Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ботанический институт
им. В.Л. Комарова Российской академии наук

На правах рукописи

Научный доклад об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (диссертации)

«Динамика накопления тяжелых металлов в системе почва–растение в сосновых лесах Кольского полуострова при аэротехногенном загрязнении»

по направлению подготовки
06.06.01 Биологические науки

Направленность (профиль)
03.02.08 Экология (в биологии)

Аспирант: Волкова Елена Николаевна

Научный руководитель: д.б.н. Лянгузова Ирина Владимировна

22 июля 2025 *г.*

Санкт-Петербург

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Кольский полуостров является одним из наиболее освоенных арктических регионов России. Здесь сосредоточены значительные запасы минерального сырья и производственные мощности, однако природа этого региона очень чувствительна к техногенным воздействиям и обладает низкой способностью к самовосстановлению. Наземные экосистемы Кольского полуострова подвергаются интенсивному промышленному воздействию на протяжении более 80 лет, что привело к негативным изменениям в природных ландшафтах, находящихся вблизи промышленных объектов. Одним из основных источников загрязнения окружающей среды является горнометаллургическое предприятие Кольский металлургический завод (ранее «Североникель»), расположенное в городской черте Мончегорска. Несмотря на снижение объемов выбросов, негативные изменения в экосистемах продолжают проявляться, особенно в растительных сообществах, находящихся вблизи источника загрязнения.

Живой напочвенный покров представляет собой очень важный структурный и энергетический компонент лесных экосистем, который быстрее реагирует на действие внешних нарушений, чем древостой. Доминирующими видами в травяно-кустарничковом ярусе северотаежных сосновых лесов являются ягодные кустарнички, которые и послужили объектом данного исследования. Кроме того, надземные органы кустарничков *Vaccinium myrtillus* L. и *V. vitis-idaea* L. используются в качестве лекарственного сырья в народной медицине, а ягоды употребляют в пищу.

Для решения задач экологического мониторинга актуальным является использование депонирующих природных сред, в частности, снегового покрова как индикатора техногенного загрязнения атмосферного воздуха (Воробьевская и др., 2020; Таловская, 2022).

Цели и задачи исследования.

Цель исследования – оценка уровня накопления тяжелых металлов в системе почва–растение в средневозрастных сосновых лесах Кольского полуострова при современном уровне аэротехногенной нагрузки.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести мониторинг содержания тяжелых металлов в снеговом покрове, почвах и растениях по градиенту техногенного загрязнения.
2. Выявить взаимосвязи в содержании тяжелых металлов в системе почва–растение на разном удалении от источника загрязнения.

3. Оценить вертикальное распределение Ni и Cu по почвенному профилю Al-Fe-гумусовых подзолов и выявить роль лесной подстилки как биогеохимического барьера.
4. Определить возможность практического использования ягодных кустарничков при разном уровне загрязнения местообитаний тяжелыми металлами.

Научная новизна результатов.

На основе комплексного подхода получены новые данные о содержании тяжелых металлов в различных органах доминирующих видов кустарничков, генетических горизонтах Al-Fe-гумусовых подзолов, а также о выпадении загрязняющих веществ на наземную поверхность в условиях сниженной аэротехногенной нагрузки, что вносит ощутимый вклад в понимание процессов миграции тяжелых металлов в системе почва–растение. Получены новые доказательства высокой (буферная зона) и очень высокой (импактная зона) фитотоксичности лесных почв, которая сохраняется несмотря на резкое снижение объемов атмосферных выбросов в последние 25 лет. Лесная подстилка выполняет роль биогеохимического барьера на пути токсикантов вглубь почвенного профиля даже на территории импактной зоны. Впервые выявлен дополнительный вклад Оленегорского горно-обогатительного комбината (г. Оленегорск) в загрязнение окружающей среды соединениями железа на основе анализа снегового покрова и доминирующих видов кустарничков в сосновых лесах. Впервые проведен рентгенофазовый анализ минеральных горизонтов Al-Fe-гумусовых подзолов на содержание основных породообразующих минералов (кварц, плагиоклаз, пироксен, амфибол, биотит), установлено отсутствие влияния аэротехногенного загрязнения полиметаллической пылью, выбрасываемой в атмосферу комбинатом «Североникель», на минералогический состав исследуемых подзолов.

Теоретическая и практическая значимость проведенных исследований.

Результаты работы вносят вклад в понимание механизмов накопления и трансформации тяжелых металлов в северотаежных экосистемах на фоне снижения аэротехногенной нагрузки. Полученные результаты могут быть положены в основу разработки методов ремедиации на антропогенно нарушенных территориях, а также методов биоиндикации. На основе полученных сведений может быть проведено нормирование и выявлены предельно допустимые нагрузки на наземные экосистемы, которые необходимы при реализации природоохранной деятельности в окрестностях предприятий цветной металлургии. Практическая значимость заключается в оценке возможности использования дикорастущих плодов для пищевых нужд местного населения, а растительного сырья в качестве лекарственных средств в народной медицине.

