

На правах рукописи

СИБГАТУЛЛИНА Мадина Шавкатовна

**МЕТАЛЛЫ В ДИКОРАСТУЩИХ РАСТЕНИЯХ ТАТАРСТАНА
И ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИХ СОДЕРЖАНИЕ**

Специальность 03.00.16 – экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Казань – 2009

Работа выполнена в ГБУ Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор
Зялалов Абдуллазян Абдулкадырович

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор
Хохлова Людмила Петровна

кандидат биологических наук, доцент
Капитонова Ольга Анатольевна

Ведущая организация: Институт биологии Уфимского
научного центра РАН

Защита состоится 17 сентября 2009 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.081.19 при ФГОУ ВПО «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина» по адресу: 420008, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными гербовой печатью, просим направлять по адресу: 420008, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18, КГУ, диссертационный совет ДМ 212.081.19.

Факс: (843) 238-76-01; e-mail: attestat.otdel@ksu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета по адресу: г. Казань, ул. Кремлевская, 35.

Автореферат разослан «___» _____ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук, доцент

Р.М. Зелеев

Актуальность. В мире ежегодно производятся сотни миллионов тонн химических продуктов. Разными путями эти вещества или продукты их частичных биологических превращений, чаще всего токсичного характера, концентрируются в биосфере в колоссальных количествах и значительно влияют на экологическое равновесие (Квеситадзе и др., 2005). Тяжелые металлы являются одним из особо опасных для живых организмов классов поллютантов (Ильин, 2007). В связи с этим возникает необходимость в исследованиях меры загрязненности ими различных компонентов биосферы и в первую очередь растений естественных экосистем как основной составляющей растительных ресурсов и начального звена биогенного круговорота микроэлементов. В последнее десятилетие вновь возрастает интерес к методам фитотерапии. Все более широкое распространение в лечебно-профилактических учреждениях получают фитобары и применение фитококтейлей. Известно, что около 80% населения планеты применяют лекарственные растения для лечения различных заболеваний (Woods, 1999). Однако в связи с нарастанием техногенного загрязнения окружающей среды, особенно в пригородных зонах крупных городов, не только снижается качество лекарственного растительного сырья, но оно может представлять и экотоксикологическую опасность, в том числе по содержанию в нем тяжелых металлов, отличительной чертой которых является способность накапливаться по пищевой цепи. Установление уровня содержания металлов (биофильных элементов и тяжелых металлов) в дикорастущих (лекарственных и кормовых) травянистых растениях, произрастающих в различных по техногенной нагрузке районах, актуально в области практического экологически безопасного использования растительных ресурсов.

Цель данной работы – выявление зависимости содержания биофильных элементов и тяжелых металлов в дикорастущих травянистых растениях Республики Татарстан от их биологических особенностей и экологических факторов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1) определить фоновое содержание биофильных элементов (Cu, Fe, Zn, K, Ca) и тяжелых металлов (Pb, Cd) в дикорастущих (лекарственных и кормовых) растениях РТ;
- 2) изучить межвидовые различия в аккумуляции Cu, Fe, Zn, K, Ca и Pb, Cd дикорастущими растениями;
- 3) оценить экологическую безопасность дикорастущих лекарственных растений по содержанию в них Pb и Cd;
- 4) установить органоспецифичность содержания металлов в дикорастущих растениях;
- 5) исследовать влияние эдафических и фитоценологических условий на аккумуляцию биофильных элементов и тяжелых металлов дикорастущими растениями;
- 6) определить сопряженность содержания биофильных элементов и тяжелых металлов в растениях с типами адаптивных стратегий.

Научная новизна. Впервые дана биогеохимическая характеристика 90 видов дикорастущих (лекарственных и кормовых) травянистых растений естественных фитоценозов Республики Татарстан (РТ).

Впервые проведена оценка экологической безопасности дикорастущих растений РТ как потенциальных источников лекарственного растительного сырья по содержанию в них Pb и Cd.

На большом фактическом материале установлена органоспецифичность

содержания биофильных элементов и тяжелых металлов в дикорастущих растениях.

