

А. Р. Сибиркина

СОДЕРЖАНИЕ НИКЕЛЯ В ТРАВАХ СОСНОВОГО БОРА СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПРИИРТЫШЬЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Растительные организмы избирательно накапливают химические элементы, в том числе и тяжелые металлы (ТМ). Некоторые растения являются концентраторами по отношению к одному или нескольким элементам и активно вовлекают их в биогеохимический круговорот. Кроме того, растения применяются в биоиндикационных исследованиях. По этой причине сведения об их элементном химическом составе имеют большое научно-практическое значение в мониторинговых исследованиях состояния окружающей среды конкретного региона, например Семипалатинского Прииртышья. Реликтовый сосновый бор является прекрасной базой для проведения мониторинговых исследований, тем не менее, в настоящее время практически отсутствует информация о содержании ТМ в травянистых растениях семипалатинского соснового бора. В связи с вышесказанным основной целью исследования была оценка уровня загрязнения территории Семипалатинского Прииртышья по степени накопления Ni в травах соснового бора с учетом того, что осуществляемые травянистыми растениями процессы поглощения и нейтрализации токсичных компонентов техногенных эмиссий также значимы, как и их почвозащитные и водорегулирующие функции [1, 2]. В задачи исследования входило изучение металлонакопительных возможностей отдельных семейств травянистых растений.

Объекты и методы исследования

Отбор проб проводили в летне-осенний период (август–сентябрь) 2004–2009 гг. на различных участках семипалатинского равнинного и бугристого песчаных лесных районов: в окрестностях г. Семей с углублением в лес на 500–1500 м к западу и северо-западу от города, в Бескарагайском районе (в районах сел Бегень и Сосновка), в Бородулихинском районе. Всего в исследуемых районах было обнаружено 52 вида травянистых растений из 18 семейств.

Сосновые боры Семипалатинского Прииртышья — это травянистые боры, большей частью ксерофитизированные [3]. Сомкнутость трав под пологом леса колеблется от 3–5% до 10–20%. Местами встречаются куртины и массивы сомкнутого, мертвопокровного сухого бора. Именно таким оказался бор в районе с. Долонь, где не удалось отобрать пробы травянистых растений.

При отборе, транспортировке, хранении и подготовке растительных проб для анализа были использованы методические указания, инструкции, опубликованные во многих научных работах и утвержденные в стандартах [4–8]. Латинские названия растений даны из работы С. А. Арыстангалиева и Е. Р. Рамазанова [9].

В пределах ленточных боров располагаются равнинные и бугристые боровые пески. Для определения валового содержания Ni бралась навеска почвы массой 10 г, которую озоляли в муфельной печи при температурах 450–500 °С в течение 5–8 ч. Полученную золу переводили в раствор ускоренным методом с применением концентрированных минеральных кислот и перекиси водорода [9]. Всего было проанализировано 78 почвенных и 417 растительных проб.

Наряду с анализом валового содержания Ni в почвах были изучены и его подвижные формы: кислоторастворимая (1н. раствор HCl), обменная (ацетатно-аммонийный буфер с рН 4,8), водорастворимая (бидистиллированная вода). Фракционирование осуществлялось из отдельных навесок почвы массой 5 г. Соотношение «почва:экстрагент» составляло 1:10, время экстракции — 1 ч. Пробы встряхивались на ротаторе в течение одного часа, после экстрагирования суспензии фильтровали и в фильтрате атомно-абсорбционным методом определяли содержание Ni. Анализ осуществлялся на атомно-абсорбционном спектрофотометре модель SP9 фирмы PUE UNICAM.

Был вычислен коэффициент биологического поглощения (КБП), характеризующий распределение элементов между живым веществом и абиотической средой. Данный коэффициент — это отношение концентрации химического элемента в живом организме растений (в золе) к его концентрации в среде (валовое содержание в почве) [10].

Для оценки тесноты биогеохимической связи состава живого организма с биосферой был рассчитан показатель биотичности элементов (ПБЭ), который является отношением содержания элемента в растениях к кларку земной коры. По аналогии с КБП, элементы со значениями ПБЭ, равными 0,3 и выше, играют наиболее существенную роль в биологическом круговороте веществ в экосистеме [11].

