

СНИЖЕНИЕ ДЛИНЫ ПОГЛОЩАЮЩИХ КОРНЕЙ ПИХТЫ СИБИРСКОЙ И ЕЛИ СИБИРСКОЙ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И SO₂*

© 2003 г. Д. В. Веселкин

Институт экологии растений и животных УрО РАН

620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

Поступила в редакцию 22.11.2002 г.

Поглощающие корни, тяжелые металлы, пихта сибирская, ель сибирская.

Подавление роста корней – одно из наиболее общих и неспецифических проявлений токсического действия тяжелых металлов на растения [6, 9, 10]. Это явление лежит в основе метода корневого теста и обусловлено в первую очередь нарушением роста клеток растяжением [10]. К настоящему времени установлены негативные реакции корневых систем хвойных растений на загрязнение природных экосистем тяжелыми металлами, выражающиеся в подавлении их роста и отмирании [3, 8, 11, 12].

В данном сообщении анализируется изменение длины поглощающих корней пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в условиях крупномасштабного загрязнения естественных лесов промышленными выбросами, содержащими полиметаллическую пыль и сернистый ангидрид.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Работы проведены в темнохвойных лесах южнотаежно-лесорастительного округа Среднеуральской низкогорной провинции на 15 пробных площадях, заложенных на различном расстоянии (1–30 км) от Среднеуральского медеплавильного завода, основными компонентами выбросов которого являются газообразные (SO₂) и твердые промышленные отходы, содержащие Cd, Cu, Zn, Pb и As. Исследованные древостои относятся к липняковым и кисличниковым елово-пихтовым лесам, которые расположены в верхних и средних частях пологих склонов. С ростом уровня загрязнения существенно трансформируются все основные компоненты лесных экосистем: древостои, живой напочвенный покров, почва. На расстояниях 0–2 км от источника выбросов леса полностью разрушены или сильно повреждены; признаки техногенной деградации лесов обнаруживаются в зависимости от румба до отметок в 7–10 км от границы завода [4, 5, 7].

Характеристика исследованных пробных площадей и древостоев приведена ранее [2]; почвы определены как серые лесные. Основываясь на имеющихся данных [8], морфологию почв при разных уровнях загрязнения можно охарактеризовать следующим образом. При сильном загрязнении:

A₀'-A_{0T}-A_{0L}-A₁-A₁Bh-B₁h-B₂-BC. При умеренных нагрузках строение почв в целом такое же: A₀-A₁-A₁Bh-B₁h-B₂-BC, но варьирует строение подстилки (A₀'-A_{0T}-A_{0L}, или A₀'-A₀''-A_{0T}, или A₀'-A₀''). На фоновой территории вариантов профиля больше: A₀'-A₀''-A₁-A₁Bh-B₁h-B₂-BC, A₀'-A₀''-A₁-A₁Bh-A₂B-B₂-BC, A₀'-A₀''-A₁-A₂-A₂B-B₂-BC. На морфологическом уровне техногенная трансформация почв отчетливо проявляется в формировании мощных специфических органогенных горизонтов, кроме этого уменьшается агрегированность почв, изменяется характер потечности гумуса, образуется большое количество железистых стяжений [7, 8]. Установлено [1], что при высоком уровне загрязнения органогенные горизонты (лесная подстилка) не заселяются тонкими корнями пихты, ели и сосны в противоположность умеренно нарушенным и фоновым территориям.

На каждой пробной площади отобраны 10 особей подроста ели и пихты и корни деревьев пихты первого яруса: по 5 проб из лесной подстилки (при условии присутствия в ней корней), гумусового (непосредственно под подстилкой) и элювиального почвенного горизонта. С приближением до 1 мм измерена длина 35–50 случайно отобранных у одной особи или из одной пробы поглощающих корней, ростовые корни не измеряли.

