

УДК 634.948.581.5

ЭКОЛОГО-БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В АГРОФИТОЦЕНОЗАХ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ¹

© 2006 Ю.В. Макарова²

Изучены особенности накопления тяжелых металлов (Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Cr) подсолнечником и кукурузой в условиях агрофитоценозов Самарской области.

Введение

Явление специфичности накопления растениями химических элементов, в том числе и тяжелых металлов, к настоящему времени изучено достаточно хорошо. Показано, что, потребляя металлы из окружающей среды, растительные организмы участвуют в их миграции и тем самым осуществляют свою геохимическую функцию. В современных условиях филогенетически закрепленный для каждого вида диапазон поглощения химических элементов активно меняется под воздействием антропогенного фактора. В этой связи возрастает актуальность эколого-биогеохимических исследований в агрофитоценозах, состояние которых определяет качество растительных продуктов питания и опосредованно продуктов питания животного происхождения, потребляемых человеком. Ниже представлены результаты эколого-биогеохимических исследований, проведенных в агрофитоценозах Самарской области, где в качестве объектов изучения были использованы подсолнечник и кукуруза.

Условия и методы исследований

Сбор почвенных образцов и растительного материала проводили в 2002 году с полей, расположенных в центральной части Волжского района Самарской области вблизи поселков Новоберезовский и Березки.

Площадь каждого отдельно взятого поля в целях исследовательской корректности была условно поделена на квадраты (10×10м) и пронумерована, начиная от границы насыпи дорожного полотна. Почвенные образцы для анализа отбирали из верхнего гумусового горизонта (0 – 10см) участков поля методом прикопок [8]. Растения выкапывали на тех же самых участках в сухую погоду, в

¹ Представлена доктором биологических наук профессором Н.М. Матвеевым.

² Макарова Юлия Владимировна (ecology@ssu.samara.ru), кафедра экологии, ботаники и охраны природы Самарского государственного университета, 443011, Россия, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

сходной фенофазе развития, три раза за вегетационный период – вначале (с 27 мая по 3 июня), середине (с 7 по 10 июля) и на заключительном этапе перед уборкой урожая (с 7 по 10 августа).

Оценка содержания и поведения химических элементов в системе «почва – растение» связана с блоком физико-химического анализа, позволяющим судить об условиях миграции элементов из почв и интенсивности их поглощения растениями. Поэтому отобранные почвенные образцы посредством общепринятых в почвоведении и геохимии методов [12] исследованы по ряду показателей: механический состав почвенных проб определен «мокрым» методом, методом бихроматного окисления по Никитину рассчитано содержание в почве гумуса, относительное содержание карбонатов оценено по интенсивности вскипания с 10% HCl, актуальная кислотность определена потенциометрическим методом на иономере универсальном ЭВ-74. Подготовленный мелкозем и растительный материал, озоленный в муфельной печи при температуре +450 ... +500 °С в течение 4-8 часов (в зависимости от характера образца), проанализированы посредством атомно-абсорбционной спектроскопии на содержание Zn, Cu, Pb, Cd, Ni и Cr (экстрагент для почвы 1Н HNO₃, для растительных объектов – смесь концентрированных HNO₃ и H₂SO₄) в имеющей государственную аккредитацию лаборатории на станции агрохимической службы «Ульяновская» (г. Ульяновск).

Обработка полученных в ходе исследований данных проведена общепринятыми методами на персональном компьютере с использованием пакета прикладных программ MS Excel for Windows.

Результаты и их обсуждение

Результаты атомно-абсорбционного анализа свидетельствуют, что интенсивность накопления Zn, Cu, Pb, Cd, Ni и Cr кукурузой выше, чем подсолнечником. В частности, на начальном этапе роста и развития кукуруза опережает подсолнечник по содержанию Zn в воздушно-сухой фитомассе в среднем в 4,6, Cu – в 3,7, Pb – в 1,4, Cd – в 0,4, Ni – в 5,2, Cr – в 7,0 раз. К середине вегетации разница между уровнями накопления металлов в указанных растениях значительно снижается, составляя для Zn – 1,3, для Cu – 1,1, для Pb – 0,7, для Cd – 0,3, для Ni – 2,1, для Cr – 2,5 раза. К концу онтогенеза рассчитываемые нами значения, как правило, немного увеличиваются. Разница между содержанием Cu в фитомассе кукурузы и подсолнечника в августовских пробах продолжает снижаться до 1,1 раза. Кроме того, совокупное содержание тяжелых металлов в образцах кукурузы больше, чем в образцах подсолнечника в 4,3 раза на начальном этапе вегетации и в 1,3 раза в середине и конце вегетации.

