

УДК 504.054:[546.74+546.47]:633.88

Особенности накопления цинка и никеля некоторыми лекарственными растениями, произрастающими на территориях с различной степенью техногенной нагрузки

Головин А. В., Скрыпник Л. Н., Масютин Я. А.

Институт живых систем Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта
Калининград, Россия
anton.golovin00@mail.ru

Статья посвящена изучению особенностей накопления цинка и никеля некоторыми видами лекарственных растений. Объектами данного исследования выступили виды растений, которые характеризуются богатым комплексом фитохимических компонентов и проявляют различную биологическую активность: крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), золотарник канадский (*Solidago canadensis* L.) и чертополох колючий (*Carduus acanthoides* L.). С использованием метода рентгенофлуоресцентной спектроскопии выполнен анализ на содержание тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Ni, Mn, V) в почвах пробных площадок с различной степенью техногенной нагрузки: лесная опушка поселка Дубровка Багратионовского района Калининградской области; территория парка Макса Ашманна города Калининграда; территория вблизи Калининградской ТЭЦ-2 города Калининграда. Показано, что почва, собранная вблизи поселка Дубровка, отличалась более низким содержанием практически всех исследованных элементов. В почвах на территории вблизи Калининградской ТЭЦ-2 и на территории парка М. Ашманна выявлено превышение нормативных санитарных показателей для мышьяка, цинка и никеля (площадка около ТЭЦ-2). Проанализировано содержание цинка и никеля в различных органах исследуемых видов растений (корни, стебли, листья), произрастающих на почвах пробных площадок. Для характеристики особенностей накопления цинка и никеля в растениях были рассчитаны: коэффициент задержки, коэффициент накопления и интенсивности перехода элементов. Установлено, что содержание цинка в растениях варьировалось от 50 до 250 мг/кг, никеля – от 10 до 65 мг/кг в зависимости от вида растения и места произрастания. На основании анализа полученных данных было выявлено, что в листьях золотарника канадского и чертополоха колючего происходило накопление цинка (содержание цинка было в 1,2–2,6 раза выше по сравнению со стеблем и корнем). В листьях крапивы двудомной при минимальном техногенном воздействии накапливался никель (содержание никеля было в 2–3 раза выше по сравнению со стеблем и корнем). Также было установлено, что корневая система изучаемых видов растений выполняет депонирующую функцию по отношению к никелю в условиях высокой техногенной нагрузки.

Ключевые слова: цинк, никель, крапива двудомная, золотарник канадский, чертополох колючий, накопление.

ВВЕДЕНИЕ

Важное место среди большинства негативных последствий, связанных с деятельностью человека, занимает загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами. Термин «тяжелые металлы» не имеет четкого, общепринятого определения, что создает некоторые трудности при их анализе и изучении. Как правило, к тяжелым металлам относят химические элементы с относительной атомной массой >50 а.е.м., атомным номером, начиная с 23, или плотностью >5 г/см³, являющиеся металлами или металлоидами (Ильин, 1991; Теплая, 2013; Титов и др., 2014). Эти химические элементы обладают высокой токсичностью и способностью передаваться по пищевым цепям (Титов и др., 2014). Как правило, к ним относят Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Cd, Bi, Sn, Fe, Mn, Hg и другие.

Несмотря на уменьшение поступления тяжелых металлов за счет спада производств на промышленных предприятиях, в России проблема загрязнения ими стоит остро: до 11 % российских почв имеют высокие показатели загрязнения тяжелыми металлами (Титов и др., 2014; Barsova et al., 2019). Их поступление обусловлено как природными процессами (ветровая эрозия, вулканическая деятельность, лесные пожары, биологические процессы и др.), так и деятельностью человека (автотранспорт, сельское хозяйство, горнодобывающий, металлургический, энергетический, химический, нефтяной промышленные комплексы,

полигоны ТБО и мусороперерабатывающие предприятия) (Джувеликян и др., 2009; Снежко, Шевченко, 2011; Теплая, 2013; Титов и др., 2014). Но важно отметить, что увеличение концентраций тяжелых металлов в поверхностном слое почв напрямую связано именно с техногенными воздействиями (Титов и др., 2014).

Практически всегда увеличение концентрации тяжелых металлов в почве приводит к повышению их уровня в растительных организмах. При этом поступая в больших количествах, тяжелые металлы негативно влияют на жизнедеятельность растений: вызывают торможение роста, развития, нарушение процессов дыхания и фотосинтеза, нарушение водного обмена и в конечном итоге могут привести к гибели (Титов и др., 2014). Стоит, однако, отметить, что многие тяжелые металлы (например, Cu, Ni, Zn, Co, Mo) являются в физиологических концентрациях эссенциальными для растений микроэлементами, активно участвующими в метаболических процессах и обуславливающими его нормальное функционирование (Ильин, 1991; Титов и др., 2014). Например, известно, что цинк участвует в окислительно-восстановительных процессах, в синтезе нуклеиновых кислот и белков, связан с деятельностью гормонов, входит в состав многих ферментов (карбоксипептидаза С, алкогольдегидрогеназа и др.) либо активирует их работу (Ильин, 1991; Перельман, Касимов, 1999; Титов и др., 2011, 2014). Роль никеля в растительных организмах менее изучена. Установлено, что он входит в состав нескольких ферментов, таких, например, как глиоксалаза-I и уреазы, участвующих в метаболизме азота в высших растениях (Seregin, Kozhevnikova, 2006; Титов и др., 2011; Shahzad et al., 2018).

