

ресурсы Полесья: оценка, использование, охрана: Материалы Международ. науч.-практ. конф. Пинск, 8–11 июня 2015 г. Пинск, 2015. Ч. 1. С. 162–166.

6. *Матвієнко О. В., Кураєва І. В., Самчук А. І., Войтюк Ю. Ю.* Еколого-геохімічні дослідження території м. Шостка // Пошукова та екологічна геохімія. 2016. № 1(17). С. 20–25.

7. Физико-химические условия образования мобильных форм токсичных металлов в почвах / Самчук А. И. [и др.]. // Минерал. журн. Киев, 1998. № 2. С. 48–59.

8. *Baron S., Carignan J., Ploquin A.* Dispersion of heavy metals (metalloids) in soils from 800-year old pollution (Mont-Lozere, France) // Environ. Sci. Technol. 2006. Vol. 40. P. 5319–5326.

УДК 911.2+502/504(477)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ И МЕХАНИЗМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА-РАСТЕНИЕ»

А. О. Сплодитель¹, Л. Ю. Сорокина², И. В. Кураева¹

¹Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. Н. П. Семеновко НАН Украины, пр. акад. Палладина 34, 03142 Киев, Украина; asploditel@gmail.com

²Институт географии НАН Украины, ул. Владимирская 44, 01034 Киев, Украина

Одно из важных звеньев миграционных потоков тяжёлых металлов (ТМ) в природной среде – их транслокация из почвы в растения. От её характера в значительной степени зависит содержание ТМ в биоте. Актуальными и перспективными для исследования закономерностей накопления и перераспределения ТМ в системе «почва-растение» являются вновь созданные природоохранные объекты – национальные природные парки (НПП), сеть которых в Украине получила развитие в последние 10–15 лет. Эти территории, как правило, характеризуются значительным биотическим и ландшафтным разнообразием, которое и является объектом охраны. В то же время, в результате длительного хозяйственного использования ныне охраняемых и сопредельных территорий здесь часто присутствуют заметные количества техногенных загрязняющих веществ, в том числе ТМ. Для успешной реализации функций, которые выполняют НПП (природоохранной, рекреационной, ограниченного природопользования и др.), необходима всесторонняя геоэкологическая оценка их территории.

Целью исследования является анализ закономерностей распределения ТМ в системе «почва-растение» в ландшафтах модельного природоохранного объекта – Национального природного парка «Нижнесульский».

Общие закономерности и механизмы перераспределения ТМ в системе «почва-растение». ТМ являются необходимым компонентом в метаболизме растений. Однако при высоких содержаниях в почве они способны к значительной аккумуляции растениями и заметным токсичным влияниям. Изучение химического состава растений позволяет установить критерии их индикаторной способности, даёт основания использовать определённые виды растений в качестве биоиндикаторов уровней загрязнения почв [5–7].

Поступление ТМ в растения из почвы контролируют две группы факторов: содержание подвижных форм ТМ в почве, которое регулируется свойствами самой почвы, и биологические особенности растений, определяющие их взаимодействие с ионами ТМ. На поглощение ТМ растениями почва влияет двояким образом. Неоди-

наковая степень закрепления ТМ в почвах свидетельствует о том, что их поступление в растения, в первую очередь, определяется типом почвы и теми её свойствами, которые отвечают за поглотительную способность. На поступление ТМ влияет несколько факторов: видовые особенности растений, тип почвы, концентрация, форма нахождения ТМ, рН почвы, гранулометрический состав, содержание органических веществ, ёмкость поглощения катионов в почве, наличие техногенных источников загрязнения ландшафтов и др. [3, 4].

Почвам с высокими показателями рН, значительным содержанием глинистых минералов, карбоната кальция и органического вещества свойственна высокая поглотительная способность по отношению к ТМ. Такие почвы или полностью блокируют контакты растения с ТМ, или делают эти контакты менее опасными.

