

С.С. Позняк

*Научно-исследовательский институт экологических проблем
Международного государственного экологического университета
им. А.Д. Сахарова (г. Минск, Беларусь)*

СОДЕРЖАНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПОЛЕВЫХ И ЛУГОВЫХ АГРОФИТОЦЕНОЗОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Проведенные исследования по изучению загрязненности растений, произрастающих в полевых и луговых агрофитоценозах в непосредственной близости от промышленных предприятий, позволили впервые выявить виды и семейства растений, накапливающие в повышенных количествах тяжелые металлы. Установлено, что дикорастущие сорные растения, сформировавшиеся в условиях техногенного воздействия крупного промышленного центра, обладают более высокими адаптационными способностями к приоритетным загрязнителям, по сравнению с культурными растениями.

Ключевые слова: *тяжелые металлы; агрофитоценозы; семейства растений; загрязненность; сорные растения; экологическая амплитуда произрастания.*

Введение

Уровень химического загрязнения почв характеризует степень неблагоприятного воздействия экзогенных химических веществ на здоровье населения. Показателями уровня загрязненности почв являются коэффициент концентрации химического вещества (Кс) и суммарный показатель загрязнения (Зс), который характеризует эффект воздействия ассоциации химических элементов при полиэлементном загрязнении. По суммарному коэффициенту загрязнения разработана оценочная шкала опасности загрязнения почв, в соответствии с которой загрязнение почв делится на четыре категории: допустимое – Зс менее 16, умеренно опасное – 16–32, опасное – 32–128, чрезвычайно опасное – более 128 [1, 2].

В Республике Беларусь эколого-геохимическое изучение городов, включающее исследование и оценку состояния растительности и почв, осуществляли различные научно-исследовательские учреждения: Институт геологических наук (ИГН НАН Беларуси), Институт природопользования НАН Беларуси, Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича (ИЭБ НАН Беларуси), Белорусский научно-исследовательский центр «Экология» (БелНИЦ «Экология»), Белорусский научно-исследовательский геологоразведочный институт (БелНИГРИ), Центральный ботанический сад НАН Беларуси,

Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь и ряд других. Биогеохимические исследования растительности в нашей стране были направлены преимущественно на выявление региональных особенностей накопления микроэлементов и оценку их фоновых концентраций.

Результаты исследований агроэкосистем в пригороде г. Минска, проведенных С.Е. Головатым, Н.Д. Волковой, С.В. Савченко, П.Ф. Жигаревым, свидетельствуют, что концентрации Cd, Pb, Zn, Cu и Ni в почвах, многолетних, однолетних и бобовых травостоях в основном выше средних фоновых значений и в отдельных случаях превышают максимально допустимые уровни [3]. В некоторых исследованиях проводилось также изучение закономерностей накопления тяжелых металлов (ТМ) в пойменном разнотравье пригорода Минска [4].

Работы многих исследователей показали, что между химическим составом растений и элементным составом среды существует определенная связь, но прямая зависимость содержания ТМ в растениях от содержания в почве часто нарушается из-за избирательной способности растений к накоплению элементов в необходимом количестве [5]. По-видимому, существует генетический и экологический факторы формирования элементного состава растений. Их приоритетность меняется в зависимости от условий окружающей среды, при техногенном загрязнении экологический фактор становится ведущим [6]. Результаты исследований также свидетельствуют о том, что одни виды растений способны накапливать высокие концентрации ТМ и проявлять устойчивость к ним, в то же время другие растения стремятся снизить поступление ТМ путем максимального использования своих барьерных функций.

Несмотря на различную способность растений к накоплению ТМ, биоаккумуляция известных элементов имеет определенную тенденцию, которая позволяет классифицировать ТМ на несколько групп: первая – элементы интенсивного поглощения (Cd, Cs, Rb); вторая – элементы средней степени поглощения (Zn, Mo, Cu, Pb, As, Co); третья – элементы слабого поглощения (Mn, Ni, Cr) и четвертая – элементы, труднодоступные растениям (Se, Fe, Ba, Te).

Химические элементы, поглощаемые растениями из почвы в разных количествах, играют существенную роль в регулировании биохимических и физиологических процессов в растительном организме. Значение тяжелых металлов для физиологии растений существенно различается. В исследованиях многочисленных авторов приводятся различные значения нормальных концентраций микроэлементов в растениях (табл. 1). Это связано с тем, что установить пределы токсичного содержания конкретного элемента очень трудно, поскольку уровень токсичности ТМ зависит от гранулометрического состава почвы, ее кислотности, влажности, содержания гумуса, соотношения в среде металлов и питательных элементов, вида растения и т.д. [7]. Поскольку токсичные уровни ТМ для разных видов растений существенно различаются, а в практике сельскохозяйственного производства все растения возделываются в севооборотах, то возникает необходимость определения токсичного уровня содержания ТМ в почве и растениях на конкретном поле с учетом наиболее чувствительной культуры.