Полученные данные могут быть использованы для прогнозирования изменений экосистем при дальнейшем снижении или увеличении аэротехногенной нагрузки.

Методология и методы исследования.

В работе использованы методические подходы: 1) эколого-токсикологический подход, заключающийся в одновременном анализе уровня загрязнения почвы (доза) и накопления тяжелых металлов различными органами растений (эффект); 2) градиентный подход, позволяющий выявлять взаимодействия между уровнем фактора (загрязнение почвы тяжелыми металлами) и ответной реакцией доминирующих видов растений. Проведенное исследование основано на материале, собранном в 2019, 2023, 2024 гг. Полевые работы проведены в центральной части Кольского полуострова в импактной, буферной и фоновой зонах воздействия комбината «Североникель» на мониторинговых пробных площадях, заложенных в средневозрастных сосновых лесах. Образцы почв, растений и снегового покрова собраны в соответствии с принятыми методиками отбора и пробоподготовки образцов к химическому анализу (Методы изучения лесных сообществ, 2002). Содержание Ni, Cu, Co, Fe, Pb, Cd в исследуемых пробах определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Статистическая обработка данных осуществлена с использованием методов дисперсионного и корреляционного анализов.

Положения, выносимые на защиту.

1. При современном уровне аэротехногенного загрязнения доминирующие виды ягодных кустарничков *Vaccinium myrtillus* и *V. vitis-idaea* накапливают тяжелые металлы в потенциально опасных для здоровья количествах.
2. Высокая и очень высокая степень фитотоксичности Al-Fe-гумусовых подзолов сохраняется несмотря на снижение аэротехногенной нагрузки; лесная подстилка выполняет роль биогеохимического барьера в вертикальном распределении Ni и Cu по почвенному профилю.
3. Повышенное содержание железа в растительном сырье и снеговом покрове обусловлено деятельностью Ловозерского горно-обогатительного комбината.

Апробация результатов исследования.

Основные результаты работы были представлены в 2023–2025 гг. на заседаниях лаборатории Экологии растительных сообществ БИН РАН (Санкт-Петербург, 2023, 2024, 2025). Кроме того, некоторые аспекты работы были представлены на научных конференциях: Молодежной конференция «Почвоведение: Горизонты будущего» (Москва, 2020) и VIII Всероссийской научной конференции с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» (Апатиты, 2024).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Влияние атмосферного промышленного загрязнения на компоненты лесных экосистем сосновых лесов Кольского полуострова

В главе проведен анализ литературных сведений о роли напочвенного покрова в лесных сообществах, влиянии атмосферного промышленного загрязнения на компоненты лесных экосистем, накоплении элементов-загрязнителей в высших и низших растениях и лишайниках, описаны признаки восстановления растительного покрова после постепенного снижения содержания металлов в природных средах. В конце обзора обозначены неизученные аспекты и перспективные направления исследований.

Глава 2. Природные условия района исследований и характеристика аэротехногенного загрязнения

В главе приведено краткое описание рельефа, климата, почв и растительности района исследования, а также охарактеризован источник аэротехногенного загрязнения – комбинат «Североникель»

Глава 3. Объекты и методы исследований

Исследования выполнены в средневозрастных сосновых лесах центральной части Кольского полуострова, расположенных по градиенту загрязнения от комбината "Североникель" в юго-западном и северо-восточном направлениях. Пробные площади расположены в импактной зоне (11 км от предприятия) – ПП29 (ЮЗ) и ПП10 (СВ), буферной зоне (30–35 км) – ПП27 (СВ), ПП28 (ЮЗ), ПП3 (ЮЗ), а также в фоновом районе (Ковдорский район, пос. Уполокша) – ПП У(ЮЗ).

На каждой пробной площади в конце сентября отбирали не менее 15 кустарничков *Vaccinium vitis-idaea* и *V. myrtillus*, индивидуальные образцы объединяли для получения средней пробы. Кустарнички разделяли на подземные побеги+корни, листья, стебли и ягоды и высушивали до воздушно-сухого состояния. Навески растительного материала в двукратной повторности озоляли в кварцевых чашках в муфельной печи SNOL8.2/1100 при температуре 450°C в течение 5 часов. После озоления золу смачивали дистиллированной водой, добавляли 5 мл HCl (1:1) и упаривали до минимального объема. После охлаждения приливали 1 мл дистиллированной воды и фильтровали в мерную пробирку, дважды обмывая чашку HCl (1N). Конечный объем раствора составлял 20–25 мл.

На каждой ПП закладывали по 2 почвенных разреза, в пределах которых проводили описание почвенных горизонтов с измерением их толщины и отбирали пробы каждого генетического горизонта. Образцы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния и

просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Образцы лесной подстилки растирали в фарфоровой ступке и также просеивали. К навеске почвенного образца в двухкратной повторности приливали 10 или 25 мл HCl (1 N), встряхивали на ротаторе в течение 1 часа и фильтровали. В полученных растворах определяли содержание Ni, Cu, Co на атомно-абсорбционном спектрометре Квант-АФА.