По способности накапливать тяжелые металлы растения принято делить на три группы:

- 1) аккумуляторы – растения, которые накапливают металлы в основном в надземных органах и при низком, и при высоком содержании их в почве;
- 2) индикаторы – растения, концентрация в которых тяжелых металлов отражает его содержание в окружающей среде;
- 3) исключения – растения, которые накапливают металлы в основном в корнях, поступление в надземную часть ограничено (Титов и др., 2011).

Большая часть наземных растений, произрастающих на планете, относится к последней категории – к растениям-исключениям. Однако среди наземных растений есть виды, которые активно накапливают тяжелые металлы (например, некоторые представители семейства Brassicaceae и Crassulaceae) (Гладков, Гладкова, 2019; Awa, Nadibarata, 2020; Peng et al., 2020). Виды растений, активно поглощающие тяжелые металлы из окружающей среды, изучаются, как правило, с точки зрения их фиторемедиационного потенциала (Awa, Nadibarata, 2020). При этом аккумулирующей способностью обладают и некоторые лекарственные растения, для которых важно исследовать особенности поступления и распределения тяжелых металлов с точки зрения дальнейшего безопасного использования этих растений в качестве сырья в фармацевтической промышленности. В качестве примера можно привести представителей рода *Achillea*, имеющих богатый комплекс биологически активных соединений, однако, как отмечается в некоторых исследованиях, некоторые виды этого рода проявляют высокую аккумулирующую способность по отношению к тяжелым металлам, что может существенно ограничивать их использование в качестве фармацевтических препаратов (Семенова, 2020).

На территории Калининградской области произрастает широкий спектр растений, проявляющих лекарственные свойства. В число таких растений входят, как широко распространенные на территории области виды – золотарник канадский (*S. canadensis*) и крапива двудомная (*U. dioica*), так и менее распространенные такие, как чертополох колючий (*C. acanthoides*) (Дедков, 1999; Данилкина, Дедков, 2020).

Комплекс биологически активных веществ золотарника канадского представлен в основном фенольными соединениями (флавоноиды, дубильные вещества, кумарины, фенолкарбоновые кислоты) и в меньшей степени эфирными маслами, тритерпеновыми сапонинами. Уже сейчас экстракты этого вида растения широко используются в России и в зарубежных странах как компоненты лекарственных препаратов для лечения заболеваний мочеполовой системы (Сулейманова и др., 2017; Сулоев и др., 2019). Не менее богата биологически активными соединениями и крапива двудомная. В её составе также отмечается

высокое содержание фенольных соединений (фенолкарбоновые кислоты, флавоноиды, лигнаны, кумарины, дубильных веществ), а также присутствуют органические кислоты, тритерпеноиды, каротиноиды (Сошникова, 2006; Копытько и др., 2011). Фитопрепараты на основе крапивы используются для лечения внутренних кровотечений различного рода, заболеваний печени, заболеваний легких (Чернявских, 2019). По некоторым показателям крапиву двудомную превосходит чертополох колючий. В корнях этого вида содержание антоцианов и флавонолов выше, чем в корнях крапивы двудомной (Захаров и др., 2018). Листья и цветки чертополоха колючего также отличаются высоким содержанием фенольных кислот (кофейной, хлорогеновой, феруловой, кумаровой и др.) и флавоноидов (гликозидов апигенина, кверцетина, лютеолина) (Kozuga et al., 2019). Экстракты чертополоха проявляют гепатопротекторное, антибактериальное, противогрибковое и противовирусное фармакологическое действие (Varut et al., 2018).

Целью данной работы явилось исследование особенностей накопления цинка и никеля растениями золотарника канадского (*S. canadensis*), крапивы двудомной (*U. dioica*) и чертополоха колючего (*C. acanthoides*), произрастающими на территориях с различной степенью техногенной нагрузки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследования настоящей работы стали почвы пробных площадок и растения (золотарник канадский, крапива двудомная и чертополох колючий), произрастающие на них, расположенные на территории Калининградской области: парк имени Макса Ашманна (г. Калининград), Калининградская ТЭЦ-2 (г. Калининград) и лесная опушка (п. Дубровка, Багратионовский район, Калининградская область). Методом «конверта» на пробных площадках были отобраны пробы почв и растений (согласно ГОСТ Р 58588-2019). Почвенные пробы были освобождены от остатков растений и беспозвоночных, высушены, измельчены и просеяны через сито с диаметром 0,2 мм. Средняя проба была получена методом квартования. Пробы растений были представлены корнями, стеблями и листьями изучаемых видов. Части растений были предварительно промыты, высушены при температуре 50 °С. По окончании высушивания пробы измельчались до тонкодисперсного состояния. Подготовленные таблетки-излучатели из проб почв и растений исследовались на содержание тяжелых металлов методом РФС с использованием прибора «Спектроскан МАКС-GV» (НПО Спектрон, Россия) с серебряной трубкой анода при напряжении 40,1 кВ (Методика..., 2004; Григорьев, 2012). Время экспозиции для почвенных проб составляло 40 мин, для растительных проб – 30 мин. В образцах почвы определяли валовое содержание Pb, As, Zn, Cu, Ni, Mn и V, в растительных образцах – Zn и Ni. Измерения проводили в трех повторностях.