Т а б л и ц а 1

Пределы колебаний нормальных концентраций элементов в растениях, мг/кг

ТМ	Минеев В.Г., 1990	Чертко Н.К., 2002, 2008	Ковальский В.В., 1974	Кабата- Пендиас А., Пендиас Х., 1989	Nieber et. al., 1978; Molski, Dmu- chowski, 1986
Кобальт	0,3–0,5	–	–	0,03–0,57	–
Хром	0,2–1,0	–	–	0,02–0,2	–
Медь	2–12	5–30	3–12	2–20	< 30
Никель	0,4–3,0	< 1,0	–	0,1–2,7	–
Свинец	0,1–5,0	1,5–14,0	–	0,05–3,0	< 30
Олово	0,8–6,0	–	–	–	–
Цинк	15–150	15–150	20–60	–	< 100
Марганец	–	20–300	20–60	17–334	–
Цирконий	–	–	–	0,005–2,6	–

Цель исследований заключалась в определении специфики техногенного загрязнения некоторыми тяжелыми металлами растительности полевых и луговых агрофитоценозов в условиях техногенного загрязнения почвенного покрова с учетом видового разнообразия растений.

Материалы и методики исследований

Исследования по определению специфики техногенного загрязнения некоторыми тяжелыми металлами растительности полевых и луговых агрофитоценозов проводились в ходе многолетних наблюдений за состоянием агрофитоценозов и характером происходящих в них изменений в техногенной среде по сравнению с условно чистой территорией.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- организация сети постоянных пробных площадок агрофитоценозов с учетом их расстояния и направления от промышленного центра, физико-географических и экологических характеристик, а также специфики антропогенного воздействия;
- определение видовых особенностей накопления некоторых тяжелых металлов в растениях полевых и луговых агрофитоценозов с учетом степени техногенной нагрузки;
- оценка степени экологической трансформации растительного покрова агрофитоценозов под воздействием антропогенных нагрузок.

Исходя из поставленных задач, объекты исследований должны иметь ряд критериев, по которым их можно объединить в группы аналогов с целью проведения сравнительного анализа особенностей функционирования в условиях естественной и урбанизированной среды. Сравниваемые агрофитоценозы представлены посевами культурных растений, которые формируются человеком и выращиваются по рекомендуемым интенсивным технологиям в равноценных почвенно-климатических условиях, отличаясь лишь степенью влияния антропогенных факторов.

Для проведения экспериментов по изучению воздействия выбросов поллютантов промышленными предприятиями на растительность полевых и луговых агрофитоценозов был выбран Смолевичский район Минской области, отличающийся высокой степенью техногенной нагрузки. Территория Смолевичского района, примыкающая к наиболее типичному для Республики Беларусь крупному промышленному центру – г. Жодино, является идеальным местом для проведения исследований с целью выявления закономерностей формирования экологической ситуации, которая складывается на сельскохозяйственных угодьях в результате атмосферного выпадения загрязнителей и интенсивной сельскохозяйственной деятельности. Жодино является населенным пунктом областного подчинения, расположен в 50 км от Минска. На 1.01.2005 г. в г. Жодино проживало 60 800 человек. На территории города зарегистрированы и осуществляют производственно-хозяйственную деятельность более 230 субъектов хозяйствования. Наиболее крупные из них: РУПП «Белорусский автомобильный завод» – крупнейшее специализированное предприятие машиностроительной промышленности по выпуску большегрузных автосамосвалов, предназначенных для работы в карьерах открытой добычи полезных ископаемых, а также для работы на строительстве крупных гидротехнических и промышленных сооружений; РУП «Кузнечный завод тяжелых штамповок» – специализированное предприятие по обеспечению заготовками, узлами и деталями предприятий машиностроительного комплекса; ОАО «Світанак», УП завод «Энергоконструкция», Жодинская ТЭЦ, Жодинский хлебозавод, ОАО «Ремиз» и др.

В имеющейся в настоящее время отечественной и зарубежной литературе отсутствуют какие-либо сведения об особенностях и использовании единых методических подходов для оценки химического загрязнения растительности агрофитоценозов на сельскохозяйственных угодьях в зонах воздействия крупных промышленных центров. С целью установления причинно-следственных связей техногенного загрязнения растительности и установления закономерностей формирования существующей экологической ситуации автором организована сеть постоянных пробных площадок с учетом различных условий перераспределения систем с оттоком и аккумулярованием загрязнителей в почвах.

Для обоснования сети постоянных пробных площадок и последующего ведения локального мониторинга земель проведена предварительная работа:

- анализ и обобщение имеющихся материалов о природных условиях исследуемой территории;
- сбор информации и анализ данных о промышленных предприятиях г. Жодино как источнике вредного воздействия на прилегающие земли;
- анализ фондовых и литературных данных о характере и составе загрязнителей прилегающих территорий, в том числе санитарно-защитных зон;
- подготовка картографической основы для проведения полевых исследований (на бумажном и электронном носителях).