Изученным растениям присущи диаметрально противоположные стратегии аккумуляирования зольных элементов, к числу которых принадлежат и тяжелые металлы. Накопление каждого металла в отдельности, а значит и их суммарное накопление в фитомассе подсолнечника в течение лета нарастает, достигая максимума в августовских пробах, тогда как для кукурузы наивысший уровень Zn,

Cu, Ni и Cr регистрируется в пробах, относящихся к начальному этапу ее роста и развития, и только по Pb и Cd – в растительных образцах, собранных в последней трети лета (см. рисунок).

Минимум содержания большинства регистрируемых элементов в кукурузе приходится на середину лета, когда прирост ее биомассы идет наиболее активно, а Cd – на начало стабильно теплого времени года. Уточним, что суммарное содержание Zn, Cu, Pb, Cd, Ni и Cr в фитомассе кукурузы либо снижается от начала к концу вегетации, как это имеет место на расположенных в непосредственной близости от автодороги участках поля, либо, как и на всех остальных участках, минимальное накопление анализируемых металлов приурочено к середине лета и, по-видимому, обусловлено «эффektenom разбавления» [4].

Насыщенность тканей тяжелыми металлами на протяжении вегетации различается в 1,3 – 3,2 раза у кукурузы и в 1,9 – 2,2 раза у подсолнечника. Согласно существующим представлениям [5], такие колебания могут рассматриваться как небольшие. Однако более глубокий анализ обогащения растительных тканей каждым металлом в отдельности обнаруживает значительные колебания в онтогенезе уровня Cu (до 4,9 раз), Pb (до 7,0 раз) и особенно Cd (до 10,8 раз) у кукурузы, тогда как колебания насыщенности тканей кукурузы остальными металлами находятся в пределах нормы.

Изучаемые растения по-разному накапливают «тяжелые» элементы в надземных и подземных органах. Корневая система подсолнечника во всех без исключения вариантах аккумулирует металлы в меньшем количестве, чем зеленые органы растения (см. рисунок). Акропетальный тип распределения металлов (кроме Ni и Cr) свойствен кукурузе в начале вегетации, в то время как в середине и конце онтогенеза преимущественным их связыванием характеризуется надземная фитомасса, что, помимо корневого пути поступления, обусловлено фоллиарной составляющей процесса поглощения тяжелых металлов. Следовательно, большая часть контролируемых химических элементов в процессе заготовки силоса, имеющего место в нашем случае, будет изъята с побочной продукцией из биологического круговорота веществ, а значит, мы вправе ожидать обеднения почвы по Zn, Cu, Pb, Cd, Ni и Cr.

Органы тестируемых растений на протяжении всего периода вегетации испытывают определенные колебания уровня содержащихся в них элементов (см. рисунок). Оценивая накопление металлов в воздушно-сухой фитомассе корней изучаемых растений, мы можем утверждать, что у кукурузы пик аккумуляции корневой системой всех без исключения контролируемых металлов приходится на начало лета, в то время как пессимум содержания Zn, Cu, Cd и Cr – на середину, а Pb и Ni – на конец вегетации. Наивысший уровень Zn в надземных органах кукурузы отмечен в июне, Cu, Pb, Cd, Ni и Cr – в августе; наименьшее содержание Pb, Cd, Ni обнаружено на начальном этапе вегетации, Zn, Cu и Cr – в середине онтогенеза.

