

УДК 504.06 + 574.4

СОСТОЯНИЕ ТРАВЯНИСТОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ РАСТЕНИЯМИ, ПРОИЗРАСТАЮЩИМИ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ

© Ю.В. Батова, Н.М. Казнина, А.Ф. Титов, Г.Ф. Лайдинен

Ключевые слова: загрязнение почвы; тяжелые металлы; травянистая растительность; *Dactylis glomerata* L.; *Taraxacum officinale* F.H. Wigg.

Изучено влияние техногенного загрязнения почвы тяжелыми металлами на состояние травянистой растительности и содержание металлов в растениях. Установлено, что формирование растительных сообществ в условиях загрязнения происходит с участием небольшого числа видов, относящихся к семействам *Poaceae*, *Asteraceae* и *Apiaceae*. Выявлены межвидовые различия в накоплении и распределении тяжелых металлов в органах растений ежи сборной и одуванчика лекарственного.

Известно, что наиболее высокий уровень техногенной нагрузки на все компоненты природной среды, как правило, характерен для крупных городов и промышленных центров. Это связано с высокой концентрацией в них транспорта, различных предприятий и производств на относительно небольшой по площади территории [1]. Одними из наиболее опасных загрязнителей окружающей среды на таких урбанизированных территориях являются тяжелые металлы. Увеличение их содержания в окружающей среде и накопление в почве оказывают негативное влияние на биоту, включая растения, которые являются одним из наиболее чувствительных ее компонентов. Поэтому оценка состояния растительности является важной частью комплексного экологического мониторинга загрязненных территорий. Кроме того, сама способность растений накапливать тяжелые металлы в подземных и надземных органах может быть использована для индикации степени загрязнения окружающей среды [2], а также при фиторемедиации загрязненных почв [3].

Целью данного исследования явилось изучение состояния травянистой растительности, произрастающей в условиях техногенного загрязнения почвы тяжелыми металлами, и определение их содержания в органах растений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в г. Петрозаводск на участках, расположенных в непосредственной близости (на расстоянии 50–100 м) от двух крупных промышленных предприятий – Онежского тракторного завода (участок 2) и судостроительного завода «Авангард» (участок 3). Условно чистый участок (контроль) представлял собой заброшенный луг, находящийся в 20 км к востоку от г. Петрозаводск (участок 1).

Отбор почвенных образцов для химического анализа проводился на пробных площадках из верхних горизонтов на глубину до 10 см по методике, используемой при проведении мониторинга городских почв [4]. Сум-

марный коэффициент загрязнения почвы (Z_c) тяжелыми металлами рассчитывали по формуле:

$$Z_c = \sum K_{ci} - (n - 1),$$

где K_{ci} – коэффициент концентрации i -го элемента, равный частному от деления его концентрации в загрязненной и фоновой почвах; n – число определяемых элементов [5].

О влиянии загрязнения почвы на состояние растительного сообщества судили по изменению видового состава и проективного покрытия всех видов растений. Геоботанические описания осуществляли по общепринятым методикам [6] на пробных площадях размером 10×10 м ($n = 5$) в период цветения доминирующих видов.

Для анализа содержания тяжелых металлов в растениях были выбраны виды, произраставшие на всех изученных участках и относящиеся к двум ведущим семействам: ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) (сем. *Poaceae*) и одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* F.H. Wigg.) (сем. *Asteraceae*). Содержание тяжелых металлов в почве и растениях определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Коэффициент биологического поглощения (КБП) рассчитывали как отношение содержания элемента в корнях к его содержанию в почве [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химический анализ почвы показал повышенное валовое содержание всех изученных металлов вблизи промышленных предприятий (табл. 1), особенно на участке 3. Содержание тяжелых металлов в почве на этой территории было в 2,3–8,2 раза выше, чем на условно чистом участке. При этом содержание цинка, меди и свинца превышало ПДК в 1,5–2 раза. На основании суммарного коэффициента загрязнения (Z_c) почвы участков 2 и 3 следует отнести к категориям допустимого и умеренно опасного загрязнения соответственно [5].