Сложность указанного этапа заключалась в правильном выборе сети постоянных пробных площадок, местоположение и количество которых позволяло бы дать объективную оценку химического загрязнения агрофитоценозов на

прилегающих к промышленному центру сельскохозяйственных угодьях, поскольку пробные площадки должны были отвечать следующим требованиям:

- быть рассредоточенными по всей исследуемой территории;
- находиться в зоне воздействия источников загрязнения;
- являться репрезентативными для данной территории;
- иметь площадь не менее 20 м²;
- быть легко определяемыми на местности и сохраняться неизменными на протяжении всего периода наблюдений.

На выбранных 22 пробных площадках в зоне промышленного загрязнения территории проводились наблюдения за геоботанической структурой фитоценозов, характером и спецификой аккумуляции тяжелых металлов в растительности. Геоботанические исследования растительности агрофитоценозов проводились маршрутно-рекогносцировочным методом. В пределах каждого агрофитоценоза закладывалась пробная площадка площадью 100 м². На каждой площадке проводился комплекс фитоценологических и эколого-геохимических исследований (отбор растительных и почвенных образцов для лабораторных агрохимических, гранулометрических и эколого-геохимических анализов). Отбор проб растений проводили в сухую погоду с 8 до 10 часов утра. Отобранные пробы растений очищали от механических загрязнителей и примесей, промывали водой и высушивали до воздушно-сухого состояния. Воздушно-сухие образцы растительности измельчались в лабораторной мельнице, прессовались в таблетки, которые помещались в пакеты из кальки, маркировались и в дальнейшем анализировались на содержание микроэлементов методом рентгено-флуоресцентного анализа на приборе марки РФА-СЕР-01 производства фирмы ElvaX (Украина) с использованием методики выполнения измерений МВИ. МН 3272-2009, утвержденной Белорусским государственным институтом метрологии [8].

Растительность агрофитоценозов представлена большим видовым разнообразием (табл. 2).

Таблица 2

Видовой состав растительности агрофитоценозов

Семейство	Вид растений
1	2
Гречишные – <i>Polygonaceae</i>	Щавель конский – <i>Rumex confertus</i> Willd., горец вьюнковый – <i>Polygonum convolvulus</i> L.
Мареновые – <i>Rubiaceae</i>	Подмаренник цепкий – <i>Galium aparine</i> L.
Пасленовые – <i>Solanaceae</i>	Картофель – <i>Solanum tuberosum</i> L.
Фиалковые – <i>Violaceae</i>	Фиалка полевая – <i>Viola arvensis</i> Murr.
Яснотковые – <i>Lamiaceae</i>	Пикульник обыкновенный – <i>Galeopsis tetrahit</i> L., мята полевая – <i>Mentha arvensis</i> L.
Крестоцветные – <i>Brassicaceae</i>	Рапс посевной – <i>Brassica napus</i> L., пастушья сумка – <i>Capsella bursa</i> <i>pastiris</i> L., ярутка полевая – <i>Thlaspi arvense</i> L.

1	2
Астровые – <i>Asteraceae</i>	Полынь обыкновенная – <i>Artemisia vulgaris</i> L., полынь горькая – <i>Artemisia absinthium</i> L., ромашка непахучая – <i>Matricaria inodora</i> L., одуванчик лекарственный – <i>Taraxacum officinale</i> Wigg., бодяк полевой – <i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop, василек синий – <i>Centaurea cyanus</i> L., тысячелистник обыкновенный – <i>Achillea millefolium</i> L., осот полевой – <i>Sonchus arvensis</i> L., лопух большой – <i>Arctium lappa</i> L.
Бобовые – <i>Fabaceae</i>	Клевер луговой – <i>Trifolium pratense</i> L., клевер гибридный – <i>Trifolium hybridum</i> L., лядвенец рогатый – <i>Lotus corniculatus</i> L., сараделла – <i>Septimontium pratense</i> L., люцерна посевная – <i>Medicago arvensis</i> L., вика посевная – <i>Vicia pratense</i> L.
Злаки – <i>Gramineae</i>	Полевица гигантская – <i>Agrostis gigantea</i> Roth., кукуруза – <i>Zea mays</i> L., пшеница – <i>Triticum aestivum</i> L., рожь озимая – <i>Secale cereale</i> L., костер безостый – <i>Bromus inermis</i> (Leys). Holub., тимopheевка луговая – <i>Phleum pratense</i> L., ячмень – <i>Hordeum vulgare</i> L., ежа сборная – <i>Dactylis glomerata</i> L., пырей ползучий – <i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski, мятлик луговой – <i>Poa pratensis</i> L., райграс однолетний – <i>Lolium westerwoldicum</i> L.
Крапивные – <i>Urticeae</i>	Крапива двудомная – <i>Urtica dioica</i> L.
Вьюнковые – <i>Convolvulaceae</i>	Вьюнок полевой – <i>Convolvulus arvensis</i> L.
Гвоздичные – <i>Caryophyllaceae</i>	Дрема белая <i>Melandrium album</i> (Mill.) Garcke (<i>Silene alba</i> Krause.), дрема ночная – <i>Melandrium nictiflorum</i> (L.) Fries., звездчатка средняя – <i>Stellaria media</i> (L.) Vill.
Подорожниковые – <i>Plantaginaceae</i>	Подорожник большой – <i>Plantago major</i> L., вероника полевая – <i>Veronica arvensis</i> L.
Бурачниковые – <i>Boragiaceae</i>	Синяк обыкновенный – <i>Echium vulgare</i> L.
Колокольчиковые – <i>Campanulaceae</i>	Колокольчик раскидистый – <i>Campanula patula</i> L.
Маревые – <i>Cheopodiaceae</i>	Марь белая – <i>Chenopodium album</i> L.
Розоцветные – <i>Rosaceae</i>	Лапчатка гусиная – <i>Potentilla anserina</i> L.