В отличие от кукурузы, максимум содержания Zn, Cu, Cd, Pb, Ni и Cr в корнях подсолнечника приурочен к середине лета, минимум Zn, Cu, Pb, Cd обнаружен в июньских растительных образцах, тогда как Ni и Cr – в августовских. И, наконец, минимальное количество Zn, Cu, Pb, Cd, Ni и Cr выявлено в зеленых частях подсолнечника, сбор которого проходил в начале летнего сезона, максимальное – в растительных образцах, относящихся к концу летнего сезона.

Детальный анализ процесса накопления металлов в надземных органах изучаемых растений показывает, что содержание Zn, Cu, Ni и Cr в стебле, а также Zn, Cu, Pb и Cr в листьях подсолнечника к августу зачастую снижается, а концентрация Ni в листьях и Cd в стебле и листьях нарастает. В противовес подсолнечнику количество всех элементов-маркеров в листьях и Pb, Cd, Ni и Cr в стебле кукурузы к концу лета увеличивается, и только содержание Zn и Cu в осевом органе растения снижается. Тем не менее, суммарное накопление тяжелых металлов стеблем тестируемых растений к августу снижается, одновременно с этим степень закрепления металлов листовой тканью кукурузы повышается на 25,4% в стареющих листьях по сравнению с молодыми, тогда как для листьев подсолнечника величина этого параметра незначительно уменьшается (на 2,6%). Среди основных причин, вызывающих рост содержания металлов в листьях в августе, наряду с биологической потребностью в микроэлементном обеспечении краугольных для растения метаболических процессов (фотосинтез, транспирация, синтез сложных органических соединений), можно выделить фолиарную аккумуляцию и биологическую трансформацию техногенной металлсодержащей пыли [4,7], начинающееся отмирание эпидермиса, повышающее проницаемость ткани листа для тяжелых металлов [1], а также нарушение антиконцентрационных барьеров, влекущее за собой слабо контролируемое поступление в листья избыточных количеств тяжелых металлов из корнеобитаемой зоны [4]. Кроме того, уровень таких металлов, как Zn, Cu, Pb, Cd и Cr в сухой листовой массе подсолнечника в середине вегетации выше, чем у кукурузы.

К концу онтогенеза ситуация меняется, и по количеству Zn, Ni и Cr в листьях кукуруза опережает подсолнечник; в итоге суммарное содержание тяжелых металлов в воздушно-сухой массе листьев на заключительном этапе онтогенеза оказывается в 1,2 раза выше, чем у подсолнечника. Пониженное по сравнению с подсолнечником содержание металлов в сухой листовой массе кукурузы в середине вегетации на фоне высокой поглотительной активности, свойственной для вида в целом, вероятнее всего, обусловлено смывом определенной доли тяжелых металлов с гладкой, неопушенной поверхности листьев кукурузы после дождя, тогда как широкая, шероховатая, в некоторой степени даже грубая (у нижних листьев) листовая пластина подсолнечника значительно легче удерживает осевшую на ее поверхность металлсодержащую пыль.

