

ВВЕДЕНИЕ

Цель – выявить особенности распространения чувствительных к загрязнению видов мхов после сокращения выбросов Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ) в зависимости от типа субстрата и уровня загрязнения.

Гипотеза: Уровень нагрузки и тип субстрата существенно влияют на процессы реколонизации загрязненных территорий чувствительными видами мхов после сокращения выбросов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследования: окрестности Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ), окраина г. Ревда, подзона южной тайги (рис. 1). Основные компоненты выбросов – оксиды серы, тяжелые металлы (Cu, Fe, Zn, Pb, Cd и др.) и металлоиды (As). В 1980 г. объем – 140 тыс. т/год, после реконструкции в 2010 г. – 3–5 тыс. т/год [Трубина и др., 2022].

В 1994 г. в радиусе 2 км от завода – только 1 вид (*Pohlia nutans*), на расстоянии 4 км – 10 видов [Гольдберг, 1997]. В 2016 г. в радиусе 2 км только *Pohlia nutans*, а в радиусе 4 км – 7 видов. Несмотря на многократное сокращение выбросов вблизи завода сохраняется крайне низкое видовое разнообразие и встречаемость большей части видов [Трубина, Дьяченко, 2020].

Объект: типичные для ненарушенных лесов представители эпигейных мхов, с высокой чувствительностью к загрязнению (рис. 2) [Трубина, Дьяченко, 2020].

Литература



Рис. 2. Представители: 1 – *Climacium dendroides*, 2 – *Hylocomium splendens*, 3 – *Ptilium crista-castrensis*, 4 – *Pleurozium schreberi*, 5 – *Rhodobryum roseum*, 6 – *Dicranum scoparium*, 7 – *Rhytidiadelphus triquetrus*.

Методы: исследования проведены в июле 2025 г. на 18 пробных площадях (ПП) размером 25×25 м, заложенных в елово-пихтовых лесах. Для выявления присутствия/отсутствия вида в пределах каждой ПП использовали метод активного поиска на двух типах субстрата: 1 – подстилка и минеральная почва (Под), 2 – древесные субстраты (ДС). Показатель эффективности заселения субстратов – видовое богатство (ВБ) мхов на площади 625 м².

Концентрацию ТМ определяли методом атомной абсорбции на спектрометре AAS-3 (Analytik Jena, Германия). Кислотность (pH) субстратов измеряли с помощью ионометра inoLab740 (WTW, Германия).

Для определения значимости влияния уровня загрязнения и типа субстрата на ВБ использовали обобщенную линейную модель (GLM) с непрерывными и категориальными предикторами. Данные ТМ и ВБ были прологарифмированы (Ln).