Для характеристики распределения элементов между живым веществом и окружающей средой были вычислены коэффициенты накопления (K_{n1}) [13] и (K_{n2}) [12]. Коэффициент накопления (K_{n1}) характеризует переход химических элементов из почвы в растение, близок к КБП, но поглощение — физиологический процесс, а накопление — результат, как поглощения, так и внутреннего перераспределения химических элементов. Если K_{n1} меньше единицы, то превалирует загрязнение растений из почвы, если больше единицы, то, кроме поступления в растительную продукцию металлов из почвы, имеет место загрязнение из атмосферы. Коэффициент накопления (K_{n2}) выражает отношение содержания элемента в корнях к таковому в почве: $K_{n2} = C_{\text{корни}} : C_{\text{почва}}$, где $C_{\text{корни}}$ — содержание элемента в корнях; $C_{\text{почва}}$ — содержание элемента в почве.

Коэффициенты накопления были рассчитаны относительно валового содержания никеля в почвах и его подвижных форм.

Для характеристики процессов перехода Ni из корней в надземную часть растений рассчитывали коэффициент перехода (K_n), равный отношению содержания Ni в надземной фитомассе к таковому в корнях [12]: $K_n = C_{\text{листья}} : C_{\text{корни}}$, где $C_{\text{листья}}$ — содержание элемента в листьях, $C_{\text{корни}}$ — содержание элемента в корнях.

Полученные экспериментальные данные были обработаны вариационно-статистическими методами, которые описаны в руководстве Н. А. Плохинского [13] с помощью программы Microsoft Excel.

Обсуждение результатов исследования

Изменения в составе биосферы, происходящие на разных этапах эволюции, вызвали изменение металлопоглощающей способности растений. В результате, возникшие в разное время типы растительных организмов, характеризуются различным содержанием элементов [14]. Серьезную проблему в изучении роли ТМ представляет то, что многие из них выполняют в растениях функцию жизненно необходимых микроэлементов, среди них Ni и другие элементы. Поэтому, рассматривая вопросы токсичности ТМ следует внимательно оценивать зависимость реакции растений от концентраций каждого металла и анализировать разное воздействие ТМ на дикорастущие и культурные растения. Это связано с выявлением гипераккумулирующих металлы видов растений и разработкой фиторемедиационных мероприятий, в которых задействованы дикорастущие растения [15, 16]. Информация об уровнях накопления Ni травами различных семейств соснового бора представлена в табл. 1.

Среднее содержание Ni в изученных травянистых растениях, кроме осоковых, не превышало его фоновых значений, оно было ниже ПДК и критических значений для растений (табл. 2). Злаковые, лилейные, бобовые отличаются критическим содержанием Ni в корнях растений. Фитотоксичных концентраций Ni в изученных травах не обнаружено даже по верхним границам его содержания.

Химический состав растений зависит от элементного состава почвы, на которой они произрастают. Ключевую роль в минеральном питании растений играет степень обеспеченности почвы биологически доступными формами микроэлементов. В пределах ленточных боров располагаются равнинные и бугристые боровые пески, сформированные на древнеаллювиальных песках, и имеющие самое низкое содержание ТМ из всех почвообразующих пород региона [23], что связано с их минералогическим и гранулометрическим составом. Доступность элемента для растений часто отождествляют с его подвижностью [24, 25], т. е. тем количеством вещества, которое способно мигрировать к поверхности корня в результате всех возможных процессов, происходящих в почве. Установлено, что валовое содержание никеля в боровых песках составляет $14,41 \pm 0,84$ при размахе варьирования 6,70–25,48 мг/кг. Содержание подвижных форм никеля можно ранжировать в следующем убывающем порядке (мг/кг): кислоторастворимая (0,15) > обменная (0,05) > водорастворимая (0,01). Следует отметить, что пески соснового бора не испытывают прямого промышленного воздействия. Степень техногенного загрязнения почв можно оценить по содержанию в них подвижных форм ТМ. Согласно нашим исследованиям, концентрация подвижных форм Ni в песках значительно ниже ПДК для подвижных форм ($\text{ПДК}_{\text{подв.Ni}} = 4,0$ мг/кг [26]). Учитывая, что соотношение кислоторастворимой формы Ni к валовому содержанию составляет всего 1,0%, изученные боровые пески относятся к категории фоновых почв и не могут служить основным источником поступления Ni в растения.