Уровень техногенного загрязнения территорий определен на основании концентраций кислоторастворимых форм трех приоритетных для данного района поллютантов (Cu, Cd, Pb), измеренных в подстилке. Индекс загрязнения рассчитан как отношение суммы превышений концентраций металлов в данной точке над минимальной фоновой концентрацией к соответствующему минимальному фоновому показателю. Индекс показывает во сколько раз превышен в данной точке фоновый уровень загрязнения по всему комплексу поллютантов. Обоснования выбора данного индекса как показателя загрязненности территории приведены в [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В условиях наибольшей техногенной нагрузки длина поглощающих корней у подростка ели снижается на 25% по

* Исследования поддержаны РФФИ и Правительством Свердловской области (проект 01-04-96407).

Изменение средней ($\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$) длины поглощающих корней ели и пихты, мм

Объект, горизонт почвы	Удаление от завода (км) и значения индекса загрязнения, усл. ед.				
	30	7	4	2	1
	1.0–1.2	4.4–6.2	7.1–14.6	17.2–19.3	25.2–33.0
Ель, подрост	3.09 ± 0.10	2.82 ± 0.10*	2.83 ± 0.11	2.32 ± 0.09***	–
Пихта, подрост	4.17 ± 0.16	3.68 ± 0.16*	3.78 ± 0.14	3.60 ± 0.15*	–
Пихта, первый ярус, подстилка	5.30 ± 0.17	5.66 ± 0.18	4.58 ± 0.14**	3.22 ± 0.17***	–
гумусовый горизонт	5.60 ± 0.17	4.90 ± 0.13**	5.55 ± 0.17	3.04 ± 0.10***	2.94 ± 0.15***
элювиальный	4.86 ± 0.15	5.07 ± 0.12	4.90 ± 0.14	3.26 ± 0.08***	3.37 ± 0.08***

* $P < 0.05$.

** $P < 0.01$.

*** $P < 0.001$.

Примечание. \bar{x} – среднестатистическое значение, $s_{\bar{x}}$ – стандартная ошибка.

сравнению с фоновыми показателями, у подростка пихты – на 14%. У деревьев пихты первого яруса в данных условиях длина поглощающих корней снижается в лесной подстилке на 40%, в гумусовом горизонте – на 46–48% и в элювиальном – на 31–33% (таблица). Судя по значениям коэффициентов вариации, рассчитанных для всей совокупности корней для каждой зоны по мере удаления и между пробами (особями) при одинаковом удалении, характер варьирования изученного признака существенно не изменяется в зависимости от уровня загрязнения территории. В первом случае значения коэффициентов вариации лежат в пределах 41.0–55.5%, во втором – в пределах 7.2–16.5%.

Снижение средней длины поглощающих корней является внешним, морфологически улавливаемым проявлением реакций подавления ростовых процессов. О повреждении подземных органов хвойных в данном техногенном градиенте свидетельствует также наблюдаемое возрастание встречаемости отмирающих клеток экзодермы в микоризных окончаниях при приближении к предприятию и полное исчезновение тонких корней из лесной подстилки при наибольших уровнях техногенной нагрузки [1].

Более ярко выраженное снижение длины корней в верхнем минеральном слое почвы по сравнению с элювиальным горизонтом подтверждает, по нашему мнению, что данная реакция определяется уровнем загрязнения или токсичности вмещающих субстратов, который снижается не только при удалении от источника выбросов, но и сверху вниз в почвенном профиле [5–7, 9]. По нашим наблюдениям, корни подростка в условиях наибольшего загрязнения проявляют тенденцию осваивать наименее загрязненные субстраты (валеж, бугры ветровальных почвенных комплексов), с чем может быть связано менее выраженное снижение длины корней у этих объектов по сравнению с деревьями первого яруса.