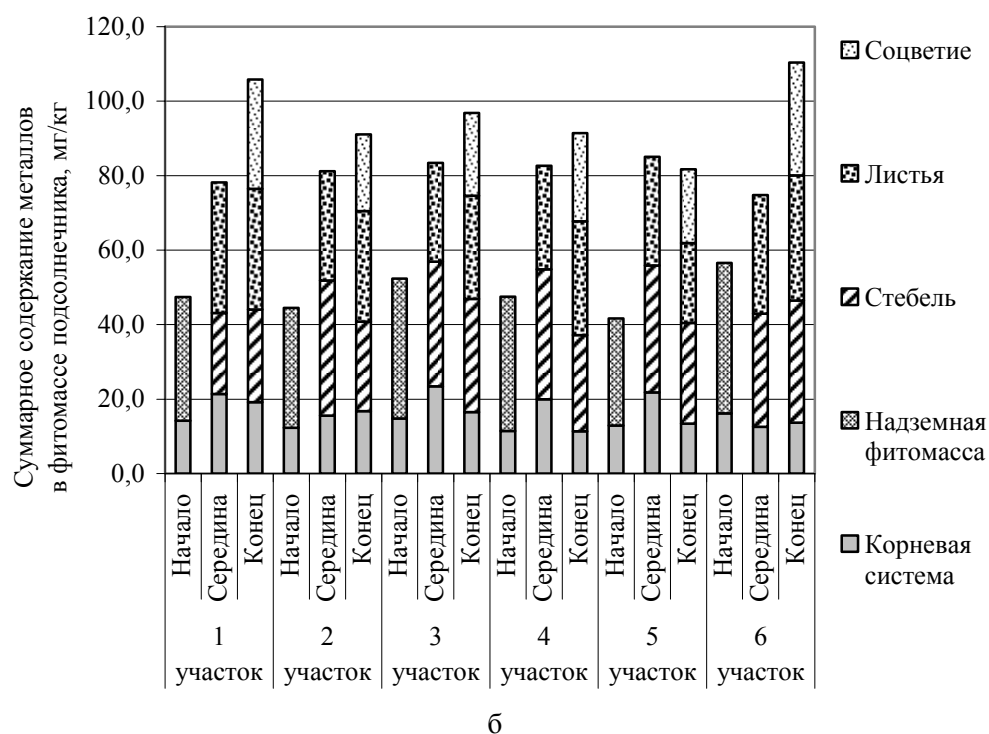
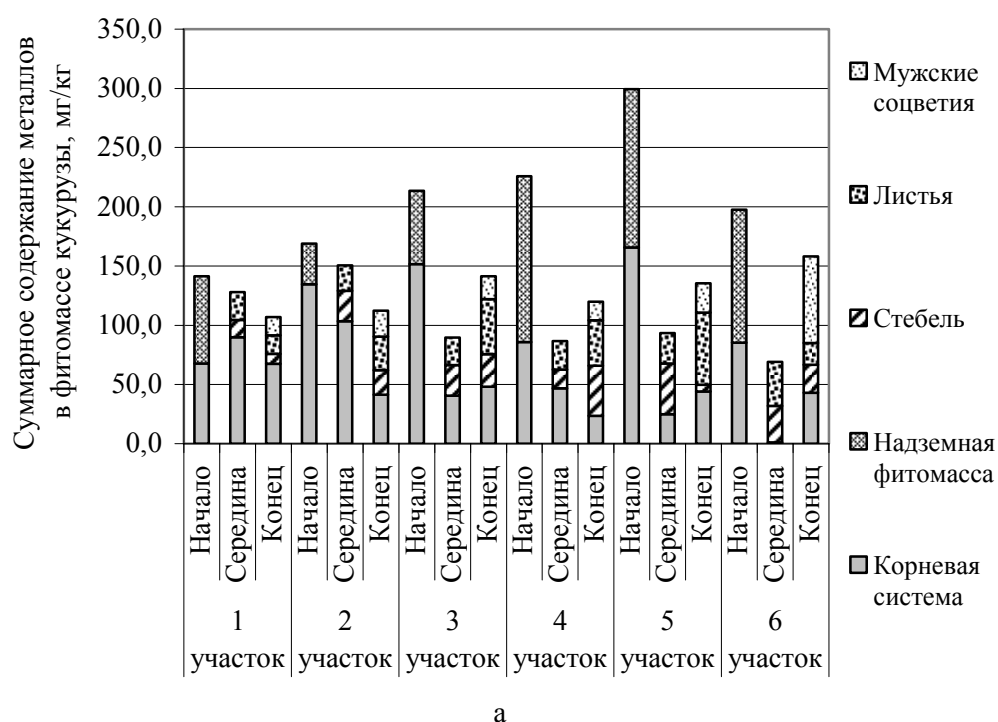


Рис. Суммарное содержание металлов в воздушно-сухой фитомассе кукурузы (а) и подсолнечника (б) в разные периоды вегетативного развития

Количественное содержание металлов в соцветии подсолнечника в большинстве случаев оказывается ниже, чем в стебле и листьях, но выше, чем в корневой системе. В соцветиях кукурузы оно выше, чем в стебле, но ниже, чем в корнях и листьях (см. рисунок). Пониженное по сравнению с другими органами содержание контролируемых металлов в генеративных структурах, по-видимому, связано с относительно недолгим периодом их развития, а также генетически закрепленным механизмом, обеспечивающим начальные благоприятные условия развития нового поколения [4].