Удаление ТМ из почвенного раствора происходит в процессе осаждения или адсорбции. ТМ имеют повышенную способность к адсорбции органическим веществом и оксидами, а также к замещению щелочных и щелочноземельных металлов. В кислых почвах подвижность ТМ повышается и тем самым увеличивается их доступность. Как правило, из кислых почв ТМ поступают в растения в значительно больших количествах, чем из слабощелочных, нейтральных или слабокислых. В то же время растения имеют защитные свойства к поглощению ТМ. У них существует несколько систем контроля за поступлением ионов. В основном они находятся в корнях и репродуктивных органах (семенах и плодах). Химический состав растений зависит от состава почв, на которых они произрастают, но не повторяют его, потому что избирательно поглощают необходимые элементы в соответствии со своими физиологическими и биохимическими потребностями [8]. Уровень накопления ТМ растениями зависит от их генетических и видовых особенностей.

Невзирая на существенную изменчивость способностей растений к накоплению металлов, биоаккумуляция элементов имеет определённую тенденцию. Это позволяет упорядочить ТМ в несколько групп: 1) Cd, Cs, Rb – элементы интенсивного поглощения; 2) Zn, Mo, Cu, Ni, Pb, As – средней степени поглощения; 3) Mn, Cr, Co – слабого поглощения; 4) Se, Fe, Ba, Te – элементы труднодоступны для растений [4].

Принципы и методы нормирования количества ТМ в системе «почва-растение» являются дискуссионными вопросами. Сложные процессы взаимодействия ТМ с компонентами ландшафта делают проблематичным вопрос о нормировании содержания поллютантов в рамках экологически допустимых концентраций.

Ландшафтные условия территории исследования. НПП «Нижнесульский» расположен в долине р. Сулы – левого притока р. Днепра. В соответствии с физико-географическим районированием Украины [1], территория Парка расположена в пределах Левобережноднепровского Лесостепного края Днепроградской террасовой равнины. В геоструктурном отношении она приурочена к юго-западному борту Днепроовско-Донецкой впадины. Территория исследования представлена ландшафтами лёссовых и моренно-водноледниковых надпойменных террас и пойм рек. Отличительной особенностью территории является значительное разнообразие почвенного покрова, в котором широко представлены засоленные почвы.

Потенциальными источниками поступления загрязняющих веществ, в том числе ТМ, в ландшафты исследуемой территории являются крупные промышленные предприятия, расположенные на незначительном удалении от НПП «Нижнесульский»: ОАО «Полтавский горнообогатительный комбинат» в г. Комсомольске, АО «Укртатнафта» в г. Кременчуге, ОАО «Кременчугский сталелитейный завод», ООО

«ТФ «Кременчуг-нефтепродукт» и другие. Также загрязнение почв связано здесь с сельскохозяйственной деятельностью.

Ландшафтные, ландшафтно-геохимические исследования и анализ загрязнения территории ТМ [2, 9] дали возможность выявить определённые закономерности накопления ТМ в системе «почва-растение» в ландшафтах исследуемой территории.

Исследования проведены в течение вегетационных периодов в 2015 и 2016 гг. Для изучения были выбраны участки в разных ландшафтных условиях территории парка с различным режимом охраны. Пробоотбор растений производился на участках проведения комплексных полевых ландшафтных исследований с заложением и описанием почвенных профилей и отбором почвенных образцов.

Подготовка растительных образцов проводилась по общепринятым методикам. Растения отбирали вместе с корневой частью, выкапывая из земли в разных точках мониторинговых площадок (точечные пробы) (ГОСТ 27262-87). Из растений, принадлежащих к одному виду, формировалась объединённая проба. После отбора растения высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали. Корневая часть перед измельчением предварительно очищалась от частиц почвы для избежания их попадания в образец. Содержание ТМ в фитомассе растений определяли в их зольных растворах методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе марки СТЕ-1 в Институте геохимии, физики минералов и рудообразования им. Н. П. Семененко НАН Украины. Для определения степени поглощения ТМ в системе «почва-растение» в исследуемых образцах проведен химический анализ содержания в растениях ТМ I класса опасности (Pb), II класса опасности (Ni, Cu, Cr) и других. Количественную оценку поступления токсичных микроэлементов из почвы в растения проводили, рассчитывая коэффициент биологического накопления (КБН), который определяется соотношением содержания металла в единице массы акцептора (растения в пересчёте на его сухую массу) и донора (почвы).