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в почве
исследованных участков

Уча- сток	Содержание металла, мг/кг							Zc
	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Pb	
1	324,9	4,3	10,5	9,9	43,5	0,5	10,2	1
2	531,4	8,1	23,8	32,5	94,5	0,9	44,9	12
3	1609,0	9,8	30,1	80,8	181,9	2,9	65,1	19
ПДК*	1500	50	85	55	100	5	30	

Примечание: * – ПДК для Ni, Cu, Zn, Pb, Mn даны по [5], для Co, Mo – по [2].

В результате флористического анализа было обнаружено, что в сообществах, сформировавшихся на загрязненных участках, общее количество видов значительно ниже, чем на условно чистом участке (табл. 2).

В частности, если на участке 1 нами выявлено 34 вида покрытосеменных растений, относящихся к 15 семействам, то на участках 2 и 3 произрастало, соответственно, 23 и 16 видов растений, относящихся к 7 семействам.

Независимо от степени техногенного загрязнения на всех изученных участках общее проективное покрытие растительности было высоким (90–100 %), но участие в формировании растительного сообщества отдельных видов различалось (табл. 2). Так, в условиях загрязнения ведущие позиции в сообществах принадлежали небольшой группе видов, относящихся к семействам *Poaceae*, *Asteraceae* и *Apiaceae*, характеризующихся высокой устойчивостью к тяжелым металлам [8–10]. Доля видов этих семейств в общем проективном покрытии на участках 2 и 3 составила, соответственно, 74 и 82 %, тогда как на условно чистом участке – 62 %. При этом проективное покрытие видов семейства *Poaceae* на загрязненных участках сохранялась на высоком уровне (около 50 %), а количество видов, относящихся к семействам *Asteraceae* и *Apiaceae*, возрастало с увеличением количества тяжелых металлов в почве (табл. 2).

Для определения содержания тяжелых металлов в органах растений нами на основании флористического анализа были выбраны виды, представляющие два ведущих семейства: ежа сборная (сем. *Poaceae*) и одуванчик лекарственный (сем. *Asteraceae*). Результаты исследования показали, что для растений обоих видов было характерно сравнительно высокое содержание марганца, цинка и меди как в корнях, так и в побегах, что, очевидно, связано с выполняемой этими металлами физиологической ролью (табл. 3). Содержание же других металлов было относительно низким. При этом были выявлены определенные межвидовые различия. В частности, у ежи на всех изученных участках концентрация металлов в корнях оказалось значительно выше (в 2,5–10 раз), чем у одуванчика. По их содержанию в побегах растения различались в меньшей степени. Кроме того, у ежи содержание всех металлов в подземных органах превосходило их содержание в побегах в 2,5–24 раза, что свидетельствует о хорошо выраженной барьерной функции корней. В отличие от этого концентрация большинства изученных элементов в корнях и побегах одуванчика различалась незначительно, а ко-

Таблица 2

Влияние техногенного загрязнения почвы тяжелыми металлами на общее количество видов растений в сообществе и их проективное покрытие *

Семейство	Количество видов/проективное покрытие видов, %		
	участок 1	участок 2	участок 3
<i>Apiaceae</i>	–	3 / 5	3 / 7
<i>Asteraceae</i>	4 / 7	5 / 23	5 / 22
<i>Campanulaceae</i>	2 / 2	–	–
<i>Caryophyllaceae</i>	1 / 1	–	–
<i>Convallariaceae</i>	2 / 2	–	–
<i>Fabaceae</i>	4 / 10	4 / 15	3 / 5
<i>Geraniaceae</i>	1 / 2	–	–
<i>Hypericaceae</i>	1 / 2	–	–
<i>Lamiaceae</i>	1 / 1	–	–
<i>Onagraceae</i>	1 / 5	1 / 7	–
<i>Plantaginaceae</i>	–	–	1 / 3
<i>Poaceae</i>	8 / 50	8 / 46	4 / 53
<i>Polygonaceae</i>	2 / 5	–	–
<i>Ranunculaceae</i>	1 / +	–	1 / +
<i>Rosaceae</i>	3 / 12	1 / +	–
<i>Rubiaceae</i>	1 / +	–	–
<i>Scrophulariaceae</i>	1 / +	–	–
<i>Urticaceae</i>	–	1 (+)	1 / +
Общее количество видов	34	23	16
Общее проективное покрытие, %	100	96	90

Примечание: * прочерк – вид отсутствует; знак + – проективное покрытие вида < 1 %.