По полученным данным были рассчитаны индексы, характеризующие поглощение ТМ растениями из почвы и распределение тяжелых металлов в органах растений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований было установлено валовое содержание некоторых тяжелых металлов в почвах пробных площадок, отличающихся различной степенью техногенной нагрузки. Результаты представлены в таблице 1.

Из представленных в таблице 1 данных видно, что в целом почва, собранная вблизи поселка Дубровка, отличалась более низким содержанием практически всех исследованных элементов. Данная территория по сравнению с двумя другими расположена в удалении от автомобильных дорог и промышленных предприятий и представляет собой площадку с наименьшим влиянием техногенных факторов. Кроме того, стоит отметить, что на исследуемых площадках на территории вблизи Калининградской ТЭЦ-2 и на территории парка М. Ашманна выявлено превышение ПДК/ОДК для мышьяка и цинка и никеля (площадка около ТЭЦ-2). Для остальных ТМ превышение ПДК не обнаружено. На

исследуемой площадке, расположенной вблизи леса поселка Дубровка Багратионовского района, превышение ПДК/ОДК исследуемых ТМ не выявлено.

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в почве исследуемых площадок
(среднее значение $\pm$ стандартное отклонение)

Химический элемент	Пробные площадки			ОДК* (ПДК**)
	п. Дубровка	Парк М. Ашманна	ТЭЦ-2	
Pb, мг/кг	18,53 $\pm$ 9,23	19,01 $\pm$ 9,45	19,07 $\pm$ 9,51	32*
As, мг/кг	1,09 $\pm$ 3,17	7,13 $\pm$ 3,26	8,51 $\pm$ 3,33	2*
Zn, мг/кг	26,28 $\pm$ 1,75	82,25 $\pm$ 2,25	74,88 $\pm$ 2,21	55*
Cu, мг/кг	0	0	0	33*
Ni, мг/кг	4,62 $\pm$ 1,84	18,75 $\pm$ 1,97	20,61 $\pm$ 2,01	20*
Mn, мг/кг	295,84 $\pm$ 10,73	218 $\pm$ 9,56	304,10 $\pm$ 11,53	1500**
V, мг/кг	19,20 $\pm$ 7,76	60,98 $\pm$ 9,21	69,39 $\pm$ 9,65	150**

Примечание к таблице. * – ориентировочно-допустимые концентрации для валового содержания согласно ГН 2.1.7.2511-09; ** – предельно-допустимые концентрации для валового содержания согласно ГН 2.1.7.2041-06.

Результаты определения содержания цинка и никеля в различных органах исследуемых растений (золотарника канадского, крапивы двудомной и чертополоха колючего) представлены на рисунках 1 и 2.

Более низким накоплением цинка характеризовались растения, произрастающие на территории вблизи поселка Дубровка, почвы которой отличалась также минимальным содержанием цинка по сравнению с другими пробными площадками (рис. 1). Максимальное содержание цинка выявлено во всех исследованных растениях, произрастающих на территории возле ТЭЦ-2. При этом наибольшая разница в содержании цинка в растениях с разных пробных площадок зафиксирована для золотарника канадского (в 2,5 раза), а минимальная – для чертополоха (в 1,6 раз). Стоит отметить, что при повышенном содержании цинка в почве растения золотарника накапливали более высокие концентрации цинка, по сравнению с растениями крапивы двудомной и чертополоха колючего. Ранее в работе (Bielecka, Krolak, 2019) также было установлено, что накопление цинка в растениях золотарника канадского прямо пропорционально его концентрации в почве.

Сравнительный анализ распределения цинка в различных органах исследованных растений показал, что для растений золотарника канадского и чертополоха колючего наиболее высокое содержание цинка было характерно для листьев, тогда как растения крапивы характеризовались более или менее равномерным распределением данного элемента по всем органам, особенно при высоком содержании цинка в почве. Накопление цинка в надземных частях (преимущественно в листьях) золотарника канадского свидетельствует о фитоэкстракционной способности данного растения по отношению к цинку (Bielecka, Krolak, 2019). Выявленная в нашем исследовании тенденция к накоплению цинка в листьях чертополоха колючего позволяет также рассматривать данный вид в качестве растения, обладающего высоким потенциалом к фитоэкстракции цинка из почв. Однако для более обоснованного вывода необходимо проведение дополнительных исследований по накоплению цинка растениями чертополоха колючего, произрастающими на разных типах почв с более широким диапазоном варьирования концентрация цинка в почве.

В отличие от цинка содержание никеля в исследованных растениях в меньшей степени зависело от уровня данного элемента в почвах пробных площадок (рис. 2). Так, для золотарника канадского содержание никеля в растениях, произрастающих возле поселка Дубровка и возле ТЭЦ, было примерно одинаковым (43–44 мг/кг суммарно по всем частям)

и минимальным в растениях с территории парка М. Ашманна (8 мг/кг). При этом уровень никеля в почве парка М. Ашманна и возле ТЭЦ-2 различались незначительно. В растениях крапивы двудомной минимальное содержание никеля установлено в образцах, собранных с территории возле ТЭЦ-2 (почва с максимальным содержанием никеля), а пробы с двух других территорий достоверно не различались. Для растений чертополоха колючего, напротив, максимальный уровень никеля выявлен в образцах с территории, расположенной возле ТЭЦ-2.