Накопление ТМ растениями определяется их биологическими особенностями, различные семейства растений по-разному распределяют Ni по органам растения. У многих видов растений концентрации ТМ в надземных органах, как правило, меньше, чем в корнях [27, 28]. Установлено, что растения из семейств осоковых, злаковых, лилейных, розоцветных, ворсянковых, норичниковых, тутовых, подорожниковых накапливают никель больше в корнях, чем в надземной части. Выявленный акропетальный тип накопления, очевидно, связан с наличием функциональных барьеров

Таблица 1. Содержание никеля в травах из различных семейств (мг/кг сухого вещества)

Семейства растений	В целом по растению	Корни	Надземная часть
Осоковые, $n = 9$ <i>Cyperaceae</i> J. St. Hill.	$3,95 \pm 0,22$ (48,0) 1,75–7,19	$4,15 \pm 0,23$ (74,6) 1,75–7,19	$3,74 \pm 0,21$ (21,4) 2,87–4,37
Злаковые, $n = 33$ <i>Gramineae</i> Juzz.	$3,39 \pm 0,19$ (291,0) 0,02–10,98	$4,52 \pm 0,25$ (145,5) 0,02–9,50	$2,25 \pm 0,13$ (436,5) 0,14–10,98
Лилейные, $n = 9$ <i>Liliaceae</i> Hall.	$3,85 \pm 0,22$ (88,2) 1,13–6,32	$4,90 \pm 0,27$ (92,7) 1,58–6,32	$2,79 \pm 0,16$ (83,7) 1,13–4,58
Маревые, $n = 12$ <i>Chenopodiaceae</i> Less.	$0,77 \pm 0,05$ (78,1) 0,07–2,67	$0,41 \pm 0,02$ (62,8) 0,12–0,72	$1,13 \pm 0,07$ (93,4) 0,07–2,67
Гвоздичные, $n = 12$ <i>Caryophyllaceae</i> Juzz.	$1,39 \pm 0,08$ (92,6) 0,06–3,22	$1,09 \pm 0,06$ (76,8) 0,06–2,17	$1,68 \pm 0,09$ (108,4) 0,32–3,22
Лютиковые, $n = 15$ <i>Ranunculaceae</i> Juzz.	$2,89 \pm 0,16$ (105,2) 0,59–7,45	$2,87 \pm 0,16$ (86,1) 1,13–7,45	$2,90 \pm 0,16$ (124,2) 0,59–3,73
Крестоцветные, $n = 36$ <i>Niucifera</i> Juzz.	$2,41 \pm 0,14$ (99,7) 0,28–12,78	$1,24 \pm 0,07$ (56,9) 0,82–1,65	$3,58 \pm 0,20$ (142,4) 0,28–12,78
Розоцветные, $n = 21$ <i>Rosaceae</i> Juzz.	$2,71 \pm 0,15$ (194,6) 0,74–5,21	$3,08 \pm 0,17$ (185,6) 0,94–5,21	$2,33 \pm 0,13$ (203,5) 0,74–4,61
Бобовые, $n = 30$ <i>Leguminosae</i> Juzz.	$4,04 \pm 0,23$ (46,8) 1,59–7,04	$3,23 \pm 0,18$ (28,7) 2,69–3,64	$4,84 \pm 0,27$ (64,8) 1,59–7,04
Зонтичные, $n = 12$ <i>Umbelliferae</i> Moris.	$1,94 \pm 0,11$ (125,5) 0,85–4,68	$1,30 \pm 0,07$ (82,3) 0,85–2,41	$2,58 \pm 0,14$ (168,7) 0,94–4,68
Сложноцветные, $n = 132$ <i>Compositae</i> (Vaill.) Adans.	$2,48 \pm 0,14$ (143,6) 0,61–4,89	$2,37 \pm 0,13$ (124,8) 0,86–3,89	$2,59 \pm 0,15$ (162,4) 0,61–3,85
Ворсянковые, $n = 12$ <i>Dipsacaceae</i> Lindl.	$2,13 \pm 0,12$ (99,2) 0,94–4,52	$2,48 \pm 0,14$ (87,5) 1,00–4,52	$1,78 \pm 0,10$ (110,8) 0,94–3,51
Мареновые, $n = 12$ <i>Rubiaceae</i> Juzz.	$1,76 \pm 0,10$ (50,4) 1,11–3,52	$1,66 \pm 0,09$ (52,2) 1,11–3,52	$1,86 \pm 0,10$ (48,5) 1,78–2,24
Норичниковые, $n = 36$ <i>Scrophulariaceae</i> Lindl.	$1,98 \pm 0,11$ (66,1) 0,97–3,45	$2,17 \pm 0,12$ (63,2) 1,05–3,45	$1,78 \pm 0,10$ (68,9) 0,97–3,25
Туттовые, $n = 12$ <i>Moraceae</i> Lindl.	$1,83 \pm 0,11$ (48,8) 0,65–2,98	$2,08 \pm 0,12$ (18,7) 1,07–2,98	$1,58 \pm 0,09$ (78,9) 0,65–2,37
Хвощевые, $n = 6$ <i>Equisetaceae</i> Rich.	$2,99 \pm 0,17$ (77,9) 1,12–5,21	$2,45 \pm 0,14$ (71,4) 1,12–3,78	$3,52 \pm 0,20$ (84,4) 1,36–5,21
Заразиховые, $n = 6$ <i>Orobanchaceae</i> Lindl.	$1,58 \pm 0,09$ (86,9) 0,76–2,87	—	$1,58 \pm 0,09$ (86,9) 0,76–2,87
Подорожниковые, $n = 12$ <i>Plantaginaceae</i> Lindl.	$2,09 \pm 0,11$ (116,6) 0,96–4,68	$2,35 \pm 0,13$ (53,7) 1,35–4,68	$1,82 \pm 0,10$ (179,4) 0,96–3,65
Среднее для 18 семейств, $n = 417$	$2,48 \pm 0,14$ (103,1) 0,06–12,78	$2,49 \pm 0,14$ (80,2) 0,06–9,50	$2,46 \pm 0,14$ (126,0) 0,14–12,78