Перед началом активного снеготаяния (конец апреля) на каждой ПП отбирали 5 образцов снега на полную глубину снежного покрова, фиксировали высоту и диаметр полученного столба снега. Образцы снега взвешивали и растапливали с последующей фильтрацией для отделения нерастворимого осадка. Содержание водорастворимых и нерастворимых (осадка) форм тяжелых металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

Изучение минералогического фазового состава почв проводили методом Ритвельда, который основан на данных рентгеновской дифракции поликристаллических проб. Пробы минеральных горизонтов высушивали до воздушно-сухого состояния, вручную перетирали до состояния пудры в агатовой ступке и проводили измерения на дифрактометре Rigaku MiniFlex II (ФИЦ КНЦ РАН). Расчет относительного содержания минералов проводили в программе RietToThensor.

Глава. 4. Анализ жидкой и твердой фаз снегового покрова

Анализ снежного покрова может дать надежные сведения об атмосферном переносе загрязняющих веществ на дальнее расстояние (Воробьевская и др., 2020).

Проведенное в 2023–2024 гг. обследование снегового покрова по градиенту аэротехногенного загрязнения выявило существенное варьирование высоты снегового покрова, объема талой воды и плотности снега на территории исследуемых ПП (табл. 1). Однако, как показал критерий Вилкоксона, достоверные различия в этих показателях в 2023 и 2024 гг. отсутствуют. В фоновом районе Кольского полуострова и на территории буферной зоны концентрации Ni, Cu и Co в снеговой воде находятся на пределе их обнаружения и не превышают 0.05 мг/л. Лишь на территории импактной зоны обнаруживается Ni, содержание которого в 2023–2024 гг. варьировало в пределах 0.09–0.30 мг/л, а также незначительное содержание водорастворимых форм меди.

В 2023 г. в дополнение к основным ингредиентам (Ni, Cu, Co) атмосферных выбросов комбината «Североникель» было проанализировано содержание Fe в талой воде. В фоновом районе его содержание практически не превышало фоновых величин (0.06±0.01 мг/л), а на пробных площадях, расположенных на северо-восток от комбината «Североникедь», концентрации Fe составили: на ПП10 – 0.14±0.02, а на ПП27 – 0.27±0.06 мг/л, что в 2–4.5 раза больше фоновых значений. Повышение содержания Fe в снеговой

воде, скорее всего, связано с атмосферными выбросами Оленегорского горно-обогатительного комбината (ГОК, г. Оленегорск), перерабатывающего железную руду местного происхождения. ПП27 расположена наиболее близко к ГОК'у, что и объясняет наиболее высокое содержание Fe с снеговой воде.

Таблица 1. Характеристика снежного покрова и жидкой фазы снега

№ ПП	Высота, см	Объем воды, см^3	Плотность снега, г/см^3	Ni, мг/л	Cu, мг/л
	Фоновый район				
У	74.2±7.0 51.6±3.1	5830±551 4050±246	0.190±0.007 0.258±0.025	– –	– –
	Буферная зона				
27	40.6±3.5 36.2±2.6	3190±277 2840±201	0.243±0.007 0.259±0.016	– –	– –
28	47.4±3.0 61.2±5.3	3725±238 4805±416	0.398±0.018 0.186±0.025	– –	– –
3	46.2±3.6 64.4±2.5	3630±279 5055±200	0.381±0.006 0.220±0.020	– –	– –
	Импактная зона				
10	50.8±4.1 38.6±2.6	3990±321 3030±203	0.255±0.011 0.285±0.008	0.30±0.01 0.11±0.02	0.04±0.01 –
29	63.8±3.9 64.2±3.7	5010±308 4135±197	0.225±0.015 0.244±0.010	0.14±0.02 0.09±0.01	0.02±0.01 –

Примечание. Над чертой – данные 2023 г., под чертой – данные 2024 г.; прочерк – содержание ниже предела определения.

Существенно более высокие значения содержания тяжелых металлов были выявлены в твердой фазе снега (рис. 1). Уже в фоновом районе обнаруживаются Ni и Cu, содержание которых составило соответственно 112±33 и 54±14 мг/кг пыли. Это свидетельствует о дальнем переносе мелкодисперсной полиметаллической пыли из атмосферных выбросов комбината «Североникель», что согласуется с литературными данными (Кизеев, 2014; Ershov et al., 2016). На территории буферной зоны содержание Ni и Cu в среднем составляет 200 и 90 мг/кг, что почти в 2 раза превышает их фоновый уровень. По данным А.Н. Кизеева (2014) в буферной зоне содержание грубодисперсных и растворимых частиц Ni и Cu в снежном покрове одинаково (50%). На территории импактной зоны наблюдаются максимальные концентрации тяжелых металлов, которые в среднем составляют: Ni – 2155, Cu – 845 мг/кг пыли, что в 15–20 раз больше их фоновых значений. Сопоставление концентраций тяжелых металлов в жидкой и твердой фазах снега из импактной зоны показывает многократное преобладание твердых техногенных частиц по отношению к водорастворимым формам тяжелых металлов (табл. 1, рис. 1), что согласуется с литературными данными (Кизеев, 2014; Kashulina, 2014). На территорию импактной зоны из атмосферных выбросов комбината выпадают наиболее грубодисперсные частицы полиметаллической пыли.