Анализ данных показал, что распределение ТМ в растительности территории НПП характеризуется значительной неоднородностью. Минимальное и максимальное значение валовой концентрации загрязнителей отличается до 100 раз. Так, содержание соединений V изменяется в диапазоне от 1 до 40 мг/кг, соединений Cr – от 2 до 30 мг/кг, Cu – от 4 до 100 мг/кг, Ni – от 1 до 50 мг/кг, Pb – от 2 до 25 мг/кг, Mn – от 10 до 4 500 мг/кг, Ti – от 2 до 3 000 мг/кг.

С отдалением от основных источников загрязнения наблюдается уменьшение валовой концентрации Ni, Pb и Cr, а концентрация Mn и V остается стабильно высокой. По содержанию валовых форм ТМ в растительности их можно расположить в следующий ряд: $Mn > Cu > Cr > Pb > V > Ni > Ti$. Такое распределение указывает на возможность поступления значительного количества соединений ТМ первых классов опасности из почвы в растения и их опосредованного влияния на состояние здоровья населения территории НПП.

Результаты расчётов коэффициентов биологического накопления по средним величинам содержания металлов в растениях позволили систематизировать исследуемые элементы по интенсивности их накопления в растительности. Согласно шкале И. А. Авессаламовой (1987) и В. В. Добровольського (1998), к элементам сильного накопления ($КБН > 1$) отнесены Cu, Ni, Mn, Ti. Слабое накопление ($КБН < 1$) характерно для Cr, V, Pb. Это дополнительно иллюстрируют сравнительные ряды интенсивности валового накопления исследуемых ТМ в разных видах растений территории НПП.

Результаты наших исследований показали, что все проанализированные виды растений в наибольшем количестве аккумулировали Cu и Mn, на втором месте по интенсивности накопления находился Pb, далее – Cr и V. В разрезе отдельных видов растений высокую аккумулирующую способность по отношению к Cu демонстрировали клён остролистный (*Acer platanoides*), а низкую – ива пепельная (*Salix cinerea* L.) и сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria*). Представители этих видов в наименьших количествах накапливали также V и Ti, а максимальные количества этих элементов концентрировали ежа сборная (*Dactylis glomerata*) и погребок поздний узколистный (*Rhinanthus major*).

В целом же наблюдалась тенденция увеличения концентрации ТМ в древесных видах, имеющих рассеченное строение листовой пластинки или же опушение либо восковой налёт на листьях, что можно объяснить усилением фиксации загрязнителей, поступающих аэральным путем, на поверхности листьев. Стоит отметить, что древесная растительность в целом накапливала больше ТМ, чем травянистая. В древесной растительности больше всего варьирует содержание марганца, а в травянистой – Pb и Cu.

В целом фитоаккумуляция металлов в условиях надпойменной террасы и поймы р. Сулы характеризуется видовой специфичностью и в значительной степени связана с условиями произрастания, в первую очередь с полиметаллическим загрязнением почвы и атмосферы. Наблюдается более сильное биологическое поглощение зольных элементов в органах листовых пород по сравнению с хвойными. В хвое содержание Pb в среднем составляет 0,1 мг/кг, в то время как в листьях – 0,6 мг/кг. Содержание Cu в ветках сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) 0,4 мг/кг, содержание в ветках клёна остролистного (*Acer platanoides*) 2–5 мг/кг. Кора клёна активнее накапливает Pb и Cu. Таким образом, абсолютное количество всех минеральных элементов, которые участвуют в биологическом круговороте под пологом широколиственных лесов, выше, чем в хвойных.