С позиций представлений о том, что химический состав растений является (в общих чертах) отражением содержания макро- и микроэлементов в почве, нами был проведен математический анализ зависимости между содержанием подвижной формы изучаемых металлов в почве и их накоплением в кукурузе и подсолнечнике. Он показал, что степень корреляции между этими показателями у кукурузы низка (от -0,26 у Cu до 0,25 у Zn при уровне значимости 0,05), и лишь в отношении Pb и Cr регистрируется достоверная отрицательная корреляционная связь средней тесноты (значения величины r соответственно равны -0,53 и -0,63). Следует отметить, что накопление Zn и Cu кукурузой закономерно превышает концентрацию кислоторастворимых форм этих металлов в почве.

В отличие от кукурузы, уровень аккумуляции Zn, Cu, Pb, Ni и Cr в фитомассе подсолнечника определяется содержанием их кислоторастворимых форм в почве, а рассчитанные между указанными параметрами значения коэффициентов корреляции зачастую укладываются в диапазон, соответствующий средней тесноте связи (r от 0,50 до 0,63). Исключение составляет Pb, между величиной подвижной формы которого в почве и количеством в фитомассе подсолнечника существует весьма высокая достоверная положительная сила связи ($r = 0,94$).

В сложных по химическому составу почвенных растворах содержится множество элементов, процессы взаимодействия между которыми, определяющие степень их доступности для растений, и механизмы, остающиеся на настоящий момент еще недостаточно изученными, зависят от целого ряда факторов. В частности, математическая обработка данных показывает, что в аккумуляции тяжелых металлов растениями прослеживается либо антагонизм (характерен для кукурузы), при котором поглощению одних химических элементов препятствуют другие, содержащиеся в почве элементы, либо синергизм (присущ подсолнечнику), при котором поглощение растением одного металла усиливается за счет другого. Имеющая место смена антагонистических отношений между элементами на синергические является следствием различных условий произрастания и неодинаковой потребности видов в поступающих извне веществах.

Результаты корреляционного анализа, как правило, обнаруживают слабо выраженную зависимость количественного содержания контролируемых тяжелых металлов в массе кукурузы и подсолнечника от таких почвенных характеристик, как кислотность, гумусность и карбонатность, а сделанное нами заключение о

стохастичности характера поведения металлов в блоке «почва – растение» находит подтверждение в работах других авторов [2, 3, 13].

Захват любого химического элемента растением знаменует его вовлечение в особую форму движения – биологическую миграцию, а так как физиологическое значение элементов неодинаково, то и интенсивность их вовлечения в этот процесс различна. Данная закономерность может быть наглядно продемонстрирована посредством показателя биологического поглощения (интенсивности биологического поглощения, A_x), предложенного Б.Б. Пыльниковым [11] в середине прошлого века.

По способности к биологическому поглощению считается, что при $A_x > 1$ элементы накапливаются растениями, при $A_x < 1$ только захватываются, при этом как степень накопления химических элементов, так и степень их захвата может быть различной [10]. В соответствии с предложенной А.И. Перельманом классификацией определяемые в образцах кукурузы и подсолнечника тяжелые металлы можно отнести к трем следующим группам: сильного биологического накопления (Zn), среднего биологического захвата (Cu, Pb, Cd, Ni) и слабого и очень слабого биологического захвата (Cr). Подобное подразделение элементов является характерным для онтогенеза подсолнечника в целом и для кукурузы в начале и середине ее вегетативного развития. Отличительной чертой заключительного этапа онтогенеза кукурузы является величина A_x хрома, позволяющая отнести данный химический элемент к группе среднего биологического захвата. Как видим, положение большинства тяжелых металлов в группах биологического поглощения совпадает с ранее установленным [10], но есть и свои особенности. Так, согласно шкале А.И. Перельмана, Cd и Cr относятся к группе слабого и очень слабого биологического захвата, а их коэффициенты поглощения находятся в пределах $0,1 - 0,001$. В нашем случае Cd и Cr (у подсолнечника и в августовских образцах кукурузы) по интенсивности накопления растениями принадлежат к группе среднего биологического захвата. В то же время полученные нами результаты согласуются с представлениями А. Кабаты-Пендиас и Х. Пендиас [6] о Cd как элементе, активно накапливаемом большинством видов растений.