Определен характер зависимости содержания исследуемых элементов от эдафических и фитоценологических условий среды, техногенной нагрузки.

Выявлены особенности содержания биофильных элементов и тяжелых металлов в растениях с различной степенью выраженности адаптивных типов стратегий. Получены новые сведения о сопряженности аккумуляции ряда микроэлементов с типами адаптивных стратегий растений.

Практическая значимость. Представленная в работе биогеохимическая характеристика 90 видов травянистых растений естественных фитоценозов 6 районов РТ и г. Казани позволяет выявить благоприятные и неблагоприятные с точки зрения экологической безопасности растительности районы для заготовки и использования лекарственного растительного сырья.

Результаты работы могут быть использованы при биоиндикации экологического состояния почв и дикорастущих растений, а также могут быть учтены при проведении биогеохимического картографирования и районирования территории РТ.

Обнаружены лекарственные растения в Зеленодольском районе с высоким содержанием тяжелых металлов, использование которых в терапевтических целях может нанести ущерб здоровью человека.

Полученные в работе результаты представляют значительный интерес с точки зрения прогнозирования динамики экосистем под влиянием нарастающего техногенного воздействия.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Фоновое содержание нормируемых элементов в дикорастущих травянистых растениях РТ значительно ниже ПДК в пищевых продуктах и МДУ в кормах.

2. Наиболее значимыми факторами, влияющими на особенности аккумуляции биофильных элементов и тяжелых металлов в дикорастущих растениях РТ, являются видовая специфичность, эдафический фактор и уровень техногенной нагрузки.

3. Органоспецифичность содержания Pb и Cd в дикорастущих растениях РТ определяется уровнем техногенной нагрузки.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на международных научных конференциях «Ломоносов» (Москва, 2007, 2008), «Сахаровские чтения 2007 года: экологические проблемы XXI века» (Минск, 2007), "Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ЕЛРПТ 2007» (Тольятти, 2007), «Экология и научно-технический прогресс» (Пермь, 2007), «Проблемы биологии, экологии, географии, образования: история и современность» (Санкт-Петербург, 2008), на всероссийских научных конференциях "Автотранспортный комплекс - проблемы и перспективы, экологическая безопасность" (Пермь, 2007), «Современные вопросы природопользования: агропромышленный комплекс и лесное хозяйство» (Казань, 2008), «Симбиоз Россия-2008» (Казань, 2008), «Биосфера Земли: прошлое, настоящее, будущее» (Екатеринбург, 2008), на республиканской научной конференции «Актуальные экологические проблемы РТ» (Казань, 2007).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 1 статья в рецензируемом журнале, рекомендованном ВАК.

Личный вклад автора. Автором лично осуществлены: разработка программы исследований, отбор проб почв и растений в полевых условиях, пробоподготовка

образцов, проведение 14 196 элементоопределений методом атомно-абсорбционной спектрометрии и пламенной фотометрии, обработка, интерпретация результатов исследований. Научные положения и выводы формировались совместно с научным руководителем.

Структура и объем исследований. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, выводов, библиографического списка, включающего 233 источника, в том числе 57 на иностранных языках. Работа изложена на 154 страницах, содержит 22 таблицы, 46 рисунков, 4 приложения.

Благодарности. Работа выполнена в Институте проблем экологии и недропользования Академии наук РТ под руководством д.б.н., профессора А.А. Зялалова, которому автор выражает благодарность за помощь, советы и научные консультации на всех этапах выполненных исследований.

Особую благодарность и признательность автор выражает зав. лабораторией биогеохимии ИПЭН АН РТ, к.б.н. Д.В. Иванову за внимание, помощь, внимательное прочтение рукописи, полезные предложения и советы.