личество марганца, цинка и молибдена в надземных органах было даже выше, чем в корнях (табл. 3).

Содержание тяжелых металлов в органах растений зависело от степени загрязнения почвы и, как правило, возрастало при ее повышении. При этом наиболее существенным было увеличение в корнях и побегах количества кобальта, никеля и свинца. Однако необходимо отметить, что содержание ряда металлов в растениях на загрязненных участках оказалось ниже, чем на незагрязненном. Так, на участке 2 у растений ежи и одуванчика зафиксировано более низкое содержание цинка и молибдена в надземных и подземных органах, чем на участке 1 (табл. 3).

Количественной мерой, характеризующей способность растений аккумулировать тяжелые металлы, является коэффициент биологического поглощения [7]. Как видно из данных табл. 4, в условиях загрязнения почвы (участки 2 и 3) значения КБП в отношении большинства изученных металлов оказались ниже, чем у растений условно чистого участка, что свидетельствует о снижении интенсивности их поглощения. Аналогичные выводы ранее были сделаны и другими исследователями [8; 11], которые полагают, что это может быть связано как с уменьшением доступности элементов для растений вследствие изменения кислотности почвенного раствора или взаимного (антагонистического) влияния ионов, так и с активизацией у них механизмов, поддерживающих постоянство

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов в растениях ежи и одуванчика (мг/кг сухой массы)*

Участок	Орган	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Pb
Ежа сборная								
1	корень	275,3	1,1	4,0	12,4	141,7	1,3	4,1
2	корень	158,8	3,5	13,2	32,2	137,5	0,8	7,8
3	корень	291,2	2,4	10,7	38,2	171,3	1,2	9,0
1	побег	85,7	< 0,1	< 0,7	4,2	35,8	1,3	0,05
2	побег	60,2	0,2	0,9	5,1	21,4	0,9	0,3
3	побег	117,3	0,2	2,4	4,9	33,0	3,4	0,4
Одуванчик лекарственный								
1	корень	30,2	0,2	0,9	14,4	58,8	0,4	0,4
2	корень	35,3	0,4	3,0	12,1	31,2	< 0,04	1,1
3	корень	71,1	0,4	4,7	14,9	43,3	0,4	1,8
1	побег	70,2	0,2	< 0,7	6,1	111,5	0,7	0,3
2	побег	63,1	0,3	< 0,7	9,5	44,4	0,4	0,4
3	побег	76,0	0,3	2,1	9,1	100,1	0,8	0,9

Таблица 4

Коэффициенты биологического поглощения (КБП) тяжелых металлов растениями ежи и одуванчика

Уча- сток	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Pb
Ежа сборная							
1	0,85	0,26	0,38	1,26	3,25	2,89	0,41
2	0,30	0,43	0,55	0,99	1,46	0,90	0,17
3	0,18	0,24	0,36	0,47	0,94	0,41	0,14
Одуванчик лекарственный							
1	0,09	0,06	0,09	1,46	1,35	0,98	0,04
2	0,07	0,05	0,12	0,37	0,33	—	0,03
3	0,04	0,05	0,16	0,18	0,24	0,14	0,03

микроэлементного состава организма в неблагоприятных эдафических условиях.

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что травянистые сообщества, сформировавшиеся в условиях техногенного загрязнения почвы тяжелыми металлами, заметно различаются по флористическому составу от сообщества, находящегося на незагрязненном участке. Судя по полученным данным, их формирование происходит с участием относительно небольшого числа наиболее устойчивых к тяжелым металлам видов растений, относящихся к семействам *Poaceae*, *Asteraceae* и *Apiaceae*.

