

УДК [546.76]:582/475.4(574.42)

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ТРАВЯНИСТЫМИ РАСТЕНИЯМИ СОСНОВОГО БОРА СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПРИИРТЫШЬЯ

Сибиркина А. Р.

ФГБОУ ВПО Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия (454001, г. Челябинск, ул. Бр. Кашириных, 129), E-mail: sibirkina_alfira@mail.ru

Большинство травянистых растений соснового бора Семипалатинского Прииртышья является лекарственным и используется человеком. Однако информация о химическом составе растений, произрастающих на данной территории, практически отсутствует. В данной работе представлен обобщающий материал о содержании тяжелых металлов в травах соснового бора Семипалатинского Прииртышья. Большинство тяжелых металлов не входит в число необходимых для растений элементов, однако они эффективно поглощаются как корневой системой, так и листьями. Рассчитанные коэффициенты накопления и перераспределения свидетельствуют о том, что, произрастая даже на фоновых, не загрязненных почвах, травянистые растения, вследствие нарушения или ослабления барьерной функции корня по отношению к соединениям тяжелых металлов, способны накапливать его в значительных количествах. Установлено, что для травянистых растений элементом энергичного накопления является кадмий.

Ключевые слова: травы, накопление, тяжелые металлы, сосновый бор, Семипалатинское Прииртышье.

BIOGEOCHEMICAL PARTICULARITIES OF THE ACCUMULATION OF THE JOIN HEAVY METAL IN HERB PINE FORESTS THE IRTYSH RIVER IN SEMEY

Sibirkina A. R.

FSBE IVT Chelyabinskii state university, Chelyabinsk, Russia (454001, Chelyabinsk, street Br. Kashirinyh, 129), E-mail: sibirkina_alfira@mail.ru

The Majority herbs including of pine forests, are medicinal and are used person. However information on chemical composition of the plants, rising on given territory practically is absent. In given work is presented consolidated material about contents heavy metal in herb pine forests the Irtysh River in Semey. The Majority heavy metal do not rank along required for plants element, however they are effectively absorbed both root system, and sheet. The Calculated factors of the accumulation and redistributions are indicative of that the barrier at, sprouting even on background ground, herbs, in consequence of breach or weakening to functions root to join cadmium, capable to accumulate him(it) in quite a numbers. It Is Installed that cadmium for rubbed is an element of the eager accumulation.

Keywords: grass, accumulation, heavy metals, pine forests, the Irtysh River in Semey.

В растительном покрове соснового бора Семипалатинского Прииртышья преобладают осоковые, степные дерновинные злаки и разнотравье. Отбор проб проводили 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. При отборе, транспортировке, хранении и подготовке растительных проб для анализа были использованы методические указания, инструкции, опубликованные во многих научных работах и утвержденные в стандартах.

Растения, отражая видовые особенности содержания металлов, несут, вместе с тем, локальную окраску состава среды их обитания. Максимально высокие концентрации Cd, Sr, Pb были обнаружены в растениях, произрастающих в сосновом бору в окрестностях г. Се-

мей, предприятия и автотранспорт которого могут служить источником поступления аэрозолей ТМ в атмосферный воздух. В сосновом бору в окрестностях с. Бегень в травянистых растениях наблюдаются повышенные концентрации Zn, Co, V, а в растениях на месте пожара увеличено содержание Cr и Mn. Травянистый покров соснового бора в Бородулихинском районе в больших концентрациях накапливает соединения Cu, Ni, Be. Повышенные концентрации Be в фитоценозе соснового бора могут являться следствием наличия на территории Восточно-Казахстанской области аномальных его концентраций естественного и искусственного происхождения. Кроме того, в промышленном комплексе Восточного Казахстана исторически преобладает цветная металлургия и горнодобывающая промышленность. Выявлено, что по всем пунктам отбора содержание Cu (в 0,8–1,8), Zn (в 1,1–1,9), Co (в 1,2–3,1) и Mn (в 1,3–2,9) превышает их региональные кларковые значения для дикорастущих растений Семипалатинского Прииртышья. Относительно фоновых значений данных элементов для растений, превышений средних концентраций по Cu, Pb, Cd, Co, Ni, Cr, V, Be, Mn не обнаружено. По максимальным значениям концентрации выше фона обнаружены для Cu, Pb, Cr, Be. Содержание Zn в травянистых растениях по всем пунктам отбора выше фоновых его значений в 0,4–1,6 раза, максимальные концентрации Zn зафиксированы в растениях, произрастающих в сосновом бору в окрестностях г. Семей. Вместе с тем, в среднем содержание Cu, Zn, Co, Mn в 1,5; 1,3; 1,6 и 1,9 раза, соответственно, ниже концентраций их в растительности континентов по В. В. Добровольскому (1983), кроме Pb, содержание которого в 3,0 раза выше данного показателя.