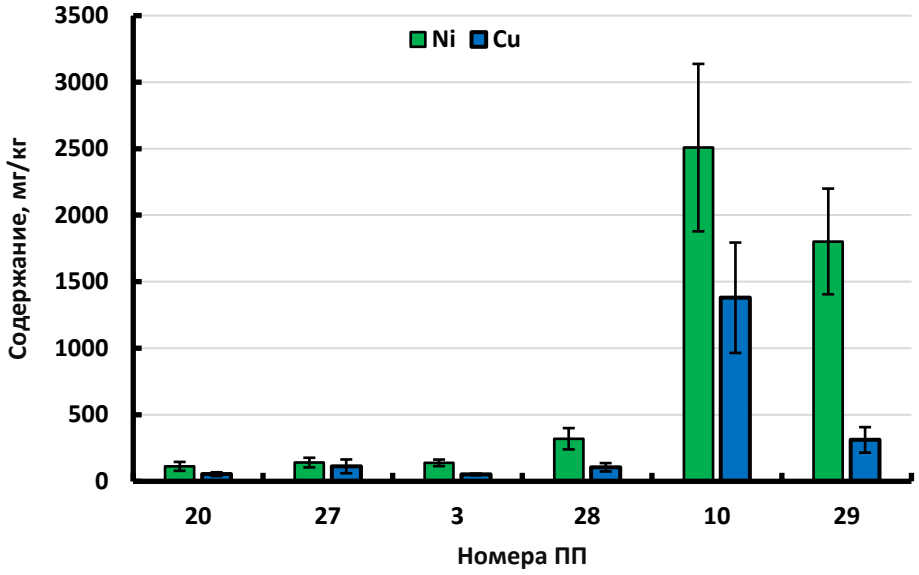

Рис. 1. Содержание Ni и Cu в твердой фазе снега на исследуемых пробных площадях (данные 2024 г.)

Таким образом, несмотря на резкое сокращение объемов атмосферных выбросов комбинатом «Североникель» в последние 25 лет, выпадение загрязняющих веществ на наземную поверхность лесных экосистем остается очень значительным, причем основная масса представляет собой грубодисперсные труднорастворимые техногенные частицы. Оленегорский горно-обогатительный комбинат дополняет загрязнение окружающей среды техногенными соединениями железа.

Глава 5. Минералогический состав и уровень загрязнения почв

5.1. Рентгенофазовый анализ почв

Для оценки возможного влияния аэротехногенного загрязнения на минералогический состав почв был проведен рентгенофазовый анализ минеральных горизонтов Al-Fe-гумусовых подзолов на исследуемых пробных площадях по градиенту техногенного загрязнения. Количественно был определен состав основных породообразующих минералов: кварц, плагиоклаз, пироксен, амфибол, биотит, которые наиболее распространены в земной коре. В качестве примера на рис. 2 приведено относительное содержание минералов в верхнем и самом нижнем минеральных горизонтах подзолов. Плагиоклаз отличается наибольшим содержанием, размах варьирования которого составляет 31.4–64.8%. Содержание кварца – самого распространенного минерала в земной коре, варьирует в достаточно широком диапазоне (16.3–48.4%). Пироксен и амфиболит занимают промежуточное положение, пределы варьирования их содержания

составляют 0.3–27.9 и 1.4–22.1% соответственно. Наименьшее содержание определено для биотита, всего от 1.1 до 10.3%.

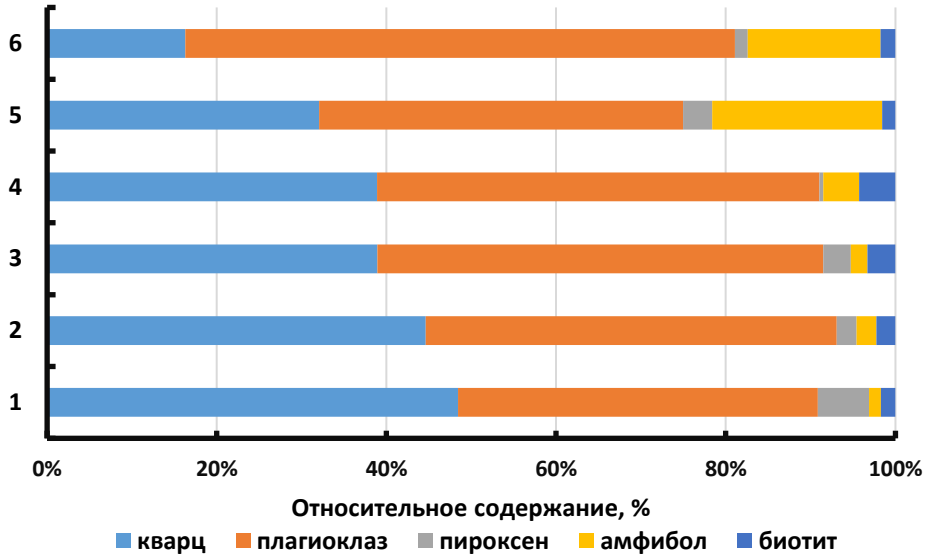

Рис. 2. Относительное содержание ряда минералов в почвах в разных зонах.
1, 2 – фоновый район (ПП20); 3, 4 – буферная зона (ПП27); 5, 6 – импактная зона. 1, 3, 5 – подзолистый горизонт; 2, 4, 6 – горизонт С.