на границах: корень — надземная часть. При этом часть ионов с помощью корневых выделений хелатируется и адсорбируется на поверхности корней, остальное попадает в корень, где также частично адсорбируется на стенках проводящих сосудов [29]. Определенную защитную функцию в корнях могут выполнять клетки пояса Каспари, препятствующие движению вещества по межклеточному пространству и ограничивающие его переход в проводящие ткани [30]. Одновременно выявлено, что травы из семейств маревых, гвоздичных, лютиковых, крестоцветных, зонтичных, сложноцветных,

Таблица 2. Уровень содержания никеля относительно различных показателей его содержания в растениях (мг/кг сухого вещества)

Показатели	$\frac{\text{среднее}}{\text{min-max}}$
Среднее для трав соснового бора	$\frac{2,48}{0,06-12,78}$
Фоновое содержание в растениях [17]	$\frac{4,2}{2,8-14,1}$
ПДК [18, 19]	20,0–30,0
Критическое содержание [20, 21]	3,0
Фитотоксичное содержание [22]	> 80,0

мареновых, бобовых, хвощевых склонны к увеличенному накоплению Ni в надземной части (базипетальный тип накопления). По всей вероятности, у этих растений происходит нарушение или ослабление барьерной функции корня по отношению к Ni, о чем свидетельствует коэффициент перераспределения ($K_n = 1,0$), а также активное поглощение Ni из атмосферного воздуха. Данное заключение подтверждают и рассчитанные коэффициенты накопления, равные 0,2 относительно валового содержания никеля, и изменяющиеся от 16,5 до 249,0 для различных его форм.

Выведенные коэффициенты накопления указывают на то, что основное поглощение никеля идет за счет его подвижных форм, а также за счет его поступления из атмосферы. Согласно рядам биологического поглощения ($КБП_{Ni} = 2,1$) никель является элементом сильного накопления [31], однако его роль в общем круговороте веществ в лесной экосистеме незначительна ($ПБЭ_{Ni} = 0,04$).

Выводы

1. Установлено, что большинство изученных травянистых растений содержат в своем составе никель в концентрациях ниже его ПДК, фоновых и критических значений для растений. Исключение составляют травянистые растения из семейств осоковых, злаковых, лилейных, бобовых.

2. Выявлено, что пески соснового бора отличаются минимальной концентрацией Ni и относятся к категории фоновых почв, что нашло свое отражение в химическом составе изученных травянистых растений.

3. Травы из семейств осоковых, злаковых, лилейных, розоцветных, ворсянковых, норичниковых, тутовых, подорожниковых характеризуются акропетальным типом накопления никеля. Склонность к базипетальному накоплению элемента выявлена для трав из семейств бобовых, хвощевых, маревых, гвоздичных, лютиковых, крестоцветных, зонтичных, сложноцветных, мареновых.

4. Для изученных травянистых растений Ni является элементом сильного накопления, однако его роль в общем круговороте веществ лесной экосистемы незначительна.