Уровни содержания ТМ в травянистых растениях, относящихся к различным семействам, значительно варьирует. Практически все изученные растения, кроме маревых, гвоздичных, капустных, сельдерейных, заразиховых накапливают Be выше его фоновых концентраций в растениях [5]. Астровые, осоковые, лилейные, гвоздичные, лютиковые, мареновые, норичниковые накапливают Mn, Zn, Cu, Co в концентрациях значительно превышающих их региональные кларки для дикорастущей растительности средней полосы Восточного Казахстана [4]. Превышение региональных значений по Co, Zn, Mn зафиксировано в растениях из семейств мятликовые, розоцветные, ворсянковые и подорожниковые; в растениях из семейств бобовые и хвощевые обнаружены концентрации Co, Cu, Mn, превышающие их региональные кларки. Выше кларковых значений накапливают Mn, Co, растения из семейств капустные и тутовые; Mn и Zn – заразиховые; Co – сельдерейные.

Растения из семейств осоковые, мятликовые, розоцветные являются накопителями Mn, Zn в концентрациях, превышающих фоновые значения. Выше фоновые концентрации Cd зафиксированы в растениях семейств розоцветные, Zn – у подорожниковых.

Содержанием ТМ в концентрациях, не превышающих фоновые значения, отличаются растения семейства заразиховые. Вероятно, это связано с тем, что заразиховые являются паразитами, и их химический состав зависит от химического состава организма – хозяина.

Некоторые семейства травянистых растений содержат аномальные для растений концентрации металлов [5]. Аномальные для растений концентрации Cu, по верхним границам ее содержания, выявлены у астровых; Zn – у мятликовых и подорожниковых; Cr – у мятликовых и лилейных; Be – у астровых, мятликовых, лилейных, розоцветных и бобовых; Cd – у мятликовых. В растениях из семейства мятликовые зафиксированы аномально высокие концентрации четырех металлов – Zn, Be, Cr и Cd. Содержание одновременно двух металлов с аномальными для растений концентрациями обнаружено у астровых (Cu, Be) и лилейных (Cr, Be).

Адаптация к высоким концентрациям элементов приводит к появлению видов – концентраторов (и сверхконцентраторов) отдельных элементов. Проведенные исследования показали, что к сверхконцентраторам Cu, Zn, Cd, Cr, Be можно отнести растения семейств мятликовые, лилейные, розоцветные и бобовые.

Исследованные семейства растений по-разному распределяют металлы в надземной и подземной части растения. ТМ поступают в растение преимущественно через корневую систему из почвы, в меньшей степени – через листья [7]. В побегах растений-исключателей поддерживается низкая концентрация металлов, несмотря на высокую концентрацию в окружающей среде. В этом случае барьерную функцию выполняет корень.

Данные корреляционного анализа показывают, что достоверная высокая прямая корреляционная зависимость между содержанием ТМ в надземных и подземных частях растений существует только для Cd ($r = 0,82 \pm 0,08$, $t = 10,8$) и Cu ($r = 0,59 \pm 0,02$, $t = 2,95$). Для остальных ТМ четкой корреляционной зависимости не обнаружено.

Полученные данные о металлонакопительных способностях травянистых растений соснового бора Семипалатинского Прииртышья целесообразно использовать при разработке мероприятий по фиторемедиации территорий с возможным загрязнением соединениями тяжелых металлов. Особенно перспективно в этом направлении использование таволги зверообелистной, цмина песчаного и некоторых представителей семейства розоцветные. Эти растения, обладая хорошими металлопоглотительными возможностями, способны создавать эстетически приятный вид городским ландшафтам.

Особый интерес в целях фиторемедиации представляют возможности аккумулировать соединения ТМ подземными частями растений. Выявлено, что ведущую роль в активной аккумуляции металлов в подземной части растений играют осоковые и мятликовые, особенно дерновинные, астровые, тутовые и бобовые, развивающие крупные корневые системы.