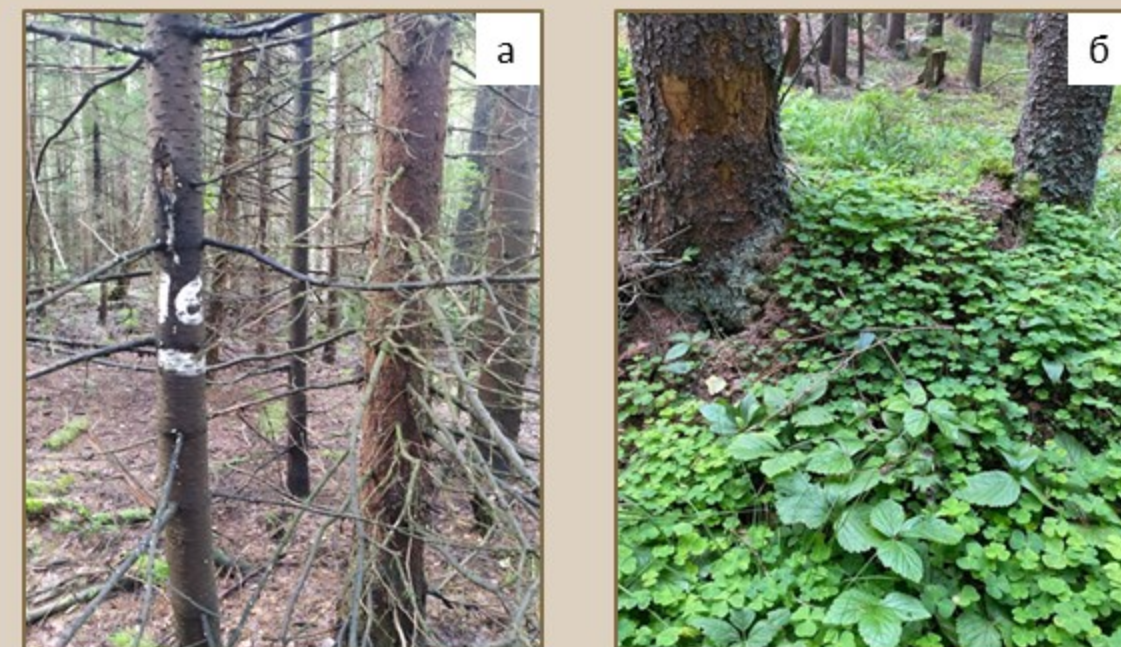


Рис. 1. Елово-пихтовый лес в зоне действия СУМЗ: а – на 1 км; б – на 30 км.



РЕЗУЛЬТАТЫ

Как меняются химические характеристики субстратов по мере приближения к заводу?

Содержание меди и свинца существенно увеличивается по мере приближения к заводу (рис. 3 (а,б)). Наибольшее содержание ТМ отмечено в подстилке. Влияние расстояния и типа субстрата на содержание ТМ было статистически значимо (табл. 1).

Существенное изменение pH по мере приближения к заводу не выявили (табл. 1) Субстраты различаются по pH (в подстилке pH несколько выше), но по мере приближения к заводу разница нивелируется (рис. 3 (в)).

Таблица 1 – Результаты GLM по оценке влияния расстояния и типа субстрата на их хим. характеристики

Фактор	df	Cu		Pb		pH	
		F	P	F	P	F	P
Расстояние	1	338,24	<0,001	213,08	<0,001	1,19	0,283
Субстрат	1	10,91	0,002	25,32	<0,001	15,58	<0,001
Ошибка	33						

Прим.: F – критерий Фишера, p – уровень значимости.

Меняется ли ВБ чувствительных видов в зависимости от уровня нагрузки на разных субстратах?

Число видов уменьшается по мере приближения к заводу и увеличения уровня нагрузки на обоих субстратах (рис. 4). На ДС отмечено большее ВБ, чем на подстилке.

Наибольшую активность в заселении загрязненных территорий показали 4 вида мхов, встретившихся на 2 км на ДС (табл. 2). *Pleurozium schreberi* присутствовал на 4 км сразу на двух субстратах, на 2 км – только на древесине. Это может говорить о разной способности чувствительных видов к заселению нарушенных территорий после сокращения нагрузки.

Таблица 2 – Распространение видов на разном удалении от СУМЗа

Вид	Удаление от завода и субстрат									
	1 км		2 км		4 км		7 км		30 км	
	П	ДС	П	ДС	П	ДС	П	ДС	П	ДС
<i>Hylocomium splendens</i>	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+
<i>Ptilium crista-castrensis</i>	-	-	+	-	+	+	+	-	-	+
<i>Pleurozium schreberi</i>	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Rhodobryum roseum</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-
<i>Climacium dendroides</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+
<i>Dicranum spp.</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
<i>Rhytidiadelphus spp.</i>	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+