Статистическая обработка полученных результатов исследований проводилась с использованием прикладных программных пакетов «MatLab R2007b», «Statistica for Windows», версия 6.0, и программного продукта «Microsoft Excel 2003». Поскольку в ряде случаев предположение о нормальности закона действия распределения остаточных случайных величин в моделях, описанных в дисперсионном анализе, не выполнялось, при статистической обработке автором дополнительно были применены различные непараметрические методы проверки однородности выборок для оценки влияния различных факторов на исследуемый признак с использованием непараметрического критерия Фридмана.

Результаты исследования и обсуждение

В результате ранее проведенных исследований по определению суммарного уровня загрязнения почвенного покрова сельскохозяйственных угодий, находящихся в зоне воздействия РУП «Белорусский автомобильный завод» и РУП «Кузнецкий завод тяжелых штамповок» (КЗТШ), по девяти основным элементам – загрязнителям (марганец, медь, цинк, цирконий, хром, кобальт, олово, свинец и никель) установлен показатель Кс, который рассчитывался по отношению к региональному кларку по формуле [9]:

$$Z_c = (KcMn + KcCu + KcZn + KcZr + KcCr + KcCo + KcSn + KcPb + KcNi) - 8.$$

По результатам поэлементного обследования элементарных участков, на которых размещались полевые и луговые агрофитоценозы, рассчитаны значения Z_c , а опасность загрязнения почв определена по оценочной шкале (табл. 3). К аномальным были отнесены концентрации, которые в 1,5 раза и более превышают кларки [10]. Установлено, что территория пробных площадок № 9 и 12, расположенных в непосредственной близости от КЗТШ, относится по опасности загрязнения почв к умеренной категории с наличием контрастной педогеохимической аномалии по кобальту.

Т а б л и ц а 3

Суммарное загрязнение почв сельскохозяйственных угодий, мг/кг

Пробные площадки	Коэффициент концентрации химического элемента									Z_c
	Mn	Cu	Zn	Zr	Cr	Co	Sn	Pb	Ni	
Региональный кларк	247	13	35	336	36	6	1	12	20	
6	1,34	0,66	0,39	0,50	0,79	10,7	1,56	1,28	0,28	9
7	1,16	0,71	0,35	0,30	0,72	8,78	3,33	0,84	0,16	8
8	1,25	0,94	0,42	0,27	1,10	8,03	1,49	1,05	0,25	6
9	1,52	2,25	0,87	0,61	0,86	14,4	3,38	1,36	0,24	17
12	2,63	0,69	0,81	0,44	0,94	15,8	3,56	1,88	0,37	19
17	0,96	4,48	0,48	0,47	0,71	8,90	4,36	1,04	0,35	13

В исследованиях было также выявлено наличие точечной геохимической аномалии по меди в районе пробной площадки № 17, хотя опасность загрязнения почвы в данном месте классифицировалась как допустимая. Проведенные исследования показали, что по степени загрязнения почв элементами – загрязнителями, наиболее неблагоприятными в санитарно-гигиеническом отношении, являются центр города, а также западное направление, где в результате атмосферных выпадений поллютантов и интенсивной сельскохозяйственной деятельности сформировалась низкоконтрастная педогеохимическая аномалия, включающая свинец, медь, хром, кобальт и имеющая радиус около 10 км.

Обращает на себя особое внимание тот факт, что, несмотря на господство западных ветров, наибольшее количество поллютантов в почве накопилось именно на западе от городской черты, хотя теоретически аномальные зоны должны были находиться на востоке. Это свидетельствует о том, что отрас-

левая специфика промышленного производства, обуславливающая количество и состав поллютантов, генетический тип и водный режим почв, а также уровень интенсификации сельскохозяйственного производства, определяют состояние экологической ситуации в зонах воздействия крупных промышленных центров Республики Беларусь, которое характеризуется в целом как неудовлетворительное.

В результате проведенных автором биогеохимических исследований было определено содержание Ni, Pb, Sn, Co, Cr, Zr, Zn, Cu и Mn в растениях, произрастающих в полевых и луговых агрофитоценозах в зоне воздействия крупного промышленного центра. Полевые агрофитоценозы были представлены посадками картофеля и посевами зерновых (озимая рожь, озимая и яровая пшеница, ячмень), зернобобовых (вика, сераделла), крестоцветных (озимый рапс) и технических (кукуруза) культур на автоморфной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве и посевом озимой ржи на гидроморфной торфяной почве низинного типа. Луговые агрофитоценозы были представлены преимущественно посевами многолетних злаковых и бобово-злаковых трав на гидроморфной торфяной почве низинного типа и автоморфной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. На основании анализа полученных результатов установлено, что различные виды растений обладают селективной способностью к накоплению химических элементов.