Как показали исследования, корневая система большинства видов растений обладает высокой аккумуляционной способностью. Растения осока стоповидная, скабиоза бледно-желтая, конопля сорная и подорожник прижатый можно отнести к растениям-исключателям [9]. Поскольку у этих растений поглощаемые металлы задерживались в корневой системе и практически не поступали в побеги. В побегах растений - исключателей поддерживается низкая концентрация металлов, несмотря на высокую концентрацию в окружающей среде, в этом случае барьерную функцию выполняет корень. По данным И.В. Серегина [8] для Cd и Pb эта функция определяется барьерной ролью эндодермы, в то время как для металлов, проходящих через эндодермальную барьер (Ni), могут функционировать иные морфофизиологические барьеры на уровне корня, например накопление в местах перфораций. Все перечисленные барьеры, однако, не универсальны для всех металлов. В отличие от исключателей, у гипераккумуляторов функциональные барьеры на уровне корня и побега отсутствуют. Исходя из представлений Д.А. Сабина (1955) об акропетальном и базипетальном характере распределения химических элементов в растениях, можно заключить, что исследованные ТМ в данных растениях накапливаются по акропетальному типу.

Растения тонконог тонкий, ковыль волосатик, овсец Шелля, мятлик степной, вейник наземный, лисохвост луговой, пырей ползучий, тимофеевка степная, овсяница бороздчатая, волоснец гигантский, лук угловатый, таволга зверобоелистная, лапчатка гусиная, лапчатка длинночерешковая, костяника каменистая, малина обыкновенная, люцерна серповидная, солодка уральская, астрагал яичкоплодный, астрагал роговой, цмин песчаный, девясил шероховатый, полынь горькая, полынь метельчатая, полынь белеющая, полынь широколистная, василек русский, василек сибирский, ястребинка волосистая, дурнишник обыкновенный, подмаренник настоящий, вероника длинолистная, вероника колосистая, льнянка дроколистная, льнянка короткошпоровая большую часть исследованных ТМ также накапливают в подземной части растения. Предполагается это связано с тем, что апопластический транспорт металлов блокируется в гидрофобных частях клеточных стенок: поясах Каспари, воздухоносных полостях и кутикуле, выполняющих определенную защитную функцию и ограничивающих переход в проводящие ткани [10]. Кроме того, поступающие в корни элементы могут прочно фиксироваться, не переходя полностью в надземную часть за счет их хелатирования и, как следствие, уменьшение подвижности [1-3]. Многие растения снижают проникновение металлов в протопласт, аккумулируя их в клеточных стенках эпидермы за счет связывания с белками слизи. Выделяемая клетками и покрывающая поверхность корня слизь ограничивает проникновение ТМ в клетки, т.е. выполняет барьерную функцию. В работе М.Г. Половниковой [7] указывается, что металлы связываются с карбоксильными группами урновых кислот слизи, или выделяемые в почву экссудаты корней могут содержать гистидин,

цитрат и другие хелаторы ТМ. Хелатирование металлов в цитозоле является очень важным механизмом детоксикации ТМ, веществами, образующими с металлом хелат, могут служить аминокислоты, органические кислоты.

В тоже время икотник серый, бурачок извилистый, сурепка обыкновенная, морковник Бессера в большей мере концентрируют металлы в надземной части и их можно отнести к растениям-аккумуляторам [9]. Склонность к базипетальному типу накопления ТМ проявляют и такие растения, как прострел раскрытый и златоцвет весенний из семейства лютиковые, а также качим метельчатый, песчанка узколистная из семейства гвоздичные.

Одни и те же металлы могут оказывать различное физиологическое влияние не только в разных органах, но и на разных фазах развития растения, о чем свидетельствуют рассчитанные коэффициенты корреляции между различными парами металлов в отдельных подземных и надземных органах растений. Так, установлено, что больше всего положительных корреляционных связей происходит на стадии формирования и существования плода, значение коэффициента корреляции колеблется от 0,46 до 0,93 для разных металлов. Больше всего положительных корреляционных связей установлено между содержанием в плодах растений Cu и Co с другими металлами. Так, с достаточно высокой достоверностью установлены зависимости между Cu и Zn, Cu и Cr ($r = 0,69 \pm 0,16$). Для соединений Co положительные корреляционные связи выявлены также с соединениями Cr ($r = 0,58 \pm 0,18$), Mn ($r = 0,80 \pm 0,09$) и V ($r = 0,86 \pm 0,08$). Положительные корреляционные связи установлены еще для ряда пар металлов, таких как Cd-V, Cd-Mn, Cr-V, Cr-Mn, Zn-Be, V-Mn, Pb-Sr, со значениями коэффициента корреляции 0,57–0,93.