Статистический анализ данных не выявил достоверных различий в содержании всех исследованных минералов между верхним (подзолистым) и самым нижним (С) минеральными горизонтами. Достоверные различия в содержании всех исследованных минералов в подзолах по градиенту аэротехногенного загрязнения также отсутствовали. Из этого можно сделать вывод об отсутствии влияния загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами на минералогический состав исследуемых подзолов.

5.2. Уровень загрязнения почв тяжелыми металлами

Хорошо известно, что наибольший пул доступных для растений тяжелых металлов обнаруживается в вытяжке 1.0 н HCl, поэтому был проведен анализ кислоторастворимых форм тяжелых металлов в верхнем органогенном горизонте (лесной подстилке) Al-Fe-гумусовых подзолов по градиенту аэротехногенного загрязнения (табл. 2). В фоновом районе содержание кислоторастворимых форм Ni и Cu практически одинаково, эти значения были использованы при расчете индекса техногенной нагрузки, который принят за 1. В пределах буферной зоны возрастают концентрации обоих металлов, что отражается в увеличении индекса техногенной нагрузки. Следует подчеркнуть, что в северо-восточном направлении от комбината «Североникель» содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов примерно в 5 раз меньше по сравнению со средней их концентрацией в подстилках сосновых лесов, расположенных в юго-западном направлении. Максимальные

величины содержания обоих металлов и индекса техногенной нагрузки выявлены на территории импактной зоны, причем содержание Cu в среднем в 2 раза больше такового Ni.

Таблица 2. Содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов в подстилке и индекс техногенной нагрузки

№ ПП	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Индекс техногенной нагрузки, отн. ед.
	Фоновый район		
У	9.7±0.6	10.3±0.6	1.0
	Буферная зона		
27	57.4±0.3	58.3±0.6	5.8
28	96.1±7.1	170±6	13.3
3	123±2	217±3	17.0
	Импактная зона		
10	874±13	1990±115	143
29	950±34	1850±240	140

Таким образом, несмотря на значительное сокращение объемов атмосферных выбросов комбинатом «Североникель» за последние 25 лет, фитотоксичность лесной подстилки остается на высоком (буферная зона) и очень высоком (импактная зона) уровне. Этот вывод подтверждается данными анализа снегового покрова (гл. 4), где содержание полиметаллической пыли многократно превышает концентрацию водорастворимых форм тяжелых металлов.

Для оценки миграции тяжелых металлов вниз по профилю исследуемых почв был проведен анализ минеральной толщи подзолов. Прежде всего, следует отметить, что закономерности вертикального распределения содержания кислоторастворимых форм Ni и Cu по генетическим горизонтам Al-Fe-гумусовых подзолов оказались сходными в буферной и импактной зонах. Максимальные концентрации тяжелых металлов обнаруживаются в лесной подстилке (табл. 2), где они в 5–20 раз превышают их фоновое содержание в буферной зоне и в 70–200 раз в импактной зоне. В минеральных горизонтах почвы содержание обоих металлов очень резко снижается. В буферной зоне в подзолистом горизонте это снижение составляет 16–36 раз, в верхнем иллювиальном горизонте (B_1) происходит примерно 2-кратное увеличение содержания тяжелых металлов, которое снижается с увеличением глубины, и в горизонте С (подстилающей породе) достигает минимальных величин. На территории импактной зоны подзолистый горизонт не всегда выражен, довольно часто сразу под лесной подстилкой формируется иллювиальный горизонт В, в верхней части которого содержание тяжелых металлов меньше в 60–90 раз по отношению к подстилке. С увеличением глубины концентрации обоих металлов постепенно снижаются и в подстилающей породе (горизонт С) достигают минимальных значений, составляющих 3–5 мг/кг.

На территории импактной зоны часто нарушено строение почвенного профиля вследствие разрушения напочвенного покрова, снижения толщины лесной подстилки вплоть до ее полного отсутствия. Тем не менее сохраняющаяся лесная подстилка продолжает выполнять роль биогеохимического барьера на пути токсикантов вглубь почвенного профиля за счет накопления органических веществ, связывающих тяжелые металлы в органо-минеральные комплексы.