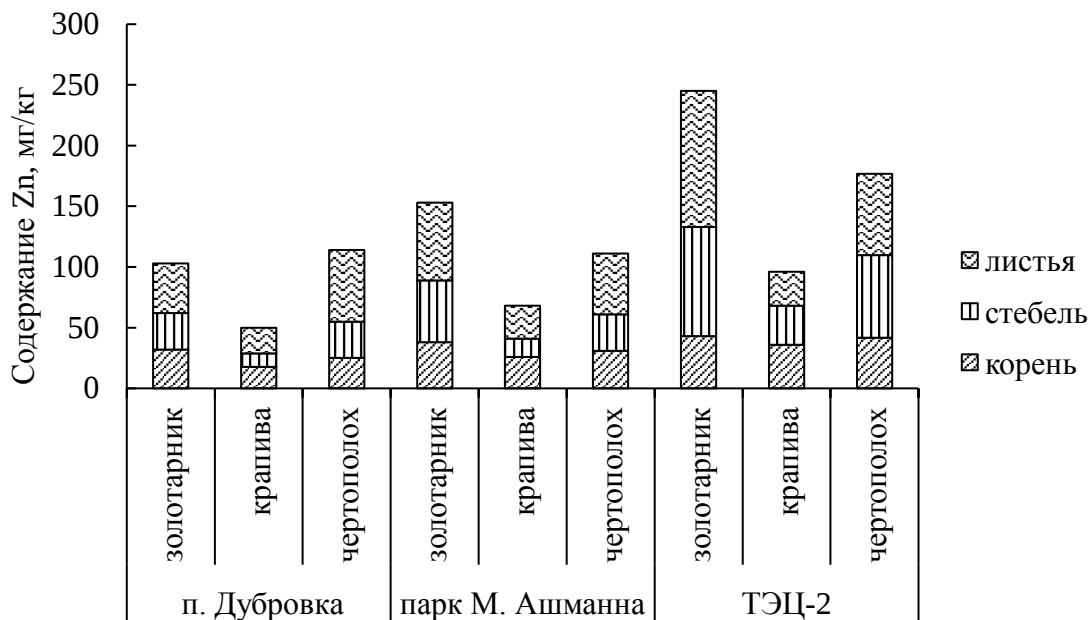


Рис. 1. Содержание цинка в различных частях исследуемых растений в зависимости от места произрастания

Отличалось от цинка и распределение никеля по органам исследованных растений. Для всех растений, произрастающих на почвах с высоким содержанием никеля, максимальный уровень этого элемента был определен в корнях. Особенно высоким содержанием никеля отличались корни крапивы (парк М. Ашманна) и золотарника и чертополоха (ТЭЦ-2). При низком содержании никеля в почве максимальный уровень его накопления отмечался в листьях исследованных растений, за исключением золотарника, для которого и в этом случае максимум был установлен в корнях.

В настоящее время Фармакопея XIV (ФС 1.5.3.0009.15) нормирует содержание в лекарственных растениях таких элементов, как Pb, Cd, Hg, As, для Zn и Ni таких норм не установлено. Согласно (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989) избыточная (токсичная) концентрация цинка для растений находится в пределах от 100 до 400 мг/кг, никеля – от 10 до 100 мг/кг сухого вещества. В соответствие с этими значениями все исследованные виды растений накапливали токсичные концентрации никеля. В отношении цинка растения крапивы, произрастающие на всех пробных площадках, характеризовались относительно невысоким содержанием этого химического элемента (менее 100 мг/кг), остальные изучаемые виды накапливали токсические концентрации цинка.

Коэффициент задержки (КЗ), или акропетальный коэффициент, характеризует депонирующие свойства корня и рассчитывается как отношение содержания элемента в корне к его содержанию в надземной части растений в соответствии с формулой (Сибгатуллина и др., 2014):