Вместе с тем, в плодах растений выявлены и отрицательно коррелирующие пары металлов, например, Cu-Pb ($r = -0,76 \pm 0,13$), Pb-Be ($r = -0,62 \pm 0,19$), Cr-Sr ($r = -0,51 \pm 0,21$) и Be-Sr ($r = -0,62 \pm 0,19$). Обнаружено, что две пары металлов Cd-Cr ($r = 0,63-0,69$) и V-Mn ($r = 0,46-0,57$) положительно коррелируют между собой и в листьях, и в стеблях, и в цветках растений.

В стеблях растений положительные корреляционные связи выявлены между парами Zn-Cd, Co-V, Cd-Mn, Cr-Mn со значениями коэффициента корреляции 0,51–0,78, отрицательные корреляционные зависимости характерны для пары Cr-Sr ($r = -0,46 \pm 0,24$). В листьях травянистых растений выявлены только положительные корреляционные зависимости между парами Co-V, Co-Be, Co-Sr, Cd-Mn, значение коэффициента корреляции колеблется от 0,51 до 0,74. В цветках растений выявленные корреляционные связи между парами металлов Co-V, Co-Be, Cd-Mn являются положительными ($r = 0,49-0,78$). Выявленные положительные корреляционные связи между парами Co-V и Cd-Mn прослеживаются и в стеблях, и в листьях, и в цветках, и в плодах травянистых растений. Положительно коррелирующая между собой пара Co-Be зафиксирована как в листьях, так и в цветках растений.

В корнях травянистых растений выявлены только положительные зависимости. Больше всего коррелирующих пар обнаружено для Cr. Соединения Cr коррелируют со Pb, Ni, V, Be, Mn, Co, при размахе варьирования коэффициента корреляции от 0,46 до 0,86. Соединения Mn положительно коррелируют с соединениями Zn, Cd, Ni ($r = 0,51-0,65$); для соединений Ni отмечены положительные связи с соединениями V ($r = 0,60 \pm 0,20$); Co вступает в положительные взаимодействия с соединениями V и Be ($r = 0,80-0,83$); вместе с тем для Be выявлены положительные корреляционные связи с соединениями V, Sr и Zn ($r = 0,52-0,60$).

Исследование содержания металлов в подземных видоизмененных побегах (корневищах и луковицах) травянистых растений выявило много общих черт в распределении и взаимовлиянии металлов с корнями растений. Обнаружены аналогичные пары металлов, положительно коррелирующие между собой как в корнях растений, так и в подземных побегах. Это пары Cr с V, Mn, Co; Be с Zn, Sr, V; Mn с Zn Ni; V с Co и Ni ($r = 0,47-0,70$). Вместе с тем в подземных побегах обнаружены положительные связи Mn со Pb, Co, V и Be.

Обнаруженные в подземных побегах растений положительные корреляционные связи между Zn-Cd были также зафиксированы и в стеблях растений.

Общими для надземных и подземных органов растений оказались и положительно коррелирующие пары металлов Cr-Mn, Cr-V, Cr-Co, Co-V, Mn-Cd и Co-Be.

Выявлено, что однодольные и двудольные растения характеризуются кадмиевой геохимической специализацией химического состава. Формула геохимической специализации однодольных травянистых растений имеет следующий вид: $Cd_{1,3} Zn_{0,5} Pb_{0,2} Ni_{0,2} Mn_{0,2} Cu_{0,1} Cr_{0,04} Be_{0,03} V_{0,01} Co_{0,01} Sr_{0,004}$; а для двудольных: $Cd_{1,0} Sr_{0,06} Zn_{0,4} Pb_{0,2} Cu_{0,1} Ni_{0,1} Mn_{0,1} Cr_{0,02} Be_{0,02} V_{0,01} Co_{0,01}$, из которых видно, что двудольные растения накапливают в фитомассе Sr на порядок выше, чем однодольные. Высокая мобильность Sr может определяться невысокой прочностью связывания его с материалом клеточных оболочек, и в то же время значительная часть металла может находиться на поверхности клеточных оболочек или в периплазматическом пространстве. В совокупности это может определять высокую мобильность Sr, в результате чего модификация клеточных оболочек паренхимы стелы не ограничивает его передвижение в более глубокие ткани корня, в том числе в клетки сердцевины [8].