Автор благодарит доцента кафедры общей экологии факультета географии и экологии КГУ, к.б.н. Г.А. Шайхутдинову за помощь при составлении названий фитоценозов; Л.В. Фомину за помощь при определении видов растений; ассистента кафедры общей экологии факультета географии и экологии КГУ, к.б.н. В.Е. Прохорова за помощь при определении экологических групп растений с разными типами регуляции водного обмена.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Дана общая характеристика биофильных элементов и тяжелых металлов, приведена физиологическая роль исследованных элементов в организме растения и человека, рассматриваются источники их поступления в окружающую среду и пути поступления в растения, проанализированы литературные данные по аккумуляции тяжелых металлов в дикорастущих растениях, рассмотрены типы адаптивных стратегий растений по Раменскому-Грайму и по отношению к фактору влажности. Приводятся литературные данные по содержанию микроэлементов и тяжелых металлов в дикорастущих растениях различных регионов России, мира и РТ. Выявлено противоречие литературных данных по вопросу транслокации микроэлементов и тяжелых металлов в органы дикорастущих растений.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Природно-климатические условия Республики Татарстан. Приводится краткая физико-географическая характеристика республики, особенности гидрографии, почвообразующих пород и почв, климатических условий и растительности.

2.2. Объекты исследований. Изучение содержания биофильных элементов и тяжелых металлов проводилось на дикорастущих травянистых растениях луговых и лесных фитоценозов в 6 административных районах РТ, а также растениях урбофитоценозов г. Казани. Следует отметить, что все пробные площадки (за исключением пробных площадок в урбофитоценозах) закладывались вдали от возможных источников загрязнения. Всего было заложено 15 пробных площадок

(№ 1 - № 6 в Зеленодольском районе, № 7, № 11 – в г. Казани, № 8 – в Верхнеуслонском, № 9, № 10 – в Бугульминском, № 12, № 13 – в Пестречинском, № 14 – в Альметьевском, № 15 – в Мамадышском районах).

В составе флоры исследуемых пробных площадок обнаружено 90 видов 35 семейств растений. Идентификацию типов адаптивных (экологических) стратегий растений проводили по работам J. Grime et. al (1988) и D. Frank, S. Klotz (1988).

2.3. Методика отбора растительных и почвенных образцов и их первичная пробоподготовка. В каждом фитоценозе закладывалась одна пробная площадка размером 10 м². Растения отбирали в летние периоды 2006-2007 гг. вместе с корневой системой. Всего было отобрано 160 проб растений различных видов. Собранные растения разделяли на отдельные органы (корни, стебли, листья и цветы), высушивали до воздушно-сухого состояния. Образцы почвы (0-20 см) отбирали методом конверта (ГОСТ 17.4.4.02-84). Всего было отобрано 75 проб почв. В почве определяли содержание подвижных и валовых форм Cu, Fe, Zn, Pb, Cd, обменных форм K и Ca, кислотность, содержание гумуса, наличие карбонатов и гранулометрический состав.

2.4. Методика определения металлов в растительных и почвенных образцах. Минерализацию растительных образцов проводили методом сухого озоления в муфельной печи при температуре 450⁰С. После озоления биофильные элементы и тяжелые металлы экстрагировались 20%-й HCl (ГОСТ 26929-94). Подвижные формы соединений микроэлементов и ТМ в почвах извлекали ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8 (РД 52.18.289-90), валовые - 5М азотной кислотой (РД 52.18.191-89). Определение обменных форм K и Ca в почве осуществляли по Кирсанову (Практикум ..., 2001) с помощью 0,2 н. раствора HCl. В полученных растворах определяли содержание тяжелых металлов методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе ААС-30 и K, Ca методом пламенной фотометрии на приборе Flapho-var. Определение актуальной кислотности почвы проводили в соответствии с общепринятыми методиками (Практикум ..., 2001). Содержание гумуса в почве определяли по ГОСТ 26213-84.

Всего проанализирован 661 образец 90 видов дикорастущих травянистых растений и 15 образцов почвы. Повторность определения 3-х кратная.

Для оценки меры поглощения исследованных элементов растениями были рассчитаны следующие коэффициенты: КБП – коэффициент биологического поглощения (отношение содержания элемента в золе растений к содержанию его в горной породе или почве); КН – коэффициент накопления (отношение содержания элемента в сухой массе растений к содержанию его подвижных форм в почве); К_{кб} – коэффициент корневого барьера (отношение содержания элемента в корне к содержанию его в надземных органах растения) (Плеханова, 2007).