$$K3 = \frac{C(\text{Э})_{\text{корень}}}{C(\text{Э})_{\text{надзем. часть}}},$$

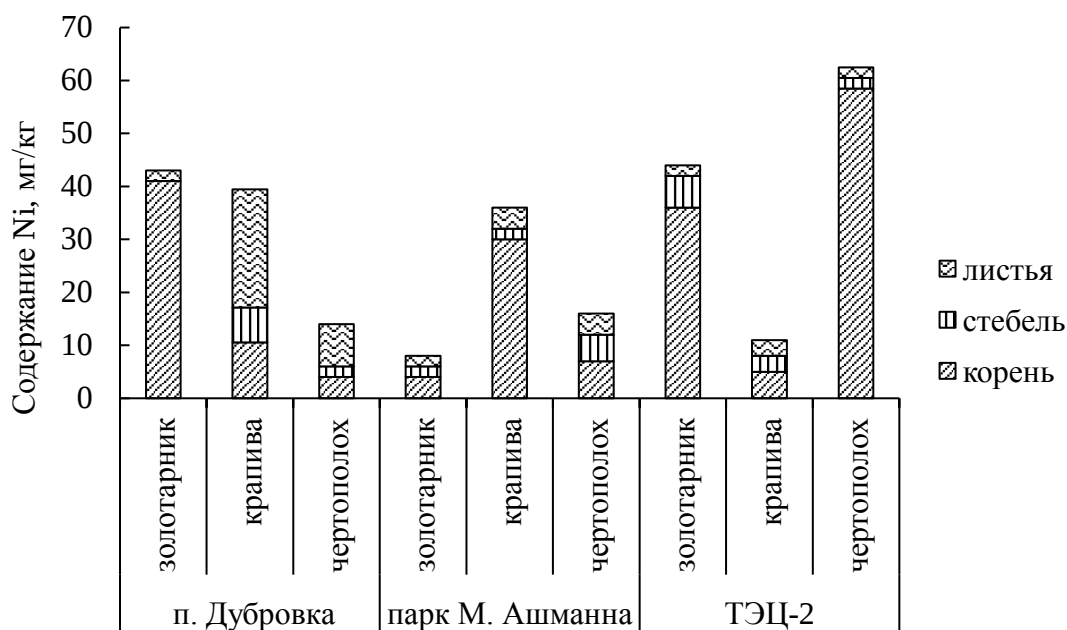


Рис. 2. Содержание никеля в различных частях исследуемых растений в зависимости от места произрастания

где: КЗ – коэффициент задержки; $C(\text{Э})_{\text{корень}}$ и $C(\text{Э})_{\text{надзем. часть}}$ – концентрации химического элемента в корнях и надземной части растения соответственно, мг/кг.

Для сравнения аккумулирующей способности растений были рассчитаны коэффициенты накопления (КН), представляющие собой отношение содержания элемента в сухой массе растения к его валовому содержанию в почве в соответствии с формулой 2 (Глазовский, 1987):

$$\text{КН} = \frac{C(\text{Э})_{\text{растение}}}{C(\text{Э})_{\text{почва}}},$$

где: КН – коэффициент накопления; $C(\text{Э})_{\text{растение}}$ и $C(\text{Э})_{\text{почва}}$ – концентрации химического элемента во всем растении и почве, на котором растение произрастает, соответственно, мг/кг.

Результаты расчетов коэффициентов задержки и накопления для каждого вида растения представлены в таблице 2.

Анализ коэффициентов задержки цинка показал, что все исследованные виды растений отличались низкой депонирующей способностью корней. КЗ для всех растительных образцов был менее 1 вне зависимости от места произрастания растений. Несколько иная ситуация наблюдалась для никеля. Как уже отмечалось выше, некоторые растения активно накапливали никель именно в корнях. В частности, высокие показатели коэффициентов задержки были установлены для растений золотарника, собранных в поселке Дубровка и возле ТЭЦ-2 (20,5 и 4,5 соответственно), растений чертополоха с территории возле ТЭЦ-2 (14,6) и для растений крапивы, произрастающих в парке М. Ашманна (5,0). Более высокое накопление никеля в корнях по сравнению с цинком связано, прежде всего, с высокой биофильностью последнего.

Цинк, в отличие от никеля, обладает более широким спектром функций в растительных организмах, в частности он входит в состав многочисленных ферментов, участвует в репликации ДНК, регуляции экспрессии ряда генов, гормональной регуляции, а также обеспечивает целостность мембран. Несмотря на то, что никель также является эссенциальным для растений микроэлементом, однако потребность в нем у растений значительно ниже по сравнению с цинком. Порог достаточной концентрации никеля

составляет 0,1–5 мг/кг, цинка – 27–150 мг/кг сухого вещества (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). При этом для растений более характерен избыток никеля, чем его дефицит. Как правило, избыточное накопление никеля приводит к серьезным последствиям для растения – снижению биомассы, замедлению роста, нарушениям процессов фотосинтеза, абсорбции питательных веществ и транспирации, хлорозу и некрозу листьев (Ahmad, Ashraf, 2012). Таким образом, концентрирование никеля в корнях растений и сокращение его транслокации в надземные органы может рассматриваться в качестве защитной реакции растений от его токсического действия.

Таблица 2

Коэффициенты задержки и накопления ТМ исследуемыми видами растений в зависимости от места произрастания

Вид растения	Пробная площадка	Цинк		Никель	
		КЗ	КК	КЗ	КК
Золотарник	п. Дубровка	0,45	3,96	20,5	8,60
	Парк М. Ашманна	0,33	1,87	1,00	0,42
	ТЭЦ-2	0,21	3,27	4,50	2,10
Крапива	п. Дубровка	0,55	4,38	0,37	7,89
	Парк М. Ашманна	0,62	0,83	5,00	1,89
	ТЭЦ-2	0,60	1,28	0,83	0,52
Чертополох	п. Дубровка	0,28	4,38	0,40	2,80
	Парк М. Ашманна	0,39	1,35	0,78	0,84
	ТЭЦ-2	0,31	2,36	14,6	2,98