Литература

1. *Сергейчик С. А., Сергейчик А. А., Сидорович Е. А.* Экологическая физиология хвойных пород Беларуси в техногенной среде. Минск: Беларуская наука, 1998. 200 с.
2. *Терехина Т. А.* Антропогенные фитосистемы. Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та, 2000. 250 с.
3. *Карипбаева Н. Ш., Полевик В. В.* Влияние загрязнения атмосферы на растительность ленточного бора Семипалатинского Прииртышья // Вестник СГУ им. Шакарима. 1997. № 1. С. 167–172.
4. *Геохимия окружающей среды.* М.: Недра, 1990. 335 с.
5. *Жидеева В. А., Васенев И. И., Щербаков А. П.* Особенности распределения различных форм агротехногенной меди в почвах яблоневых садов Курской области // Агрехимия. 1999. № 9. С. 68–69.
6. *Ринькис Г. Я., Рамане Х. К., Куницкая Т. А.* Методы анализа почв и растений. Рига: Зинатне, 1987. 210 с.
7. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами. М.: Гидрометеоздат, 1981. 108 с.
8. *Фурсов М. Р.* Глобальные проблемы окружающей среды. М.: МГУ, 1995. С. 458–562.
9. *Арыстангалиев С. А., Рамазанов Е. Р.* Растения Казахстана. Алма-Ата: Наука КазССР, 1977. 288 с.
10. *Ильин В. Б., Степанова М. Д.* Химические элементы в системе П–Р. Новосибирск: Наука, 1982. 73 с.
11. *Глазовский Н. Ф.* Биогеохимический круговорот веществ в биосфере. М.: Наука, 1987. С. 56–64.
12. *Безель В. С., Жуйкова Т. В., Позолотина В. Н.* Структура ценопопуляций одуванчика и специфика накопления тяжелых металлов // Экология. 1998. № 5. С. 376–382.
13. *Плохинский Н. А.* Биометрия. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. 367 с.
14. *Ильин В. Б.* Элементный химический состав растений. Новосибирск: Наука, 1985. 129 с.
15. *Prasad M. N. V.* Metals in the environment: analysis by biodiversity. New York: Marcel Dekker Inc., 2001. 504 p.
16. *Salt D. E., Smith R. D., Raskin I.* Phytoremediation // Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 1998. Vol. 49, N 1. P. 643–668.
17. *Панин М. С.* Эколого-биогеохимическая оценка техногенных ландшафтов Восточного Казахстана. Алма-Ата: Изд-во «Эверо», 2000. 338 с.
18. *Лукина Н. В., Никонов В. В.* Поглощение аэротехногенных загрязнителей растениями со-сняков на северо-западе Кольского полуострова // Лесоведение. 1993. № 6. С. 34–41.
19. *Saurbeck D.* Welche schwermetallgehalte in pflanzen dürfen nicht überschritten werden, um wachstumbeein trachtigungen zu vermeiden // Landwirtschaftliche Forschung. Kongressband. 1982. N. 16. S. 59–72.
20. *Baker D. E., Chensin L.* Chemical monitoring of soil for environmental quality animal and health // Advances in agronomy. 1975. Vol. 27. P. 306–366.
21. *Тарабрин В. П.* Физиология устойчивости древесных растений в условиях загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами // Микроэлементы в окружающей среде. Киев: Наукова думка, 1980. С. 17.
22. *Verloo V., Cottenie A., Landschoot G. Van.* Analytical and biological Criteria with regard to soil pollution // Landwirtschaftliche Forschung. Kongressband. 1982. N. 39. S. 394–403.
23. *Панин М. С.* Формы соединений тяжелых металлов в почвах средней полосы Восточного Казахстана (фоновый уровень). Семипалатинск: ГУ «Семей», 1999. 329 с.
24. *Панин М. С., Котелков Н. З.* Обеспеченность почв и растений Семипалатинской области некоторыми микроэлементами // Агрехимия. 1968. № 6. С. 119–124.
25. Гигиенические критерии состояния окружающей среды // Принципы оценки безопасности пищевых добавок из контаминантов в продуктах питания ВОЗ. Вып. 70. М., 1991.

26. Предельно допустимые концентрации химических веществ в почве (ПДК). ГН 2.1.7.2041-06. Введ. 2006-01.23. М., 2006. 10 с.

27. Безель В. С., Жуйкова Т. В. Химическое загрязнение среды: вынос химических элементов надземной фитомассой травянистой растительности // Экология. 2007. № 4. С. 259–267.

28. Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. Екатеринбург: УГКФ «Наука», 1994. 280 с.

29. Зырин Н. Г., Чеботарева Н. А. К вопросу о формах соединений меди, цинка, свинца в почвах и доступности их для растений // Содержание и формы соединений микроэлементов в почвах. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 324–350.

30. Ягодин Б. А., Виноградов С. Б., Говорина В. В. Кадмий в системе почва — удобрения — растения — животные организмы и человек // Агрохимия. 1985. № 5. С. 23–26.

31. Перельман А. И. Геохимия: учеб. для геол. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2012 г.