В таблицах и на рисунках представлены средние значения с их стандартными ошибками (Лакин, 1980). Достоверность различий между вариантами оценивали по критерию Краскела-Уоллиса (Лакин, 1980). Корреляционный анализ данных проводился с использованием коэффициентов корреляции Пирсона (r) и Спирмена (r_s) (Лакин, 1980; Рокицкий, 1973). Математическая, статистическая обработка данных и построение гистограмм проводились с помощью стандартных пакетов Microsoft Exel 2007 и Statistica 6.0 (StatSoft, Inc. 2001).

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Содержание биофильных элементов и тяжелых металлов в почвах исследованных участков

Поток тяжелых металлов в растения зависит от разных факторов: уровня загрязнения почвы, валового содержания, концентрации в почве их подвижной формы (Roberts, Johnson, 1978; Ильин, 1991), способности корня поглощать элементы и тем самым вовлекать их в биологическую миграцию (Добровольский, 1983). В работе исследовалось содержание валовой и подвижной форм микроэлементов в почве, а также содержание обменных форм К и Са.

Содержание элементов в почве исследуемых площадок отличается значительной вариабельностью, причем содержание подвижных форм изменяется в большей степени (табл. 1). Это обусловлено различием эдафических условий на исследуемых пробных площадках – типом почвы, ГМС, содержанием гумуса и кислотностью, характеристика которых приведена в таблице 2.

За региональное фоновое содержание микроэлементов в почве и наземной растительности может быть принято как выборочное среднее, которое включает в себя аномальные значения содержания, так и медиана (50-й центиль), из величины которой эти значения исключены (Лакин, 1990; Иванова, 2008; Басова, 2008). За фоновые значения в работе приняты медианные значения содержания элементов в почве и растительности, соответствующие 50-% частоте на кривой распределения.

Таблица 1

Средние и медианные значения содержания биофильных элементов (БЭ) и тяжелых металлов (ТМ) в почве

Подвижная форма БЭ и ТМ, мг/кг сухого веса						
	Среднее (n=15)	Медиана	Среднее (n=11)	Медиана	Среднее (n=3)	Медиана
	РТ		Западное Предкамье		Восточное Закамье	
Cu	0.4±0.3	0.1	0.5±0.4	0.1	0.03±0.01	0.02
Fe	51.0±15.8	16.5	63.0±18.3	43.4	2.7±1.01	3.5
Zn	3.0±1.1	1.5	3.7±1.3	2.0	0.1±0.01	0.1
Pb	1.0±0.4	0.5	1.3±0.5	0.7	0.2±0.01	0.2
Cd	0.13±0.05	0.04	0.15±0.06	0.05	0.03±0.01	0.04
Валовая форма БЭ и ТМ, мг/кг сухого веса						
Cu	7.4±2.0	5.39	6.5±2.4	4.7	11.0±1.78	9.3
Fe	7864±1493	7464	5640±1099	5332	16759±1410	17140
Zn	14.8±2.7	13.20	14.7±3.5	12.1	15.1±0.69	15.3
Pb	5.5±1.4	4.31	6.1±1.7	4.9	3.04±1.09	4.0
Cd	0.3±0.1	0.07	0.3±0.1	0.11	0.07±0.03	0.07
Обменная форма БЭ, мг/кг сухого веса						
K	115±25	125	106±31	59	150±19	138
Ca	5113±1427	3819	3749±1463	1602	10571±2344	10849

Как следует из полученных результатов, вследствие большей плодородности и большей буферной емкости почвы, содержание биофильных элементов в почвах исследованных площадок в Восточном Закамье оказалось выше, а содержание Pb и

Cd – ниже, чем в почвах Западного Предкамья.

Сравнение полученных в работе значений регионального фона с известными нам литературными данными по содержанию валовых форм микроэлементов в почвах РТ (Даутов и др., 1991; Иванов и др., 1994; Григорьян и др., 1994; Озол и др., 1999; Ильязов и др., 2006; Иванова, 2008) показало, что содержание Cu, Zn, Fe, Pb, Cd оказалось ниже литературных данных, как в почвах Предкамья, так и в почвах Закамья.