Причина наименьшей по сравнению со всеми остальными металлами интенсивности поглощения Cr изучаемыми видами кроется не только в его слабой подвижности в климатических условиях нашего региона, но и в его типично анионогенной природе с присущим элементу, согласно классификации А.Д. Айвазяна [9], накоплением в типично ариднитных растениях (кермек, полынь, ковыль и др.), центры происхождения которых находятся в крайне аридных областях с подвижными для этих регионов анионогенными элементами (Mo, B, Cr, V, Ti, частично Zr). Естественные ареалы кукурузы и подсолнечника (засушливые, степные районы Северной Америки) исторически накладывают свой отпечаток, формируя филогенетическую специализацию изучаемых видов с присущими ей особенностями химического состава и закладывая возможность потребления растениями Cr с интенсивностью, близкой по значению к верхней планке пока-

зателя, установленного для данного химического элемента в классификации А.И. Перельмана, а порой даже превышая ее.

По интенсивности поглощения анализируемыми видами металлы могут быть расположены в следующие ряды (в порядке убывания значений): $Zn > Cu > Ni > Cd > Pb > Cr$ (кукуруза) и $Zn > Cd > Cu > Ni > Pb > Cr$ (подсолнечник), что, кроме количественной разницы в показателях, вычисленных для каждого элемента в отдельности, указывает на специфику поглощения Cd изучаемыми сельскохозяйственными культурами, а изменчивость коэффициента по участкам в пределах полей и между полями наглядно демонстрирует разнообразие условий и характера миграции тяжелых металлов в системе «почва – растение».

Нами также установлено, что для почв анализируемых агрофитоценозов присущи сверхфоновые содержания подвижных форм Zn и Pb. Сверхфоновое количество Zn в почве обнаруживает себя в сверхфоновой концентрации этого же металла в сухой массе кукурузы и подсолнечника, тогда как содержание в растительной продукции Pb не превышает максимального регионального фоновое уровня, указанного для данных видов в пределах лесостепного и степного Поволжья в монографии Н.М. Матвеева с соавторами [8]. В то же время полученные нами результаты свидетельствуют о том, что количество Cu, Ni, Cr, а для подсолнечника еще и Cd, в воздушно-сухой фитомассе оказывается выше, чем тех же самых металлов в фитомассе кукурузы и подсолнечника, развивающихся на участках региона, внешне не затронутых антропогенно-техногенной трансформацией.

Стоит отметить, что если показатели уровня содержания химических элементов в почве и растениях, коэффициенты интенсивности биологического поглощения и построенные на их основе ряды поглощения металлов представляют определенный научный интерес, то наиболее информативным и понятным с точки зрения оценки опосредованной либо прямой угрозы здоровью человека является оценка загрязнения с позиции предельно допустимой концентрации (ПДК). Так, согласно указанному критерию в собранных нами на территории Самарской области почвенных образцах превышен уровень лишь одного из определяемых металлов – Cr; количество в почве отдельно взятых кислоторастворимых форм Zn, Cu, Pb, Cd и Ni остается в границах нормы. Настораживает тот факт, что внешне благополучная по перечисленным металлам обстановка с гигиенической чистотой почв маскирует угрозу загрязнения пищевой цепи приоритетными по токсичности и активности накопления в живых организмах Zn, Cd и Ni. Содержание их в надземной фитомассе изучаемых нами сельскохозяйственных культур оказывается порой значительно выше критерия ПДК, тогда как на «грязной» по Cr почве формируется вполне безопасная «чистая» вторичная растительная продукция. Уточним, что сделанные нами выводы имеют свою специфику, ибо степень загрязненности выращенных на подконтрольных участках растений на протяжении летнего сезона варьируется в широких пределах.