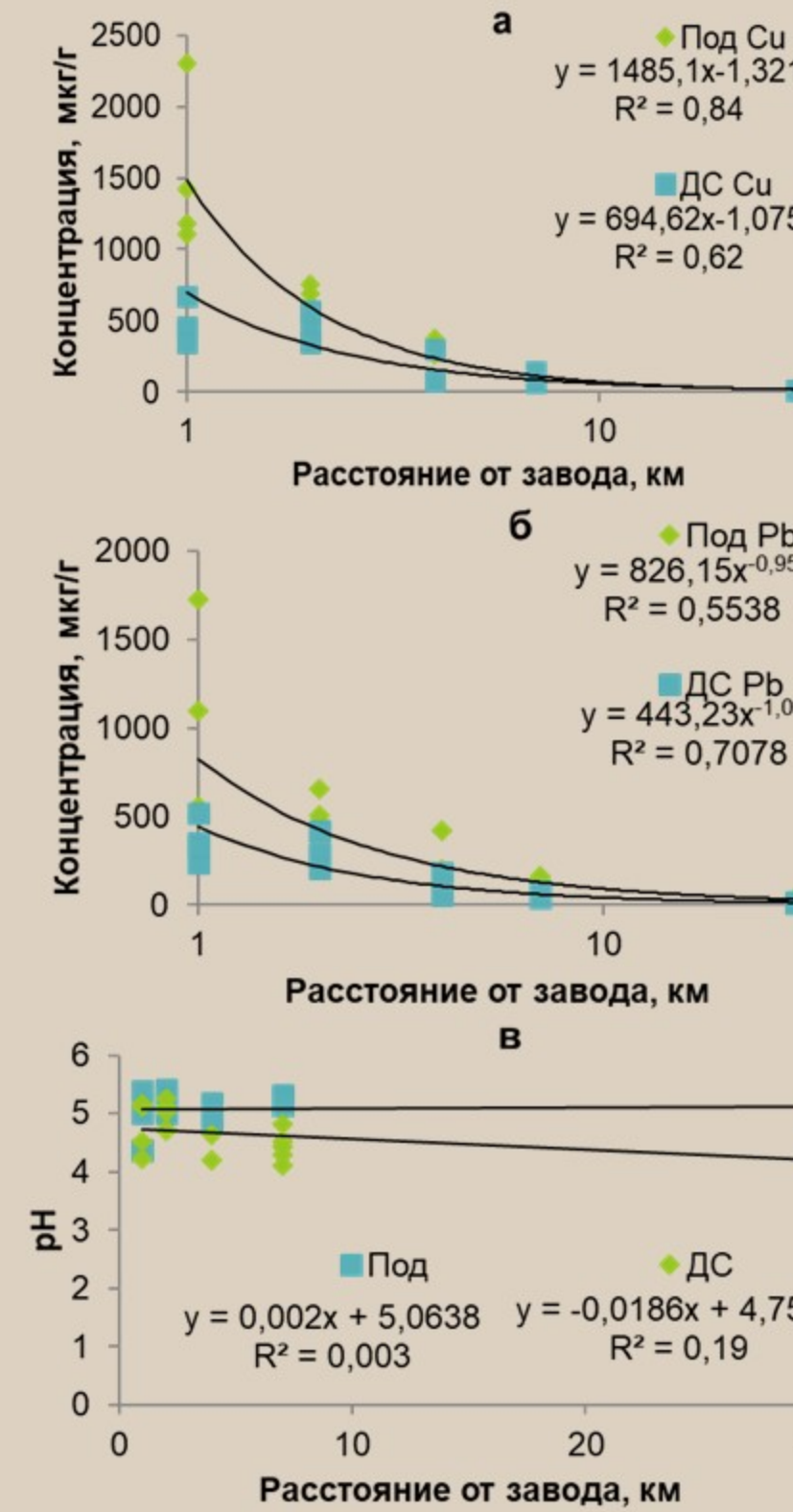


Рис. 3. Изменение содержания Cu (а), Pb (б) и pH (в) в субстратах в зависимости от расстояния до СУМЗа

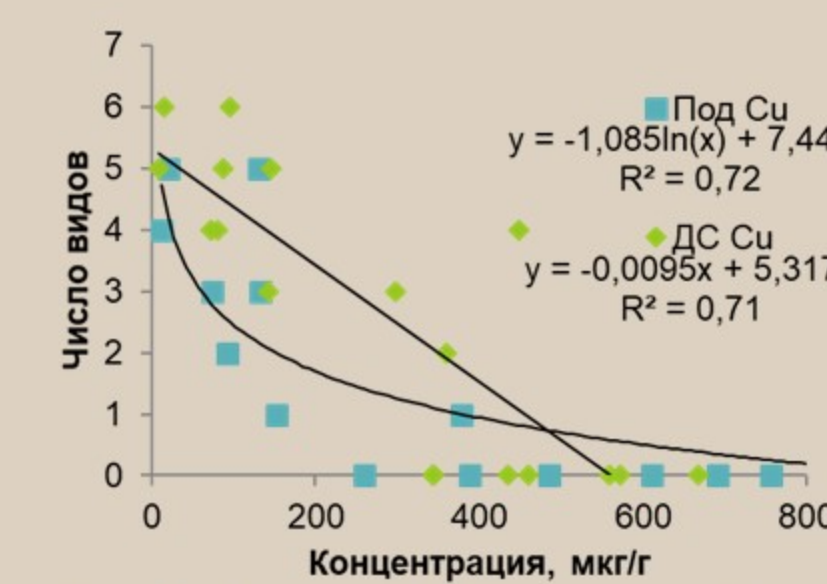


Рис. 4. Изменение ВБ на разных субстратах в зависимости от уровня нагрузки

Связаны ли наблюдаемые изменения в числе видов с химическими характеристиками субстратов?