Глава 6. Накопление тяжелых металлов в разных органах *Vaccinium myrtillus* и *V. vitis-idaea*

6.1. Содержание тяжелых металлов в вегетативных органах ягодных кустарничков

При мониторинге загрязнения окружающей среды наиболее часто используют, так называемую, листовую диагностику, т.е. измеряют содержание токсикантов в ассимиляционных органах растений. Анализ распределения концентраций тяжелых металлов позволяет оценить барьерные функции различных органов растений на пути токсикантов из загрязненной почвы в надземные части растений.

Сравнительный анализ содержания тяжелых металлов в вегетационных органах двух исследуемых видов ягодных кустарничков показал следующее. В фоновом районе содержание Ni и Cu в различных органах обоих видов было примерно одинаковым и варьировало в нешироком интервале 2.0–7.4 мг/кг (табл. 3). Содержание Co было минимальным во всех вегетативных органах обоих видов кустарничков.

На территории буферной зоны максимальные концентрации тяжелых металлов обнаружены в подземных органах (побеги+корни) (табл. 3), где содержание Ni может быть примерно равным его концентрации в листьях (ПП3), а может превышать почти в 9 раз (ПП28). Для содержания Cu также характерно достаточно широкое варьирование от 1.5 (ПП27) до 10-кратных различий (ПП3). Наименьшие отличия в содержании тяжелых металлов в вегетативных органах кустарничков от их фоновых значений зарегистрированы на ПП27 (северо-восточное направление от источника загрязнения), где они не превышают 23 раз, а наибольшие на ПП3 (юго-западное направление), где они достигают 15 раз.

В пределах импактной зоны наблюдаются аналогичные закономерности: так же, как и в буферной зоне тяжелые металлы концентрируются в подземных органах (табл. 3), где содержание Ni примерно одинаково на ПП10 и ПП29, а содержание Cu в подземных органах на ПП10 (северо-восточное направление от источника загрязнения) примерно в 2 раза больше такового на ПП29 (юго-западное направление). Содержание тяжелых металлов в листьях *V. myrtillus* существенно (в 3–14 раз) превышает таковое в листьях *V. vitis-idaea*. На территории импактной зоны зарегистрированы наибольшие отличия содержания

тяжелых металлов от их фоновых величин. Так, содержание Ni в подземных органах кустарничков в 60–90, а Cu в среднем в 30 раз превышает их фоновые значения. В то же время содержание Cu в листьях исследуемых кустарничков различается в зависимости от их видовой принадлежности: если в листьях *V. myrtillus* этот металл накапливается в 4.5–14 раз больше в импактной зоне, то в листьях *V. vitis-idaea* его содержание достоверно не отличается от фонового значения.

Таблица 3. Содержание (мг/кг) тяжелых металлов в вегетативных органах *Vaccinium myrtillus* и *Vaccinium vitis-idaea* по градиенту загрязнения

№ ПП	Орган	Ni	Cu	Co
	Фоновый район			
У	Листья	4.1±0.1 2.3±0.2	4.0±0.1 2.5±0.04	н.п.о.
	Стебли	2.0±0.1 3.3±0.2	4.3±0.1 6.5±0.3	н.п.о.
	Подземные побеги+корни	4.1±0.1 4.6±0.1	4.2±0.1 7.4±0.03	н.п.о.
	Буферная зона			
27	Листья	6.6±0.04 3.3±0.2	5.4±0.2 3.2±0.2	н.п.о.
	Стебли	3.7±0.04 3.9±0.1	5.9±0.1 5.7±0.1	н.п.о.
	Подземные побеги+корни	9.3±0.5 12.3±0.3	8.9±0.7 14.2±0.3	н.п.о.
28	Листья	14.9±1.3 9.8±1.2	5.7±0.8 3.0±0.3	н.п.о.
	Стебли	9.3±0.2 13.4±0.7	4.9±0.1 5.0±0.2	н.п.о. 0.46±0.1
	Подземные побеги+корни	22.4±3.7 86.1±8.0	14.1±4.5 46.0±0.2	0.52±0.11 1.24±0.1
3	Листья	30.5±1.0 11.9±1.2	8.1±0.8 3.0±0.2	0.77±0.02 н.п.о.
	Стебли	13.7±0.7 16.1±0.6	5.5±0.1 6.2±0.03	0.75±0.08 н.п.о.
	Подземные побеги+корни	31.1±1.5 67.5±1.1	25.2±0.8 34.3±0.6	н.п.о. 1.1±0.02
	Импактная зона			
29	Листья	213±6 70.9±0.2	18.7±3.4 4.0±0.2	3.91±0.04 1.56±0.01
	Стебли	99.8±8.7 117±8	8.9±0.1 17.4±3.4	2.25±0.3 3.6±0.2
	Подземные побеги+корни	202±27 292±3	73.8±11.7 106±5	3.58±0.39 5.5±0.1
10	Листья	181±35 58.6±5.2	56.0±28.2 4.3±0.4	3.58±0.9 1.0±0.1
	Стебли	151±2 110±3	52.4±0.2 28.4±4.8	4.95±0.03 3.31±0.02

	Подземные побеги+корни	287±5 426±59	180±15 210±42	6.22±0.07 12.3±4.4

Над чертой – *V. myrtillus*, под чертой – *V. vitis-idaea*. н.п.о. – ниже предела обнаружения.