Кроме того, нами выявлены заметные межвидовые различия в накоплении и распределении тяжелых металлов у растений по органам. В частности, растения ежи аккумулировали значительно больше тяжелых металлов по сравнению с одуванчиком, причем основное их количество задерживалось в корнях, что свидетельствует о возможности использования данного вида для фитостабилизации загрязненных металлами почв. Установлено также, что в условиях техногенного загрязнения почвы содержание большинства тяжелых металлов в растениях возрастает, но интенсивность их поглощения снижается, что, возможно, является результатом адаптивной реакции, направленной на стабилизацию минерального обмена, в случаях, когда

корнеобитаемая среда оказывается неблагоприятной для жизнедеятельности растений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Почва, город, экология / под общ. ред. Г.В. Добровольского. М., 1997. 320 с.
2. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва – растение. Новосибирск, 2012. 220 с.
3. Микроэлементы в окружающей среде: биогеохимия, биотехнология и биоремедиация / под ред. М.Н.В. Прасада, К.С. Саджавана, Р. Найду. М., 2009. 816 с.
4. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / под ред. Н.Г. Зырина, С.Г. Малахова. М., 1981. 80 с.
5. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест: метод. указания МУ 2.1.7.730-99. М., 1999.
6. Миркин Б.М., Розенберг Г.С., Наумова Л.Г. Современная наука о растительности. М., 2000. 264 с.
7. Перельман А.И. Геохимия. М., 1989. 528 с.
8. Безель В.С., Жуйкова Т.В. Химическое загрязнение среды: вынос химических элементов надземной фитомассой травянистой растительности // Экология. 2007. № 4. С. 259-267.
9. Титов А.Ф., Таданова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск, 2007. 172 с.
10. Лайдинен Г.Ф., Казнина Н.М., Батова Ю.В., Титов А.Ф. Состояние травянистой растительности в условиях промышленного загрязнения (на примере южной Карелии) // Раст. ресурсы. 2011. Т. 47. Вып. 4. С. 50-60.
11. Башимаков Д.И., Лукаткин А.С. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений. Саранск, 2009. 236 с.

БЛАГОДАРНОСТИ:

1. Авторы выражают благодарность сотрудникам аналитической лаборатории Института геологии КарНЦ РАН за проведение химического анализа почвенных и растительных образцов.

2. Работа выполнена при финансовой поддержке РГНФ, грант № 13-06-00414, и РФФИ, р_север_а 13-05-98817.

Поступила в редакцию 7 июля 2014 г.

Batova Y.V., Kaznina N.M., Titov A.F., Laidinen G.F. STATE OF HERBACEOUS VEGETATION AND CONTENT OF HEAVY METALS IN PLANTS GROWN ON INDUSTRIALLY CONTAMINATED SOILS

We investigated the effect of industrial soil contamination with heavy metals on the state of herbaceous vegetation and

content of metals in plants. We found that the formation of plant communities in contaminated soils occurs involving a small number of species belonging to the families *Poaceae*, *Asteraceae* and *Apiaceae*. We reveal interspecific differences in the accumulation and distribution of heavy metals in the organs of cocksfoot and dandelion plants.

Key words: industrial contamination of soil; heavy metals; herbaceous vegetation; *Dactylis glomerata* L., *Taraxacum officinale* F.H. Wigg.

Батова Юлия Валерьевна, Институт биологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, Российская Федерация, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, e-mail: batova@krc.karelia.ru

Batova Yulia Valeryevna, Institute of Biology Karelian Research Center RAS, Petrozavodsk, Russian Federation, Candidate of Biology, Senior Research Worker, e-mail: batova@krc.karelia.ru

Казнина Наталья Мстиславовна, Институт биологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, Российская Федерация, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, e-mail: kaznina@krc.karelia.ru

Kaznina Natalya Mstislavovna, Institute of Biology Karelian Research Center RAS, Petrozavodsk, Russian Federation, Candidate of Biology, Senior Research Worker, e-mail: kaznina@krc.karelia.ru

Титов Александр Федорович, Институт биологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, Российская Федерация, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, руководитель лаборатории экологической физиологии растений, e-mail: titov@krc.karelia.ru

Titov Aleksander Fedorovich, Institute of Biology Karelian Research Center RAS, Petrozavodsk, Russian Federation, Doctor of Biology, Professor, Correspondent Member RAS, Head of Laboratory of Ecological Physiology of Plants, e-mail: titov@krc.karelia.ru

Лайдинен Галина Федоровна, Институт биологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, Российская Федерация, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, e-mail: laidinen@krc.karelia.ru

Laidinen Galina Fedorovna, Institute of Biology Karelian Research Center RAS, Petrozavodsk, Russian Federation, Candidate of Biology, Senior Research Worker, e-mail: laidinen@krc.karelia.ru