Проведенный анализ показал, что ТМ и pH существенно влияют на ВБ (табл. 3) Когда мы контролируем содержание ТМ, влияние субстрата статистически значимо ($p=0,03$), но, когда мы учитываем изменение pH и содержание Cu – различие между субстратами не проявляется ($p=0,313$).

Таблица 3 – Результаты GLM по оценке влияния факторов на ВБ

Прим.: df – число степеней свободы, F – критерий Фишера, p – уровень значимости.

Фактор	df	F	p
Cu	1	23,09	<0,001
pH	1	5,85	0,024
Субстрат	1	0,01	0,911
Ошибка	24		

По данным регрессионного анализа (табл. 4) в число значимых переменных для числа видов на подстилке вошло только содержание меди ($R^2 = 0,64$), для числа видов на ДС – содержание свинца и pH ($R^2 = 0,65$). Однако остаётся значительная часть необъяснимой доли дисперсии (около 35%), влияющая на ВБ.

Таблица 4 – Результаты пошаговой гребневой множественной регрессии по оценке влияния хим. характеристик на ВБ

N=14	Фактор	b*	Std.Err.	b	Std.Err.	t	p-value
Под	Cu	-0,777	0,160	-0,452	0,093	-4,871	<0,001
ДС	pH	-0,485	0,190	-1,016	0,398	-2,550	0,027
	Pb	-0,417	0,190	-0,276	0,126	-2,193	0,051

Прим.: b – регрессионный коэфф., Std.Err. – стандарт. ошибка, p – уровень значимости.

Изменение общего числа видов на разном удалении от завода хорошо согласуется с динамикой ВБ в зависимости от уровня загрязнения (рис. 5).

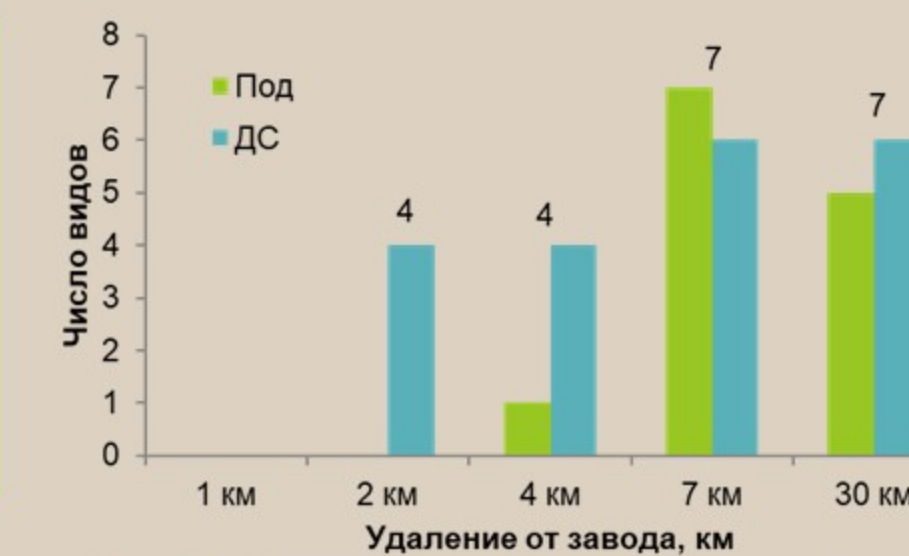


Рис. 5. Изменение ВБ на разном удалении от завода на подстилке и ДС (сверху – общее)

ВЫВОДЫ

Тестируемая гипотеза в ходе исследований подтвердилась. Через 15 лет после почти полного прекращения выбросов СУМЗа в депонирующих средах (подстилке и ДС) в окрестностях завода сохраняются высокие концентрации ТМ. Наибольшее содержание отмечено в подстилке.

Уровень нагрузки и тип субстрата существенно влияют на процессы реколонизации загрязненных территорий чувствительными видами мхов. Заселение сильно загрязненных территорий может отсутствовать в течение десятилетий после почти полного прекращения выбросов. Заселение ДС происходит быстрее, чем заселение подстилки, но по мере удаления от завода дифференциация субстратов по видовому богатству уменьшается.

Различия между субстратами по числу видов в значительной степени обусловлены разной кислотностью субстратов. Однако содержание ТМ и pH объясняет лишь около 65% наблюдаемой общей дисперсии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность своему научному руководителю с.н.с. к.б.н. Трубиной М. Р. за неоценимую помощь в ходе работы. Отдельная благодарность Орехову Т. Н. и лаборатории почвоведения за помощь с хим. анализом.