых металлов в атмосферных выпадениях в окрестностях заповедника «Пасвик» / В. В. Ершов, Л. Г. Исаева, Н. В. Поликарпова // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2019. – Т. 22. – № 1. – С. 83-89.

8. **Ershov, V. V.** Assessment of the Composition of Rain Deposition in Coniferous Forests at the Northern Tree Line Subject to Air Pollution / V. V. Ershov, N. V. Lukina, M. A. Danilova, L. G. Isaeva, T. A. Sukhareva and V. E. Smirnov // Russian Journal of Ecology. – 2020. – Vol. 51 – No. 4. – P. 319-328. (Wos, Scopus).

9. Сухарева, Т. А. Оценка состояния северотаежных лесов в условиях снижения атмосферных выбросов комбинатом «Североникель» / Т. А. Сухарева, **В. В. Ершов**, Л. Г. Исаева, М. А. Шкондин // Цветные металлы. – 2020. – № 8. – С. 33 – 41. (Scopus).

### *Публикации в прочих научных изданиях:*

10. **Ершов, В. В.** Динамика концентраций меди, никеля и серы в почвенных водах в хвойных лесах вблизи центральной усадьбы Лапландского заповедника / В. В. Ершов // В книге: Проблемы изучения и сохранения растительного мира Восточной Финноскандии. тезисы докладов международного совещания, посвященного 100-летию со дня рождения М.Л. Раменской. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2015. – С. 31-32.

11. Исаева Л. Г. Влияние аэротехногенных выбросов комбината «Североникель» на древостой Лапландского заповедника /Л. Г. Исаева, **В. В. Ершов** // В сборнике: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения Г. М. Крепса и 110-летию



со дня рождения О.И. Семенова-Тян-Шанского.– Апатиты: Изд-во КНЦ РАН,2016. – С. 92-94.

12. **Ершов, В. В.** Динамика концентраций меди, никеля и серы в почвенных водах в хвойных лесах вблизи центральной усадьбы лапландского заповедника / В. В. Ершов, Л. Г. Исаева // Климат и эколого-географические проблемы Российской Арктики. Тезисы докладов международной школы-конференции молодых ученых. – Апатиты: Изд-во ООО «КаэМ»,2016. – С. 26.

13. **Ершов, В. В.** Концентрация меди, никеля и серы в атмосферных выпадениях в лесах Печенгского района / В. В. Ершов, Л. Г. Исаева // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2017. – Вып. 14. – С. 391-394.

14. **Ершов В. В.** Кислотонейтрализующая способность почвенных вод северотаежных лесов при снижении аэротехногенной нагрузки медно-никелевым комбинатом / В. В. Ершов, Л. Г. Исаева, Е. А. Иванова // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2018. – Вып. 15. – С. 453-455.

15. **Ершов, В. В.** Критический уровень поллютантов в атмосферных выпадениях северотаежных лесов Субарктики / В. В. Ершов, Л. Г. Исаева // Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов: материалы VIII Всероссийской с международным участием научно-практической конференции (9-13 октября 2018 г., г. Волгоград) / Коллектив авторов. М.: Планета. – 2018. – С. 188-194.

16. **Ершов, В. В.** Состав почвенных вод в Лапландском государственном природном биосферном заповеднике и государственном природном заповеднике «Пасвик» / В. В. Ершов, Л. Г. Исаева, Н. В. Поликарпова // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2019. – № 16. – С. 175-179.

17. **Ершов, В. В.** Мониторинг состава атмосферных и почвенных вод в лесных экосистемах: достижения и перспективы / В. В. Ершов // Вопросы лесной науки. – 2020. – Т. 3. – № 2. – С. 1-34.