Содержание *меди* в растениях полевых агрофитоценозов колебалось от 1,45 до 14,8 мг/кг, максимальные различия фиксировались в наиболее контрастных видах растений – различия в 10,2 раза установлены для ячменя ярового и крапивы двудомной. Количество меди в растениях луговых агрофитоценозов составляло от 2,54 мг/кг у лядвенца рогатого до 35,3 мг/кг у злаковых трав, максимальное различие – в 13,9 раза. Из всех видов растений только злаковые травы накапливали медь в токсичных для растений концентрациях (более 20 мг/кг). В целом более высокое содержание меди в растениях отмечалось на торфяной почве низинного типа, классифицируемой по степени загрязнения как сильная и чрезвычайная. Это может быть связано с повышенным содержанием органического вещества в торфе, а также с интенсивной сельскохозяйственной деятельностью на землях, расположенных вблизи птицефабрики «Октябрьская», внесением медьсодержащих удобрений и куриного помета.

Количество *марганца* в растениях полевых фитоценозов не зависело от типа почв и колебалось от 2,77 до 47,3 мг/кг. Самыми чувствительными к воздействию марганца оказались бобовые растения и злаки. Содержание марганца в растениях луговых фитоценозов не превышало допустимых концентраций и составляло от 6,53 мг/кг у вьюнка полевого до 52,7 мг/кг у ромашки непахучей, максимальное различие – в 8,6 раза.

Количество *олова* в растениях полевых фитоценозов не зависело от типа почвы и колебалось от 0,11 мг/кг у клевера лугового до 2,72 мг/кг у одуванчика лекарственного, максимальное различие – в 24,7 раза. Содержание олова в растениях луговых фитоценозов находилось в пределах 0,08–0,79 мг/кг, в то же время в люцерне посевной на торфяной почве отмечалось повышенное содержание олова – 7,96 мг/кг, что может быть связано с близостью автомагистрали.

Содержание *цинка* в растениях полевых фитоценозов не зависело от типа почвы, было значительно ниже средних фоновых значений и колебалось от 3,47 мг/кг у ячменя ярового до 54,1 мг/кг у крапивы двудомной, максимальное различие – в 15,6 раза. В растениях луговых фитоценозов содержание цинка также было невысоким – от 11,7 мг/кг у бодяка полевого до 46,3 мг/кг у осота полевого, максимальное различие – в 3,9 раза. Это объясняется тем, что сельскохозяйственные угодья в целом имеют кислотность pH более 6 и в присутствии фосфатов, которые поступают в почву с фосфорными удобрениями, усвояемость цинка растениями значительно понижается.

Среднее содержание *свинца* в растениях полевых агрофитоценозов не зависело от типа почвы и колебалось от 0,19 мг/кг у сераделлы до 6,76 мг/кг у василька синего, максимальное различие – в 35,5 раза. В растениях луговых фитоценозов количество свинца изменялось от 0,17 мг/кг у клевера лугового до 3,49 мг/кг у дремы белой, максимальное различие составляло 20,5 раза.

Количество *никеля* в растениях полевых фитоценозов колебалась от 0,12 до 7,46 мг/кг, максимальные различия (62,1 раза) установлены для дремы белой и озимой ржи. При этом следует отметить, что синяк обыкновенный, пикульник обыкновенный, вьюнок полевой, озимая рожь, полевика гигантская и мята полевая накапливали никель в концентрациях выше их нормального содержания в растениях (0,5–5,0 мг/кг). В растениях луговых фитоценозов количество никеля изменялось от 0,14 мг/кг у пастушьей сумки до 5,17 мг/кг у полевницы гигантской, максимальное различие – в 36,9 раза. Содержание никеля зависело от типа почвы и ее окультуренности. Несмотря на то что значительная часть элемента концентрируется в илистых, богатых гумусом фракциях почвы, отрицательное действие никеля было сильнее выражено на неокультуренных дерново-подзолистых почвах, поскольку элемент на таких почвах не стимулирует синтез металлсвязывающего белка [11].

В опытах показано, что предельная величина максимального содержания элементов в растениях существенно различается и зависит, прежде всего, от гранулометрического состава, кислотности и влажности почвы, содержания гумуса, соотношения тяжелых металлов и питательных элементов, вида растений и т.д. Проведенными исследованиями установлено, что большинство растений полевых и луговых фитоценозов накапливало тяжелые металлы – хром и кобальт – в токсичных концентрациях.

Содержание *хрома* в растениях полевых фитоценозов колебалось от 0,57 мг/кг у дремы белой до 25,7 мг/кг у синяка обыкновенного, максимальное различие составляло 45,0 раза. Большинство растений полевых фитоценозов – картофель, озимый рапс, полынь обыкновенная, бодяк полевой, полынь горькая, озимая пшеница, ромашка непахучая, подмаренник цепкий, синяк обыкновенный, пикульник обыкновенный, сераделла, вьюнок полевой, озимая рожь, василек синий, марь белая, вика посевная, клевер луговой, мята полевая на дерново-подзолистой почве и озимая рожь, крапива двудомная, лопух большой, щавель конский на торфяной почве – накапливали хром в токсичных для растений концентрациях (более 10 мг/кг). Количество хрома в растениях луговых фитоценозов колебалось от 0,60 мг/кг у клевера лугового до 9,06 мг/кг у вероники полевой, максимальное различие составляло 15,1 раза.