Интересно отметить, что на ПП27 зарегистрировано повышенное в 3–4 раза содержание Fe в надземных органах обоих видов кустарничков по сравнению с данными на ПП28 и ПП3. Расположенная в северо-восточном направлении от комбината «Североникель» ПП27 наиболее близко находится от Оленегорского горно-обогатительного комбината, атмосферные выбросы которого обогащены соединениями железа. Полученные данные о повышенном содержании Fe в надземных органах ягодных кустарничков согласуются с данными обследования снегового покрова, в жидкой фазе которого на этой пробной площади также наблюдается повышенное содержание железа.

Для оценки миграции тяжелых металлов из загрязненной почвы в надземную часть ягодных кустарничков был проведен корреляционный анализ данных, который показал высокую степень скоррелированности содержания Ni и Cu в лесной подстилке и во всех вегетативных органах кустарничков ($r=0.70–0.97$, $p<0.05$).

Согласно литературным данным (Мазная, Лянгузова, 2010), в период высоких объемов атмосферных выбросов комбинатом «Североникель» максимальным накоплением тяжелых металлов отличались подземные органы обоих исследуемых видов кустарничков, содержание Ni и Cu многократно (в 25–100 раз) превышало их концентрации в листьях кустарничков, особенно на территории импактной зоны. Проведенные исследования в период резкого снижения объемов атмосферных выбросов комбинатом «Североникель» выявили схожую картину. Распределение содержания тяжелых металлов по органам представляет убывающий ряд подземные побеги+корни >> листья ≥ стебли. Таким образом, на фоне резко сниженной аэротехногенной нагрузки сохраняется возрастание содержания тяжелых металлов во всех вегетативных органах ягодных кустарничков по мере приближения к источнику загрязнения. На территории импактной зоны по-прежнему регистрируется максимальное содержание Ni и Cu во всех вегетативных органах обоих исследуемых видов кустарничков, которое превышает их фоновые величины в 30–90 раз. Подземные органы (побеги+корни) как *Vaccinium myrtillus*, так и *V. vitis-idaea* выполняют свою барьерную роль на пути токсикантов из загрязненного верхнего органогенного горизонта подзолов в надземные органы кустарничков.

6.2. Содержание тяжелых металлов в ягодах исследуемых видов кустарничков

Плоды дикорастущих ягодных кустарничков употребляются в пищу не только местным населением, но также птицами и различными видами животных, поэтому важно было провести эколого-токсикологическую оценку качества ягод исследуемых видов.

Сравнительный анализ содержания тяжелых металлов в ягодах исследуемых видов кустарничков показал их минимальные величины по отношению к вегетативным органам кустарничков. Даже на территории импактной зоны содержание Ni в ягодах превышало его фоновые величины не более чем в 10 раз, а Cu лишь в 2 раза, за исключением ягод *V. myrtillus* , собранных на ПП29, где концентрации Ni и Cu составляли 77 и 37 мг/кг. Содержание Pb во всех образцах ягод было ниже предела определения, а Cd (0.15 мг/кг) был обнаружен лишь в ягодах черники, собранной на ПП29.

Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (2021) регламентируют лишь содержание некоторых тяжелых металлов (Pb, Cd, Hg) в плодоовощной продукции, включающей фрукты и ягоды. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии Pb и Cd в дикорастущих ягодах, за исключением одного образца ягод черники. Однако повышенное в 10 раз содержание Ni, относящегося к I классу опасности, в ягодах черники на территории импактной зоны является потенциально опасным при употреблении ягод в пищу.

В заключение следует добавить, что для обеспечения безопасности потребителей рекомендуется ограничить сбор ягод и лекарственного сырья (облиственные побеги *V. myrtillus*, листья *V. vitis-idaea*) в импактной зоне (в радиусе 15–20 км от комбината «Североникель») для пищевых и медицинских целей вследствие повышенного содержания потенциально опасных металлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы:

Проведенное исследование позволило выявить закономерности в распределении тяжелых металлов в системе "промышленный источник – окружающая среда – почва – растения". Полученные данные свидетельствуют о сложном взаимодействии природных и антропогенных факторов, определяющих миграцию и накопление металлов в экосистемах.

Несмотря на резкое сокращение объемов атмосферных выбросов комбинатом «Североникель» в последние 25 лет, выпадение загрязняющих веществ на наземную поверхность лесных экосистем остается очень значительным, особенно на территории импактной зоны, где содержание водорастворимых форм Ni превышает его фоновый уровень в 3–6 раз. Основная масса выпадающих соединений тяжелых металлов представляет собой труднорастворимые техногенные частицы, содержание Ni и Cu в твердой фазе снегового покрова многократно (10000–30000 раз) превышает концентрации их водорастворимых форм.