Как правило, при низком содержании элемента в почве накопительная способность растений увеличивается. В проведенном нами исследовании практически для всех растений, собранных с различных пробных площадок, коэффициенты накопления составляли более 1, как для цинка, так и для никеля. Однако так как разные виды растений отличаются разной потребностью в тех или иных микроэлементах, это нашло отражение и в полученных нами результатах. Так, для никеля наиболее высокие коэффициенты накопления установлены для растений золотарника и крапивы, произрастающих на территории с низким содержанием никеля в почве (8,60 и 7,89 соответственно). Для растений чертополоха КН были в целом ниже – максимальный составил 2,98 и был характерен, напротив, для растений, произрастающих на территории возле ТЭЦ, то есть на почве с высоким содержанием никеля. Высокие коэффициенты накопления для никеля могут быть связаны с высоким содержанием азота в почве. Считается, что крапива является биоиндикатором по отношению к азоту, то есть в большинстве случаев это растение произрастает на почвах, богатых им (Пестова, 2020). Роль никеля в высших растениях, главным образом, связывают с работой фермента уреазы (Ahmad, Ashraf, 2012). Данный фермент катализирует реакцию перевода азота мочевины в аммонийный азот, который в дальнейшем вовлекается в общий метаболизм азота в организме, в том числе в биосинтез различных азотистых соединений (Ahmad, Ashraf, 2012). Таким образом, растениям, произрастающим на почвах с высоким содержанием азота, необходим никель для поддержания оптимальной активности уреазы, обеспечивающей метаболизм азота в растении.

Для более подробного изучения транслокации цинка и никеля по исследуемым растениям также были рассчитаны коэффициенты интенсивности (Ефремов и др., 2015) перехода тяжелых металлов из почвы в корень:

$$I_{\text{почва-корень}} = \frac{C(\text{Э})_{\text{корень}}}{C(\text{Э})_{\text{почва}}}$$

где: $I_{\text{почва-корень}}$ – интенсивность перехода элемента из почвы в корневую систему растения,

$C(\text{Э})_{\text{корень}}$ и $C(\text{Э})_{\text{почва}}$ – концентрации химического элемента в корневой системе растения и почве, на которой произрастает.

Из корня в стебель:

$$I_{\text{корень-стебель}} = \frac{C(\text{Э})_{\text{стебель}}}{C(\text{Э})_{\text{корень}}}$$

где: $I_{\text{корень-стебель}}$ – интенсивность перехода элемента из корневой системы в стебель растения; $C(\text{Э})_{\text{стебель}}$ и $C(\text{Э})_{\text{корень}}$ – концентрации химического элемента в стебле и корневой системе растения.

Из стебля в листья:

$$I_{\text{стебель-листья}} = \frac{C(\text{Э})_{\text{листья}}}{C(\text{Э})_{\text{стебель}}}$$

где: $I_{\text{стебель-листья}}$ – интенсивность перехода элемента из стебля в листья растения, $C(\text{Э})_{\text{листья}}$ и $C(\text{Э})_{\text{стебель}}$ – концентрации химического элемента в листьях и стебле растения.

Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Интенсивности перехода цинка и никеля в системе почва – корень – стебель – листья

Вид растения	Пробная площадка	Цинк			Никель		
		Почва – корень	Корень – стебель	Стебель – листья	Почва – корень	Корень – стебель	Стебель – листья
Золотарник	п. Дубровка	1,23	0,93	1,37	8,20	0	*
	Парк М. Ашманна	0,46	1,34	1,25	0,21	0,50	1,00
	ТЭЦ-2	0,57	2,09	1,24	1,71	0,17	0,33
Крапива	п. Дубровка	0,68	0,61	1,91	2,20	0,64	3,14
	Парк М. Ашманна	0,32	0,58	1,80	1,58	0,07	2,00
	ТЭЦ-2	0,48	0,89	0,88	0,24	0,6	1,00
Чертополох	п. Дубровка	0,96	1,20	1,97	0,80	0,50	4,00
	Парк М. Ашманна	0,38	0,97	1,67	0,37	0,71	0,80
	ТЭЦ-2	0,56	1,62	1,42	2,79	0,03	1,00

Примечание к таблице. * расчет не проводился.

Ранее нами отмечалось о возможной схожести к накоплению цинка у растений золотарника канадского и чертополоха колючего. При анализе коэффициентов интенсивностей перехода эта схожесть проявлялась более выражено. Коэффициенты интенсивности перехода цинка из стебля в листья практически для всех видов были больше 1 не зависимо от уровня этого элемента в почве. Исключение составили растения крапивы, произрастающие на пробной площадке возле ТЭЦ-2. Для этих растений интенсивность перехода цинка из корня в стебель и из стебля в листья была примерно одинаковой, что может свидетельствовать о загрязнении цинком растений крапивы на участке ТЭЦ-2.

Если рассматривать интенсивности перехода никеля по органам, можно отметить, что для растений крапивы и чертополоха, произрастающих на участке с низким содержанием никеля в почве, коэффициенты были наиболее высокими (3,14 и 4,00 соответственно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что почва, собранная на лесной опушке (территория с минимальной техногенной нагрузкой), отличалась более низким содержанием практически всех исследованных элементов (в 1,2–7,0 раз) по сравнению с образцами почв, собранных вблизи Калининградской ТЭЦ-2 и в парке М. Ашманна, для которых, кроме того, обнаружено превышение санитарных показателей для мышьяка, цинка и никеля (площадка около ТЭЦ-2).