Таблица 2

Характеристика пробных площадок по комплексу изученных
эдафических факторов

№ ПП	Почва	Район	Тип фитоценоза	Содержание гумуса, %	ГМС	pH
1	Светло-серая лесная	Зеленодольский	Л	2.00	легкий суглинок	6.23
2	Светло-серая лесная	Зеленодольский	Л	1.50	легкий суглинок	5.72
3	Дерново-подзолистая	Зеленодольский	ЛХ	0.80	супесь	4.33
4	Дерново-подзолистая	Зеленодольский	ЛХ	0.70	супесь	4.25
5	Дерново-подзолистая	Зеленодольский	ЛХ	1.30	супесь	4.40
6	Дерново-подзолистая	Зеленодольский	П	0.80	супесь	4.27
7	Урбанозем	г. Казань	УБФ	1.00	глина	7.15
8	Серая лесная	Верхнеуслонский	Л	3.30	средний суглинок	5.35
9	Чернозем выщелоченный	Бугульминский	Л	4.30	средний суглинок	5.03
10	Дерново-карбонатная типичная смытая	Бугульминский	Л	7.20	тяжелый суглинок	7.58
11	Урбанозем	г. Казань	УБФ	2.90	средний суглинок	7.83
12	Аллювиальная дерновая	Пестречинский	Л	2.50	супесь	7.48
13	Дерново-подзолистая смытая	Пестречинский	ЛШ	2.30	средний суглинок	4.56
14	Чернозем типичный	Альметьевский	Л	7.80	тяжелый суглинок	7.55
15	Светло-серая лесная	Мамадышский	ЛШ	3.40	средний суглинок	5.68

Примечание. Л – луговой фитоценоз, ЛХ – лес хвойный, ЛШ – лес широколиственный, П – прогалина, УБФ – урбофитоценоз.

Наибольшее содержание подвижных форм Cu, Zn и Pb обнаружено в почвах урбофитоценозов (тип почвы – урбанозем). Высоким содержанием подвижного Fe характеризуются почвы хвойных фитоценозов (тип почвы – дерново-подзолистая), а Cd – почвы лугового фитоценоза в Зеленодольском районе (тип почвы – светло-серая лесная). Наибольшим содержанием К в почве отличаются почвы широколиственного фитоценоза (тип почвы – светло-серая лесная, дерново-подзолистая смытая), а Ca – почвы площадок луговых фитоценозов (тип почвы – светло-серая лесная). Наименьшее содержание Cu обнаружено в почвах луговых

(тип почвы – светло-серая лесная) и лесных (тип почвы – дерново-подзолистая) фитоценозов в Зеленодольском районе, Fe, Zn, Pb – в почве луговых фитоценозов (тип почвы – светло-серая лесная). В почве хвойных лесов Cd обнаружен не был. Наименьшее содержание K и Ca обнаружено в почве прогалины в хвойном лесу (тип почвы – дерново-подзолистая).

Сравнение значений содержания подвижных форм металлов в почве со шкалой, предложенной А.И. Обуховым (1992) указывает на то, что исследуемые участки отличаются «низким» содержанием доступных форм Cu (<0.2 мг/кг). Содержание подвижных форм Zn в почве большей части пробных площадок характеризуется как «очень низкое» (<1 мг/кг) и «низкое» (1-2 мг/кг). «Высокая» (1.5-5 мг/кг) концентрация подвижного Pb свойственна урбаноземам и светло-серой лесной почве в Зеленодольском районе. В светло-серых лесных почвах луговых фитоценозов в Зеленодольском районе обнаружено «слабое загрязнение» (0.5-1 мг/кг) подвижными формами Cd.