Марь белая, дрема белая, одуванчик лекарственный, полевица гигантская, ромашка непахучая, полынь обыкновенная, люцерна посевная, пастушья сумка, лопух большой, вероника полевая, пикульник обыкновенный на дерново-подзолистой почве, а бодяк полевой, тимopheевка луговая, костер безостый, лапчатка прямостоячая, осот полевой на торфяной почве также накапливали хром в концентрациях выше их нормального содержания в растениях (2–5 мг/кг).

Количество *кобальта* в растениях полевых фитоценозов в значительной степени определяется почвенными условиями и изменялось от 0,11 мг/кг у озимого рапса до 4,73 мг/кг у озимой ржи, максимальное различие составляло 43,0 раза. Большая часть растений полевых фитоценозов – картофель, бодяк полевой, полынь горькая, озимая пшеница, ромашка непахучая, подмаренник цепкий, пикульник обыкновенный, сераделла, озимая рожь, василек синий, фиалка полевая, горец вьюнковый, овес, клевер луговой на дерново-подзолистой почве – накапливала кобальт в токсичных для растений концентрациях. Содержание кобальта в растениях луговых фитоценозов колебалось от 0,01 мг/кг у одуванчика лекарственного до 4,24 мг/кг у вероники полевой, максимальное различие составило 424,0 раза. Одуванчик лекарственный, злаковые травы, полынь обыкновенная, полынь горькая, лопух большой, вероника полевая, дрема ночная, пикульник обыкновенный, вьюнок полевой и райграс однолетний на дерново-подзолистой почве также накапливали кобальт в токсичных концентрациях. Несмотря на то что содержание кобальта в почве связано с наличием органического вещества и глинистых частиц, его усвояемость растениями была более высокой на дерново-подзолистой почве. Подобные результаты были получены и в работах других авторов [12].

Содержание *циркония* в растениях полевых фитоценозов не зависело от типа почвы и колебалось от 0,11 мг/кг у озимой пшеницы до 32,0 мг/кг у полыни горькой – максимальное различие составляло 290 раз. В концентрациях, превышающих нормальные для растений, накапливали цирконий одуванчик лекарственный, подмаренник цепкий, пикульник обыкновенный, сераделла, вьюнок полевой, озимая рожь, марь белая, горец вьюнковый, полевица гигантская, мята полевая и полынь горькая. Содержание циркония в растениях луговых фитоценозов колебалось от 0,27 мг/кг у фиалки полевой до 18,0 мг/кг у бодяка полевого, максимальное различие составляло 66,6 раза. Накапливали цирконий в концентрациях, превышающих нормальные, следующие виды растений: марь белая, дрема белая, одуванчик лекарственный, полынь обыкновенная, клевер луговой, бодяк полевой, люцерна посевная, лопух большой, щавель конский, пикульник обыкновенный, вьюнок полевой и одуванчик лекарственный.

Результаты исследований свидетельствуют, что в условиях техногенного загрязнения тяжелыми металлами экологический фактор формирования элементного состава растений становится ведущим, поскольку в условиях выявленных геохимических аномалий по кобальту и хрому подвижность последних в системе «почва – растение» значительно увеличивается, что приводит к избыточному накоплению этих элементов в растениях. Причем поллютанты активно участвуют в перераспределении элементов по почвенному профилю и в условиях оттока веществ в гидроморфных торфяных почвах, содержащих

большее количество органического вещества, происходит избыточное накопление загрязнителей, по сравнению с автоморфными почвами. Следует иметь в виду, что поглощение химических элементов почвой, как справедливо отмечает А.Н. Гундарева [13], не всегда и не обязательно сопровождается их накоплением в растении, поскольку это зависит от биологических особенностей растений и геохимических особенностей среды их обитания.

В исследованиях автора для многих видов растений полевых и луговых агрофитоценозов, которые относятся к наиболее распространенным в Центральной зоне Республики Беларусь видам (полынь обыкновенная, полынь горькая, одуванчик лекарственный, ромашка непахучая, василек синий, бодяк полевой), отмечалась большая разница между минимальным и максимальным значениями содержания химических элементов, что является наилучшим подтверждением предположения о том, что чем больше микроэлементов с широким интервалом концентраций сочетается в одном растении, тем больше экологическая амплитуда произрастания данного растения и, как следствие, выше его адаптационные способности в условиях техногенного загрязнения.