2. В результате проведенного исследования выявлено, что золотарник канадский и чертополох колючий активно аккумулировали в листьях цинк: содержание цинка в корнях данных растений было 1,2–2,6 и 1,2–2,0 раз выше по сравнению с его содержанием в стебле и корнях соответственно.

3. В условиях повышенной техногенной нагрузки (территория вблизи ТЭЦ-2) исследуемые растения накапливали в корнях никель. Так, коэффициент задержки никеля для золотарника канадского составил 4,50, крапивы двудомной – 5,00, чертополоха колючего – 0,78.

4. В условиях минимального техногенного воздействия крапива двудомная проявляла выраженную аккумуляционную способность по отношению к никелю, накопление которого происходило в основном в листьях: интенсивность перехода никеля из стебля в листья для растений крапивы двудомной составила 1,00 (ТЭЦ-2), 2,00 (парк Макса Ашманна), 3,14 (поселок Дубровка).

5. Следует также отметить, что отсутствие в Фармакопеи РФ (XIV издание) нормирования содержания цинка и никеля в лекарственных растениях накладывает определенные трудности в стандартизации сырья и может привести к производству и использованию фитопрепаратов, загрязненных данными тяжелыми металлами. В связи с токсичным действием высоких концентраций цинка и никеля на организм человека представляется необходимым включение в Фармакопею нормативных показателей по их содержанию в лекарственном растительном сырье.

Список литературы

Гладков Е. А., Гладкова О. В. Экобиоготехнологические подходы для повышения коэффициента биологического поглощения растений в фиторемедиации // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2019. – № 4. – С. 32–40.

Глазовский Н. Ф. Биогеохимический круговорот химических элементов и подходы к его изучению // Биогеохимический круговорот веществ в биосфере. М.: Наука. – 1987. – С. 56–64.

ГН 2.1.7.2041-06 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве.

ГН 2.1.7.2511-09 Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве.

ГОСТ Р 58588-2019 Отбор и подготовка растительных проб для изотопного анализа.

Григорьев А. В. Рентгенофлуоресцентный анализ растительных материалов, способы добавок и внешнего стандарта // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. – 2012. – №. 144. – С. 82–91.

Данилкина Н. В., Дедков В. П. Распространение золотарника канадского (*Solidago canadensis* L.) в восточной части региона Балтийского моря // Информационные технологии в исследовании биоразнообразия – 2020: Матер. III Нац. науч. конф. с международным участием, посвященная 100-летию со дня рождения академика РАН ПЛ Горчаковского (Екатеринбург, 5–10 октября 2020 г.) – Екатеринбург, 2020. – С. 167.

Джувеликян Х. А., Щеглов Д. И., Горбунова Н. С. Загрязнение почв тяжелыми металлами. Способы контроля и нормирования загрязненных почв. – Воронеж: издательство ВГУ, 2009. – 22 с.

Ефремов И. В., Горшенина Е. Л., Солопова В. А., Рахимова Н. Н., Рябых Е. И., Чернова О. Н. Комплексная оценка миграционной способности и риска загрязнения тяжелыми металлами компонентов почвенно-растительных систем // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – №. 13(188) – С. 133–137.

Захаров В. Л., Кудашкина Т. А., Жихорева В. И. Содержание биологически активных веществ в корнях лекарственных травянистых растений // Агропромышленные технологии Центральной России. – 2018. – № 3. – С. 8–15.

Ильин Б. Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1991. – 151 с.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

Конспект сосудистых растений Калининградской области: справочное пособие / [Ред. В. П. Дедков]. – Калининград: Калининградский ун-т, 1999. – 107 с.