Фитотоксичность Al-Fe-гумусовых подзолов остается на высоком (буферная зона) и очень высоком (импактная зона) уровне, содержание тяжелых металлов (Ni и Cu) в верхнем органогенном горизонте почв превышает их фоновые региональные значения соответственно в 5–20 раз (буферная зона) и 70–200 раз (импактная зона). Лесная подстилка сохраняет свои свойства биогеохимического барьера на пути токсикантов вниз по почвенному профилю: в подзолистом горизонте содержание тяжелых металлов снижается в 10–30 раз (буферная зона), а в иллювиальном горизонте это снижение может достигать 60–90 раз (импактная зона).

На основе рентгенофазового анализа минеральных горизонтов Al-Fe-гумусовых подзолов установлено отсутствие влияния аэротехногенного загрязнения на содержание основных породообразующих минералов (кварц, плагиоклаз, пироксен, амфибол, биотит).

В условиях современного уровня аэротехногенного загрязнения при сниженных объемах атмосферных выбросов комбинатом «Североникель» в последние 25 лет сохраняется закономерность возрастания содержания тяжелых металлов во всех органах ягодных кустарничков по мере приближения к источнику загрязнения. На территории импактной зоны по-прежнему регистрируется максимальное содержание Ni и Cu во всех вегетативных органах обоих исследуемых видов кустарничков, которое превышает их фоновые величины в 30–90 раз. Подземные органы (побеги+корни) как *Vaccinium myrtillus*, так и *V. vitis-idaea* выполняют свою барьерную роль на пути токсикантов из загрязненного верхнего органогенного горизонта подзолов в надземные органы кустарничков, при этом

минимальные концентрации тяжелых металлов зарегистрированы в репродуктивных органах (ягодах) растений.

Деятельность Оленегорского горно-обогатительного комбината (ГОК) вносит дополнительный вклад в загрязнение окружающей среды Кольского полуострова, особенно железом и другими металлами, что приводит к повышенному содержанию Fe в разных органах ягодных кустарничков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьевская Е. Л., Седова Н. Б., Слипенчук М. В., Цымбал М. Н. Геоэкологические исследования снега и поверхностных вод в зимний период в центральной части Кольского полуострова // Теоретическая и прикладная экология. – 2020. – № 1. – С. 64–70.
2. Таловская А. В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири: по данным изучения состава нерастворимого осадка снегового покрова: дис. … д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 373 с.
3. 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.
4. Кизеев А.Н. Состояние окружающей природной среды в районе расположения предприятий цветной металлургии (Мурманская обл.) // Internation Journal of applied and fundamental research. 2014. № 11. С. 502–506.
5. Методы изучения лесных сообществ. СПб., 2002. 240 с.
6. KashulinaG., Caritat P., Reimann C. Snow and rain chemistry around the “Severonikel” industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis // Atmospheric Environment. 2014. N 89. article 672e682
7. Мазная Е.А, Лянгузова И.В. Эколого-популяционный мониторинг ягодных кустарничков при аэротехногенном загрязнении. СПб., 2010. 195 с.
8. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. СанПиН 2.3.2.1078-01. М., 2021. 365 с.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АСПИРАНТОМ ПО ТЕМЕ НКР

1. Лянгузова И.В., Примак П.А., Волкова Е.Н., Салихова Ф.С. Пространственное распределение запасов напочвенного покрова и лесной подстилки в фоновых и дефолиирующих сосновых лесах Кольского полуострова // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56, вып. 4. С. 335–350. DOI: 10.31857/S0033994620040068
2. Лянгузова И.В., Примак П.А., Салихова Ф.С., Волкова Е.Н., Беляева А.И. Воздействие загрязнения почв тяжелыми металлами на пространственное распределение биомассы напочвенного покрова и запаса лесной подстилки в сосновых лесах Кольского полуострова // Растительные ресурсы. 2021. Т.57, вып. 4. С. 340–358. DOI: 10.31857/S0033994621040087
3. Лянгузова И.В., Беляева А.И., Катаева М.Н., Волкова Е.Н. Запасы потенциально токсичных элементов в напочвенном покрове сосновых лесов северной тайги при аэротехногенном загрязнении // Ботанический журнал. 2023. Т. 108, №11. С. 1001–1014.
4. Лянгузова И.В., Волкова Е.Н., Примак П.А. Оценка влияния эдификатора на запас напочвенного покрова сообществ северотаежных сосновых лесов в зоне воздействия металлургического комбината // XXI Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования»: Мат-лы конф. М., апрель–сентябрь 2020. Т. 1. С. 132–136.
5. Е.Н. Волкова, Ф.С. Салихова, И.В. Лянгузова. Внутриценотическая неоднородность уровня загрязнения и запаса подстилки в сосновых лесах Кольского полуострова // IV Молодежная конференция «Почвоведение: Горизонты будущего». Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, 11-14 февраля 2020 года. Стр. 33–34.
6. Лянгузова И.В., Волкова Е.Н. Содержание тяжелых металлов в снеговом покрове и хвое можжевельника в зоне воздействия комбината «Североникель»//Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Материалы VIII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук и 35-летию Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. Апатиты, 24–29 июня 2024 г. / ответственный редактор Д. В. Макаров. — Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2024. С. 53–54.