Полученные результаты исследований позволили выявить закономерности распределения кобальта, олова, свинца, никеля, марганца, меди, цинка, циркония и хрома в растениях агрофитоценозов и провести группировку растений по их устойчивости к накоплению тяжелых металлов в зависимости от принадлежности к различным семействам (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

**Содержание тяжелых металлов в растениях агрофитоценозов,
относящихся к различным семействам, мг/кг**

ТМ	Высокое содержание		Низкое содержание	От высокого до низкого содержания
1	2		3	4
Кобальт	более 1,5		до 1,0	
	Гречишные Мареновые Пасленовые	Фиалковые Яснотковые	Крестоцветные	Астровые Бобовые Злаки
Олово	более 8,0		до 6,0	
	Астровые Гречишные	Крапивные Яснотковые	Вьюнковые Злаки Крестоцветные	Бобовые
Свинец	более 20,0		до 10,0	
	Астровые Гвоздичные Яснотковые		Злаки	Бобовые Мареновые Подорожниковые
Никель	более 5,0		до 3,0	
	Бурачниковые Вьюнковые	Злаки Яснотковые	Астровые Бобовые Гвоздичные Гречишные Крестоцветные	

Окончание табл. 4

1	2	3	4
Марганец	более 130,0	до 50,0	
	Гречишные Крапивные	Фиалковые Яснотковые	Бурачниковые Вьюнковые
Медь	более 10,0	до 8,0	
	Крапивные	Бурачниковые Злаки	Астровые Бобовые
Цинк	более 50,0	до 40,0	
	Колокольчиковые Крапивные	Бурачниковые Мареновые Яснотковые	Астровые Бобовые Злаки
Цирконий	более 20,0	до 10,0	
	Астровые Вьюнковые Гвоздичные Крестоцветные	Маревые Мареновые Яснотковые	Пасленовые Фиалковые
Хром	более 5,0	до 4,0	
	Астровые Бобовые Бурачниковые Крапивные	Крестоцветные Маревые Пасленовые Яснотковые	Гвоздичные Гречишные Злаки

В исследованиях впервые выявлены виды и семейства травянистых растений, накапливающие в повышенных и минимальных количествах тяжелые металлы, а также обладающие контрастной избирательной способностью к накоплению отдельных элементов и характеризующиеся широкой экологической амплитудой произрастания на территории Центральной зоны Республики Беларусь:

Растения, способные к повышенному накоплению ТМ:

- семейство Астровые (*Asteraceae*) – полынь обыкновенная, ромашка непахучая, одуванчик лекарственный;
- семейство Крапивные (*Urticaceae*) – крапива двудомная;
- семейство Злаки (*Graminea*) – полевица гигантская, кукуруза, пшеница, рожь озимая;

- семейство Бобовые (*Fabaceae*) – клевер луговой, клевер гибридный.

Растения, накапливающие минимальные концентрации ТМ:

- семейство Мареновые (*Rubiaceae*) – подмаренник цепкий;
- семейство Бобовые (*Fabaceae*) – лядвенец рогатый;
- семейство Крестоцветные (*Brassicaceae*) – рапс, пастушья сумка;
- семейство Злаки (*Graminea*) – костер безостый.

Растения, характеризующиеся широкой амплитудой произрастания:

- семейство Бурачниковые (*Boraginaceae*) – синяк обыкновенный;
- семейство Бобовые (*Fabaceae*) – сераделла;
- семейство Вьюнковые (*Convolvulaceae*) – вьюнок полевой;
- семейство Астровые (*Asteraceae*) – бодяк полевой, василек синий;
- семейство Гречишные (*Polygonaceae*) – щавель конский;
- семейство Гвоздичные (*Caryophyllaceae*) – дрема белая, дрема ночная.

Установленные в результате исследований закономерности и выявленная селективная способность растений к накоплению тяжелых металлов в растительности агрофитоценозов имеет практическую значимость, поскольку они позволяют спланировать оптимальное размещение сельскохозяйственных культур в севооборотах в зоне воздействия крупных промышленных центров, что позволит, с одной стороны, получить нормативно-чистую продукцию растениеводства и, с другой стороны, провести реабилитацию загрязненных тяжелыми металлами земель посредством выращивания растений – накопителей элементов с последующим отчуждением полученной биомассы. Для санации почв в зонах с наиболее сильным загрязнением предлагается использование следующих видов дикорастущих травянистых растений: полынь обыкновенная, полынь горькая, ромашка непахучая, одуванчик лекарственный, крапива двудомная, полевица гигантская, которые, наряду со значительным накоплением металлов, формируют большую фитомассу.

Выводы

1. Более высокое содержание тяжелых металлов в растениях агрофитоценозов отмечалось на гидроморфной торфяной почве низинного типа, что может быть связано с повышенным содержанием органического вещества в торфе по сравнению с дерново-подзолистой легкосуглинистой почвой, а также интенсивной сельскохозяйственной деятельностью на землях, расположенных вблизи птицефабрики «Октябрьская».

2. В условиях техногенного загрязнения тяжелыми металлами экологический фактор формирования элементного состава растений становится ведущим. В зонах выявленных геохимических аномалий подвижность ТМ в системе «почва – растение» значительно увеличивается, что приводит к их избыточному накоплению в растениях.