- Копытько Я. Ф., Лапинская Е. С., Сокольская Т. А. Применение, химический состав и стандартизация сырья и препаратов *Urtica* (обзор) // Химико-фармацевтический журнал. – 2011. – № 10. – С. 32–41.
- Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошкообразных пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа. М 049-П/04. СПб.: ООО НПО «Спектрон», 2004. – 20 с.
- ОФС.1.5.3.0009.15 Определение содержания тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах.
- Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. – М.: Астрель-2000, 1999. – 404 с.
- Пестова О. А. Биоиндикационный метод определения загрязнителя в окружающей среде // Экологические проблемы региона и пути их разрешения. – 2020. – С. 22–28.
- Семенова В.В. Аккумуляция тяжелых металлов представителями рода тысячелистник (*Achillea* L.) в условиях высотной зональности Северо-восточного Кавказа: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08: спец. Экология (биологические науки). – Нижний Новгород: ПИБР обособленное подразделение ФГБУН Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, 2020. – 141 с.
- Сибгатуллина М. Ш., Александрова А. Б., Иванов Д. В., Валиев В. С. Оценка биогеохимического состояния травянистых растений и почв Волжско-Камского заповедника // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2014. – Т. 156. – № 2. – С. 87–102.
- Снежко С. И., Шевченко О. Г. Источники поступления тяжелых металлов в атмосферу // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – № 18. – С. 35–37.
- Сошникова О.В. Изучение химического состава и биологической активности растений рода крапива: автореф. дис. ... канд. фарм. наук. – Курск: ГОУ ВПО «Курский государственный медицинский университет Федерального агентства по здравоохранению и социальному развитию», 2006 – 24 с.
- Сулейманова Ф. Ш., Нестерова О. В., Матюшин А. А. Исторический опыт и перспективы использования травы золотарника канадского (*Solidago canadensis* L.) в медицине // Здоровье и образование в XXI веке. – 2017. – № 4. – С. 142–149.
- Сулоев И. С., Дудецкая Н.А., Теслов Л.С., Лужанин В.Г., Яковлев Г.П. О некоторых видах рода Золотарник (обзор) // Медико-фармацевтический журнал «Пульс». – 2019. – № 6. – С. 68–76.
- Теплая Г. Н. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // Астраханский вестник экологического образования. – 2013. - № 1(23) – С. 182–192.
- Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланина В. В. Тяжелые металлы и растения: моногр. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. – 194 с.
- Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М. Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам: учебное пособие – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. – 77 с.
- Чернявских В.И. Биологические ресурсы *Urtica dioica* L.: направления исследований и перспективы использования // Полевой журнал биолога. – 2019. – Т. 1, № 3. – С. 131–149.
- Ahmad M. S. A., Ashraf M. Essential roles and hazardous effects of nickel in plants // Reviews of environmental contamination and toxicology [Ed. D. M. Whitacre]. – New York: Springer, 2012. – P. 125–167.
- Awa S. H., Hadibarata T. Removal of heavy metals in contaminated soil by phytoremediation mechanism: a review // Water, Air and Soil Pollution. – 2020. – Vol. 231, N 2. – P. 47.
- Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation — A review // Environmental pollution. – 2019. – Vol. 249. – P. 200–207.
- Bielecka A., Królak E. *Solidago canadensis* as a bioaccumulator and phytoremediator of Pb and Zn // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – Vol. 26, N 36. – P. 36942–36951.
- Kozyra M., Komsta L., Wojtanowski K. Analysis of phenolic compounds and antioxidant activity of methanolic extracts from inflorescences of *Carduus* sp. // Phytochemistry letters. – 2019. – N 31. – P. 256–262.
- Peng J. S., Guan Y. H., Lin X. J., Xu X. J., Xiao L., Wang H. H., Meng S. Comparative understanding of metal hyperaccumulation in plants: a mini-review // Environmental Geochemistry and Health. – 2020. – P. 1–9.
- Seregin I. V., Kozhevnikova A. D. Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants // Russian Journal of Plant Physiology. – 2006. – Vol. 53, N 2. – P. 257–277.
- Shahzad B., Tanveer M., Rehman A., Cheema S. A., Fahad S., Rehman S., Sharma A. Nickel; whether toxic or essential for plants and environment – A review // Plant Physiology and Biochemistry. – 2018. – Vol. 132. – P. 641–651.
- Varut R. M., Gird C. E., Rotaru L. T., Varut M. C., Pisoschi C. G. Evaluation of polyphenol and flavonoid profiles and the antioxidant effect of *Carduus acanthoides* hydroalcoholic extract compared with *vaccinium myrtillus* in an animal model of diabetes mellitus // Pharmaceutical Chemistry Journal. – 2018. – Vol. 51, N 12. – P. 1088–1095.

Golovin A. V., Skrypnik L. N., Masyutin Ya. A. Particularities of zinc and nickel accumulation by certain medicinal plants in territories with varying degrees of technological load // *Ekosistemy*. 2021. Iss. 26. P. 67–77.

The article focuses on the study of zinc and nickel accumulation patterns of certain medicinal plants. The subjects of the study are the species that are characterized by a rich complex of phytochemical components and have various biological activities: nettle (*Urtica dioica* L.), Canadian goldenrod (*Solidago canadensis* L.), and thistle (*Carduus acanthoides* L.). X-ray fluorescence spectrometry was used to analyze the content of heavy metals (Pb, Zn, Cu, Ni, Mn, V) in the soils at test sites with different degrees of anthropogenic load: the forest edge of the village of Dubrovka, Bagrationovsky district, Kaliningrad region; the territory of the Max Aschmann Park in Kaliningrad; the area near the Kaliningrad Thermal Power Station-2 (TPS-2). It was revealed that the soil collected near the village of Dubrovka had a lower content of practically all the studied elements. In the soil near the Kaliningrad TPS-2 and in the territory of the M. Ashmann Park, the excess of the standard sanitary indicators of arsenic, zinc and nickel was detected. The content of zinc and nickel in various organs of the studied plant species (roots, stems, leaves) growing on the soils of the test sites was analyzed. To characterize the particularities of zinc and nickel accumulation by plants, the following factors were calculated: a delay factor, a concentration coefficient and a rate of element transition. The zinc content of plants was found to vary from 50 to 250 mg/kg, nickel from 10 to 65 mg/kg, depending on the plant species and site. Based on the analysis of the obtained data, it was revealed that the leaves of goldenrod and thistle accumulated zinc (zinc content in leaves was 1.2–2.6 times higher compared to stems and roots). The leaves of nettle accumulated nickel under minimal anthropogenic impact, (the nickel content in leaves was 2-3 times higher compared to stems and roots). It was highlighted that the root system of the plant species under study accumulates nickel under conditions of high technological load.

Key words: zink, nickel, nettle, goldenrod, thistle, accumulation.

Поступила в редакцию 18.02.21

Принята к печати 06.04.21