Рассчитанные коэффициенты накопления доказывают, что травянистые растения соснового бора даже в условиях незагрязненных почв, какими являются боровые пески, накапливают ТМ в высоких концентрациях и при этом валовое содержание ТМ в почве не является главным источником данных элементов для растений. Основное поглощение металлов идет за счет их подвижных, более доступных для растений форм, а также за счет их поступления из атмосферы. Относительно соединений Cd, Pb и Ni у растений наблюдается

нарушение функции корневого барьера, о чем свидетельствуют коэффициенты перераспределения ($K_{\Pi} = 1,4; 1,0; 1,0$, соответственно).

Согласно рядам биологического поглощения [6] для травянистой растительности соснового бора элементом энергичного накопления является Cd (11,1); элементами сильного накопления (КБП от 1,1 до 7,6) – Cu, Zn, Pb, Co, Ni, Sr, Mn, а слабого накопления и среднего захвата (КБП 0,7-0,8) – Cr, V, Be. Относительно ПБЭ существенную роль в общем круговороте веществ в лесной экосистеме играют Cd (1,1) > Sr (0,6) > Zn (0,4).

Выводы

1. Травянистые растения соснового бора Семипалатинского Прииртышья даже в условиях обитания на боровых песках накапливают ТМ в высоких концентрациях, основное поглощение идет за счет подвижных форм металлов, а также за счет их поступления из атмосферы, что подтверждают рассчитанные коэффициенты накопления.
2. В фитомассе травянистых растений осуществляется накопление Cu, Pb, Cr, Ni, Be, Mn, Co и Sr, что может быть связано с уровнем организации анатомо-морфологической структуры и физиолого-биохимических функций растений, степенью адаптации их к условиям среды, характером корневых систем, глубиной проникновения корней в почву и различным объемом почвы, из которого растение усваивает ТМ.
3. Травянистые растения из семейства осоковые, ворсянковые, тутовые, подорожниковые накапливают ТМ по акропетальному типу, а растения из семейства капустные и сельдерейные – по базипетальному типу, вероятнее всего, за счет нарушения функций корневого барьера, о чем свидетельствуют коэффициенты перераспределения.

Список литературы

1. Антонов-Каратаев И. Н. О формах и условиях миграции веществ в почвенном профиле // Почвоведение. – 1961. – № 8. – С. 1-12.
2. Кауричев И. С. Особенности генезиса почв временного избыточного увлажнения: дисс. ... д-ра с.-х. наук. – М., 1965. – 523 с.
3. Кауричев И. С. Хелатные железоорганические соединения в почвах // Доклады к VIII Международному конгрессу почвоведов. – М.: Наука, 1964. – С. 158-166.
4. Панин М. С. Миграция тяжелых металлов и пути поступления их в растения // Аккумуляция тяжелых металлов растениями Семипалатинского Прииртышья. – 1999. – С. 23-30.
5. Панин М. С. Эколого-биогеохимическая оценка техногенных ландшафтов Восточного Казахстана. – Алматы: Изд-во «Эверо», 2000. – 338 с.
6. Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. – М.: Астрель-2000, 1999. – 762 с.

7. Половникова М. Г. Изменение активности компонентов системы антиоксидантной защиты и полифенолоксидазы у газонных растений на разных этапах онтогенеза в условиях городской среды // Физиология растений. – 2008. – Т. 55. – № 5. – С. 777-785.
8. Серегин И. В. Распределение тяжелых металлов в растениях и их действие на рост: дисс. ... д-ра биол. наук. – М., 2009. – 333 с.
9. Серегин И. В., Кожевникова А. Д. Усиление накопления и рост ингибирующего действия никеля и свинца на проростки амаранта в присутствии кальция // Физиология растений. – 2009. – Т. 56. – С. 92-96.
10. Ягодин Б. А., Виноградов С. Б., Говорина В. В. Кадмий в системе почва – удобрения – растения – животные организмы и человек // Агрехимия. – 1985. – № 5. – С. 23-26.

Рецензенты:

Лихачев С. Ф., д.б.н., декан факультета экологии Челябинского государственного университета, г. Челябинск.

Сатаева А. Р., д.б.н., профессор кафедры экологии и защиты окружающей среды Государственного университета, г. Семей.