Анализ проведённых исследований показывает, что в пределах одного вида растений распределение ТМ носит равномерно-дисперсный характер, но при этом колебания содержания отдельных ТМ в растениях может достигать от $\pm 7\%$ до $\pm 25\text{--}35\%$. Наибольшая способность к биоаккумуляции выражена у Mn и Cu, поскольку эти металлы относятся к биогенным микроэлементам. В целом, содержание ТМ в растениях территории НПП «Нижнесульский» является невысоким и может считаться фоновым для данного региона.

Если рассматривать аккумуляцию ТМ разными видами растений, то, как и можно было ожидать, наибольшей способностью к биоаккумуляции обладает щитовник мужской, погребок поздний узколистный и ежа сборная, а минимальной – древесные виды растений, в частности сосна обыкновенная. Перечисленные виды растений можно использовать в качестве биоиндикаторов загрязнения территории парка ТМ и как растения, пригодные для выведения из почвы ТМ (фиторемедиации).

Выявленные закономерности могут быть использованы при прогнозировании процессов накопления ТМ в растительном ценозе, которые являются важной составляющей моделирования геоэкологического состояния территории НПП, нормирования антропогенной нагрузки на участки парка с разным режимом охраны.

Библиографические ссылки

1. Географічна карта «Ландшафтні комплекси Національного природного парку «Нижньосульський» та прилеглих територій» (у цифровому форматі, базовий масштаб

1 : 25 000) / А. О. Сплодитель. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68925. Державна служба інтелектуальної власності України. Дата реєстрації 06.12.2016.

2. Географічна карта «Ландшафтно-геохімічна карта Національного природного парку «Нижньосульський» та прилеглих територій» (у цифровому форматі, базовий масштаб 1 : 25 000) / Л. Ю. Сорокіна, А. О. Сплодитель, С. Г. Брегеда. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68926. – Державна служба інтелектуальної власності України. Дата реєстрації 06.12.2016.

3. *Панин М. С.* Миграция тяжёлых металлов и пути поступления их в растения // Аккумуляция тяжёлых металлов растениями Семипалатинского Прииртышья. 1999. С. 23–30.

4. *Панин М. С.* Контроль уровня загрязнённости тяжёлыми металлами сельскохозяйственной продукции // Пища. Экология. Человек: Докл. 3-й Международ. науч.-техн. конф. М., 1999. С. 126.

5. *Позняк С. С.* Фоновое содержание тяжёлых металлов в почвах и растительности Центральной зоны Республики Беларусь // Изв. Тульского гос. ун-та. Естественные науки. 2011. Вып. 1. С. 254–264.

6. *Позняк С. С.* Содержание некоторых тяжёлых металлов в растительности полевых и луговых агрофитоценозов в условиях техногенного загрязнения почвенного покрова // Вестн. Томского госун-та. Биология. 2011. № 1(13). С. 123–137.

7. *Демура В. І., Готвянська В. О., Павличенко А. В.* Розподіл та накопичення важких металів в рослинах та ґрунтах на територіях розміщення відходів вуглевидобутку // Геотехнічна механіка. 2013. Вип. 111. С. 23–29.

8. *Садовникова Л. К.* Показатели загрязнения почв тяжёлыми металлами и неметаллами в почвенно-химическом мониторинге // Почвоведение. 1985. № 10. С. 84–89.

9. Серія географічних карт: Розподіл важких металів (Ag, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Ti, V) та поліелементного забруднення (за сумарним показником забруднення) у сучасному ґрунтовому покриві (горизонт 0-5 см) Національного природного парку «Нижньосульський» та прилеглих територій» (у цифровому форматі, базовий масштаб 1 : 50 000) / І. В. Кураєва, Л. Ю. Сорокіна, А. О. Сплодитель. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68927. Державна служба інтелектуальної власності України. Дата реєстрації 06.12.2016.