3. Выявлены закономерности распределения кобальта, олова, свинца, никеля, марганца, меди, цинка, циркония и хрома в растениях полевых и луговых агрофитоценозов и проведена группировка растений по их устойчивости к накоплению тяжелых металлов в зависимости от принадлежности к различным семействам.

4. Впервые выявлены виды и семейства травянистых растений, накапливающие в повышенных и минимальных количествах тяжелые металлы, а также обладающие контрастной избирательной способностью к накоплению отдельных элементов.

5. Экспериментально подтверждено предположение о том, что растения обладают селективной способностью к накоплению химических элементов. Установлено, что чем больше микроэлементов с широким интервалом концентраций сочетаются в одном растении, тем больше экологическая амплитуда произрастания данного растения и, как следствие, выше его адаптационные способности в условиях техногенного загрязнения.

Литература

1. Головатый С.Е., Савченко С.В., Позняк С.С., Чистик О.В. Мониторинг и использование земельных ресурсов: Учеб. пособие. Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2009. 149 с.
2. Инструкция 2.1.7.11-12-5-2004. Гигиеническая оценка почвы населенных мест: утв. Министерством здравоохранения РБ. Минск, 2004. 39 с.
3. Головатый С.Е., Жигарев П.Ф., Волкова Н.Д., Савченко С.В. Влияние техногенного загрязнения кормовых угодий на качество сельскохозяйственной продукции // Почвы и их плодородие на рубеже столетий: II съезд Белорусского общества почвоведов. Минск, 2001. Кн. 3. С. 39–40.
4. Савченко С.В. и др. Современное эколого-геохимическое состояние пойменных почв и растений Беларуси // Почвенные исследования и применение удобрений. 2001. Вып. 26. С. 85–100.
5. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
6. Полевой В.В. Физиология растений. М.: Высшая школа, 1989. 464 с.
7. Минеев В.Г. Химизация земледелия и природная среда. М.: Агропромиздат, 1990. 287 с.
8. Позняк С.С. Методологические подходы к исследованию содержания микроэлементов в зерне ячменя в зависимости от применяемых средств интенсификации // Экологический вестник. 2008. № 2(5). С. 110–116.
9. Калинович А.С., Позняк С.С., Романовский Ч.А., Феденя В.М. Воздействие производственной деятельности РУП «БелАЗ» на загрязнение почвенного покрова территории завода и прилегающих сельскохозяйственных угодий // Экологический вестник. 2009. № 1(7). С. 36–46.
10. Тяжелые металлы в системе почва – растение – удобрение. М.: Пролетарский светоч, 1997. 290 с.
11. Бингам Ф.Т., Коста М., Эйхенбергер Э. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов. М.: Мир, 1993. 368 с.
12. Bloomfield C. The translocation of metals in soils // The Chemistry of Soil Processes / Eds. D.J. Greenland, M.H.B. Hayes. N.Y.: John Willey & Sons, 1981. P. 463.
13. Гундарева А.Н. Биогенная миграция меди, цинка и марганца в наземных экосистемах Астраханской области: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Астрахань: АГТУ, 2006. 24 с.

Поступила в редакцию 21.01.2011 г.

Sergey S. Pozniak

Research Institute of Environmental Problem of International
Sakharov Environmental University, Minsk, Belarus

HEAVY METALS CONCENTRATION IN PLANTS OF FIELD AND POIC AGROPHYTOCENOSSES IN CONDITIONS OF ANTHROPOGENIC CONTAMINATION OF SOIL COVER

A conducted study of contamination of plants growing on field and poic agrophytocenoses close to industrial enterprises allowed for the first time to identify plants species and families accumulating heavy metals in excessive amounts.

In the course of the study it was revealed that:

– wild weeds formed in conditions of anthropogenic effect of large industrial center had higher elasticity to priority pollutants as compared to cultural plants artificially grown;

– a higher concentration of heavy metals in agrophytocenoses plants was found in hydromorphic peat soil of low-lying type that could be related to increased concentration of organic substance in peat as compared to sod-podzol easy loam soil, as well as intensive agricultural activity on lands located close to poultry factory “Octiabrskaya”;

– with anthropogenic contamination by heavy metals an ecological factor of plants elemental content formation became dominant. In the areas of ascertained geochemical abnormalities heavy metals mobility in soil-plant system increased significantly allowing their excessive accumulation in plants;

– distributional patterns of cobalt, tin, lead, nickel, manganese, copper, zink, zirconium, and chromium in plants of field and poic agrophytocenoses were revealed. The plants were grouped according to their resistance to heavy metals accumulation;

– for the first time there were revealed species and families of herbal plants accumulating heavy metals in maximal and minimal amounts, and those with contrast selective capacity to accumulation of individual elements;

– it was experimentally proved that plants had selective capacity to accumulation of chemical elements. It was revealed that the higher the number of microelements with wide spectrum of concentrations combined in one plant is, the higher an ecological amplitude of this plant grows, and, as a result, the higher its adaptation capacity in conditions of anthropogenic contamination is.

Key words: heavy metals; agrophytocenoses; plants families; wild weeds; ecological amplitude of growing.

Received January 21, 2011