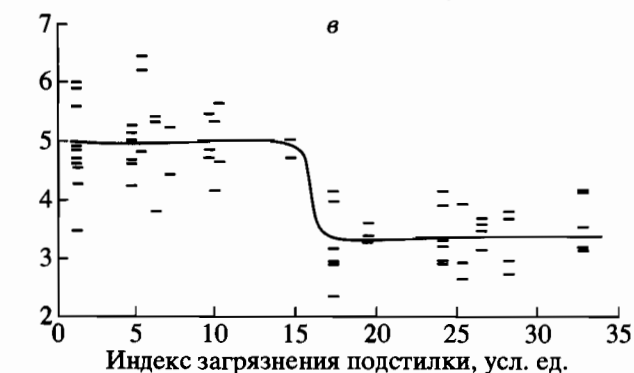
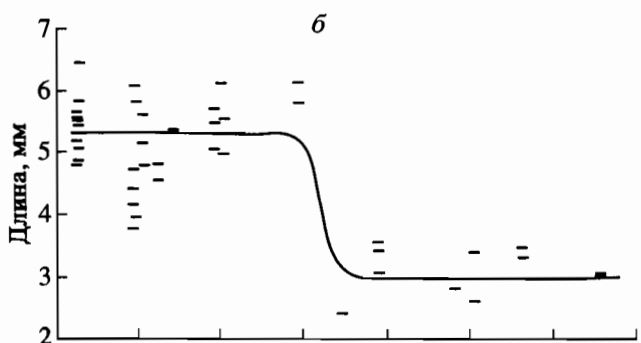
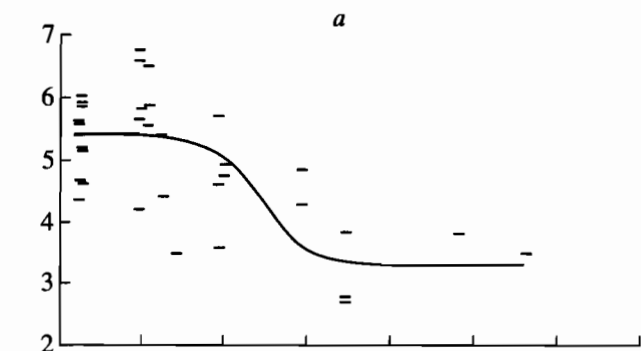
Учитывая, что у подростка отбор корней для измерения проведен без учета почвенного горизонта, в котором они были локализованы, наиболее надежными и информативными являются реакции, установленные в отношении корней взрослых пихт. Связь длины корней пихты первого яруса с уровнем техногенной нагрузки наиболее адекватно описывается логистической кривой (рисунок). Коэффициенты детерминации (R^2) для уравнения логистической функции составляют: в подстилке – 0.39, в гумусовом горизонте – 0.72, в

элювиальном – 0.69. Соответствующие коэффициенты для уравнения прямой линии – 0.33, 0.57 и 0.54, для параболы второго порядка – 0.34, 0.57 и 0.55.

В минеральных горизонтах нелинейность зависимостей проявляется более явно, чем в подстилке. Параметр крутизны ступени, характеризующий резкость перехода от верхнего скопления точек к нижнему [5], составляет в подстилке 0.86 (зона перехода занимает 14% общей протяженности градиента), а в минеральных горизонтах – 0.96 и 0.98 (зоны перехода 4 и 2%, соответственно). Реакция в подстилке наступает раньше, чем в минеральных горизонтах: абсцисса средней критической точки составляет в подстилке 12.3 единицы, а ниже по профилю почвы – 16.0. В природе этот рубеж соответствует границе буферной и импактной зон техногенной нагрузки, когда концентрации Си в подстилке начинают превышать фоновые в 30–40 раз, Pb – в 11–13 раз. Здесь же наблюдается заметное подкисление среды: значения pH в подстилке и в верхней минеральной части почвы уменьшаются на 1–1.5 единицы [4].

Нелинейность дозо-эффектных зависимостей указывает, что негативное воздействие возрастающей загрязненности почв на состояние корней деревьев проявляется только при достижении некоторых критических уровней нагрузки. Это, однако, не означает, что пороговой (по типу “все или ничего”) является собственно реакция корней на техногенное изменение внешних условий. Более вероятным, учитывая, что в подстилке снижение длины корней происходит достаточно согласованно с ростом ее загрязненности, выглядит предположение о пороговом характере изменения условий, влияющих на рост корней в изученном градиенте. В таком случае регистрируемое резкое изменение длины корней является ответом на резкое изменение внешних условий, прежде всего – на возрастание токсичности почвы. Фактором, ответственным за повышение токсичности металлов в подстилке, может быть ее подкисление [4, 6, 9], вызывающее усиление негативного влияния на корни не только техногенных элементов, но и почвенного алюминия [8, 13, 14]. Резкое же изменение длины корней в минеральных горизонтах мы связываем, кроме этого, с пороговым характером потери буферных свойств подстилкой, что приводит к резкому возрастанию потока токсикантов через органический барьер [7].