Заключение

Таким образом, представленный выше материал позволяет говорить о том, что интенсивность поглощения и накопления Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Cr кукурузой и подсолнечником, характер распределения металлов между основными составными частями растений (корневая система, надземная фитомасса) и органами видоспецифичны и не константны во времени, а степень концентрирования металлов есть функциональное проявление происхождения, возраста и конкретных условий произрастания растений. Кроме того, математический анализ данных по содержанию Zn, Cu, Pb, Cd, Ni и Cr в фитомассе кукурузы и подсолнечника и в почвенных образцах, отобранных непосредственно под растениями, слабая зависимость количественного содержания тяжелых металлов в воздушно-сухом веществе растений от основных почвенных характеристик (гумусности, кислотности, карбонатности), факт накопления кукурузой Zn и Cu сверх концентрации кислоторастворимых форм одноименных металлов в почве и сходные данные, полученные другими исследователями [8], свидетельствуют, что приоритетными факторами, определяющими уровень аккумуляции тяжелых металлов в фитомассе, являются все же не столько содержание потенциально подвижной формы металлов в почве и агрохимические характеристики последней, сколько потребность самого растения в каждом конкретном химическом элементе и способность вида к реализации этой потребности.

Литература

- [1] Биогеохимическая оценка состояния природной среды (опыт разработки регионального анализа) / В.В. Батоян [и др.] // Труды биогеохимической лаборатории. 1990. – Т. 21. – С. 108-124.
- [2] Богомазов, Н.П. Микроэлементы и тяжелые металлы в выщелоченных черноземах ЦЧЗ РФ / Н.П. Богомазов, П.Г. Акулов // Тяжелые металлы и радионуклиды в агроэкосистемах: матер. науч.-практ. конф. – Иваново: Типография ГУ КПК Минтопэнерго РФ, 1994. – С. 18-21.
- [3] Галкина, Н.А. Биогеохимический мониторинг агролесоландшафтов ЦЧЗ: автореф. дис. ... канд. биол. наук / Н.А. Галкина. – Воронеж, 1998. – 24 с.
- [4] Ильин, В.Б. Элементарный химический состав растений / В.Б. Ильин. – Новосибирск: Наука, 1991. – 151 с.
- [5] Ильин, В.Б. Распределение свинца и кадмия в растениях пшеницы, произрастающей на загрязненных этими металлами почвах / В.Б. Ильин, М.Д. Степанова // Агрохимия. 1980. – №5. – С. 114-120.
- [6] Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

- [7] Кавеленова, Л.М. Проблемы организации системы фитомониторинга городской среды в условиях лесостепи / Л.М. Кавеленова. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2003. – 124с.
- [8] Матвеев, Н.М. Экологические основы аккумуляции тяжелых металлов сельскохозяйственными растениями в лесостепном и степном Поволжье / Н.М. Матвеев, В.А. Павловский, Н.В. Прохорова. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 1997. – 215с.
- [9] Мотузова, Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг / Г.В. Мотузова. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 168с.
- [10] Перельман, А.И. Геохимия ландшафта / А.И. Перельман М.: Высшая школа, 1975. – 342 с.
- [11] Полынов, Б.Б. Учение о ландшафтах / Б.Б. Полынов. Избранные труды. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 751 с.
- [12] Практикум по агрохимии / под ред. В.Г. Минеева. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 214 с.
- [13] Шихова, Л.Н. Тяжелые металлы в почвах и растениях фоновых территорий / Л.Н. Шихова, Т.Л. Егошина // Экологическая ботаника: наука, образование, прикладные аспекты: тез. докл. междунар. конф. – Сыктывкар: Изд-во Сыктывкарского ун-та, 2002. – С. 257.

Поступила в редакцию 25/IX/2006;
в окончательном варианте – 4/X/2006.

ECOBIOGEOCHEMICAL INVESTIGATIONS IN AGRIPHYTOCENOSSES OF SAMARA REGION³

© 2006 Ju.V. Makarova⁴

Features of heavy metals accumulation (Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Cr) by wheat and corn are studied in agrophytocenoses of Samara Region.

Paper received 25/IX/2006.

Paper accepted 4/X/2006.

³ Communicated by Dr. Sci. (Biology) Prof. N.M. Matveyev.

⁴ Makarova Julia Vladimirovna (ecology@ssu.samara.ru), Dept. of Ecology, Botany and Environmental Protection, Samara State University, Samara, 443011, Russia.