Уменьшение линейных размеров поглощающих корней можно считать реакцией, связанной с ослаблением растения в целом, так как повышенная представленность укороченных корней у всходов пихты, произрастающих в данном районе, сопряжена с их угнетением [2].



Зависимость длины поглощающих корней у деревьев пихты сибирской от уровня техногенной нагрузки в подстилке (а), гумусовом (б) и элювиальном (в) горизонтах.

Заключение. В естественных лесах с ростом уровня загрязнения территории тяжелыми металлами установлено уменьшение длины поглощающих корней ели сибирской и пихты сибирской. Описываемый логистической кривой нелинейный характер зависимости длины корней от уровня техногенной нагрузки объясняется, по всей видимости, пороговым изменением условий существования корней при достижении критических уровней загрязнения почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Веселкин Д.В.* Распределение тонких корней хвойных деревьев по почвенному профилю в условиях

загрязнения выбросами медеплавильного производства // *Экология*. 2002. № 4. С. 250–253.

2. *Веселкин Д.В.* Строение и микоризация корней сеянцев ели и пихты при изменении почвенного субстрата // *Лесоведение*. 2002. № 3. С. 12–17.
3. Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова / Под ред. Б.Н. Норина и др. Л., 1990. 195 с.
4. *Воробейчик Е.Л.* Изменение мощности лесной подстилки в условиях химического загрязнения // *Экология*. 1995. № 4. С. 278–284.
5. *Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарофонтов М.Г.* Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
6. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в системе почва-растения. Новосибирск: Наука, 1991. 149 с.
7. *Кайгородова С.Ю.* Экологические особенности почвообразования в техногенных ландшафтах Среднего Урала: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. 03.00.16. Екатеринбург: ИЭРиЖ УрО РАН, 1998. 24 с.
8. *Кайгородова С.Ю., Воробейчик Е.Л.* Трансформация некоторых свойств серых лесных почв под действием выбросов медеплавильного комбината // *Экология*. 1996. № 3. С. 187–193.
9. *Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение.* Л.: Наука, 1990. 200 с.
10. *Растения в экстремальных условиях минерального питания: эколого-физиологические исследования /* Под ред. Школьника М.Я. и др. Л.: Наука, 1983. 176 с.
11. *Черненко Т.В.* Особенности прорастания семян сосны и ели при разной загрязненности почв тяжелыми металлами // *Влияние промышленных предприятий на окружающую среду.* М.: Наука, 1987. С. 168–182.
12. *Kocourek R., Bystřičan A.* Fine root and mycorrhizal biomass in norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) forest stands under different pollution stress // *Ecological and Applied Aspects Ecto- and Endomycorrhizal Associations.* Praha: Acad. Publ. House CAS, 1989. Pt. 1. P. 235–242.
13. *McQuattie C.J., Schier G.A.* Response of red spruce seedlings to aluminium toxicity in nutrient solution: alterations in root anatomy // *Can. J. For. Res.* 1990. V. 20. № 7. P. 1001 – 1011.
14. *Vogelei A., Rothe G.M.* Die Wirkung von Säure und Aluminium auf der Nährelementgehalt und der histologischen Zustand nichtmykorrhizierter Fichtenwurzeln (*Picea abies* [L.] Karst.) // *Forstw. Cbl.* 1988. B. 107. H. 4. S. 348–357.

Reduction of Absorbing Root Length in Siberian Fir and Siberian Spruce under Heavy Metal Pollution

D. V. Veselkin

The length of absorbing roots in Siberian fir and Siberian spruce trees is reduced in native forests under heavy metal pollution. The relationship between the root length and the level of technogenic loads is described by a logistic curve. It is determined by the threshold pattern of changes in soil conditions on the attainment of critical pollution levels.