Для выявления взаимосвязи между валовой и подвижной формами элементов в почвах были рассчитаны коэффициенты корреляции (табл.3). Высокая положительная корреляционная связь обнаружена для содержания валовой и подвижной форм Cd, для Fe она отрицательная. Известно, что Fe с легкостью формирует нерастворимые гидроксиды, что делает его недоступным для растений (Halvorsan, Lindsay, 1972; Cline et al., 1982). Следовательно, повышенное содержание в почве прочно связанного железа в составе оксидов снижает содержание его подвижных форм в почве.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции (r_s) между содержанием валовых (в) и подвижных (п) форм элементов в почвах (n=15)

	Cu _в	Fe _в	Zn _в	Pb _в	Cd _в
Cu _п	0.23	0.08	0.14	0.52	0.24
Fe _п	-0.76	-0.89	-0.68	-0.22	-0.47
Zn _п	0.08	-0.23	0.38	0.59	0.49
Pb _п	-0.13	-0.47	-0.07	0.25	-0.06
Cd _п	0.51	0.38	0.78	0.65	0.84

Примечание. Выделенные жирным шрифтом коэффициенты корреляции значимы при $p < 0.05$.

При корреляционном анализе данных по содержанию подвижных форм металлов в почвах и по ее кислотности обнаружили отрицательную корреляцию между величиной pH и содержанием Fe ($r_s = -0.63$). В кислых почвах создаются благоприятные условия для восстановления Fe³⁺ до Fe²⁺, что способствует повышению растворимости соединений железа (Битюцкий, 2005). Известно также, что дефицит Fe часто существует в почвах с высокими значениями pH, наличием карбонатов, низким содержанием органического вещества и в песчаных почвах (Lindsay, Schwab, 1982). Не было обнаружено зависимости между содержанием подвижных форм Pb и Cd и кислотностью почвы.

Обнаружена значимая ($p < 0.05$) отрицательная зависимость между содержанием в почве гумуса и содержанием подвижных форм Fe ($r_s = -0.84$) и Pb ($r_s = -0.66$). Известно, что Pb и Cd в гумусированных горизонтах почвы аккумулируются в составе органического вещества (Водяницкий, 2008). Следовательно, содержание органического вещества в почве для Fe и Pb является в большей степени определяющим фактором их подвижности, чем pH.

Долю доступных для поглощения растениями микроэлементов в почве

определяли как процентное содержание подвижных форм элементов от содержания их валовых форм. Расположение элементов по доступности соответствовало ряду (%): Cd (47.2) >> Pb (19.4) = Zn (19.3) > Cu (3.8) ≥ Fe (3.0). Установлено, что максимальная доступность в исследованных почвах характерна для Cd, минимальная – для Fe. Предыдущими исследованиями почв Татарстана (Иванов и др., 1994; Григорьян и др., 1994) было также выявлено повышенное содержание в них кадмия, что является природной геохимической особенностью региона.

3.2. Содержание биофильных элементов и тяжелых металлов в дикорастущих растениях

3.2.1. Фоновое содержание биофильных элементов и тяжелых металлов в дикорастущих растениях РТ

Содержание биофильных элементов и тяжелых металлов в растениях отражает биогеохимическую ситуацию республики. В таблице 4 приведены данные по содержанию исследуемых металлов в растениях, произраставших на различных типах почв.

Таблица 4

Содержание биофильных элементов и тяжелых металлов в растениях, произраставших на различных типах почв, мг/кг сухого веса

Почва (район, тип фитоценоза)	n	Cu	Fe	Zn	Pb	Cd	K	Ca
Светло-серая лесная (Мамадышский, ЛШ)	7	2.3±0.3	76.9±12.7	10.2±1.8	0.1±0.01	0.1±0.01	8077 ±1483	4443 ±958
Дерново-подзолистая (Зеленодольский, ЛХ, П)	33	2.9±0.2	79.6±5.9	24.5±3.3	2.6±0.4	0.1±0.01	2944 ±365	2345 ±279
Урбанозем (г. Казань, УБФ)	24	4.2±0.6	93.7±9.9	13.4±1.1	1.2±0.3	0.1±0.01	3289 ±205	6310 ±1508
Серая лесная (Верхнеуслонский, Л)	14	4.3±0.6	47.5±6.3	8.5±1.0	0.5±0.2	0.2±0.01	2328 ±348	2281 ±405
Чернозем выщелоченный (Альметьевский, Л)	12	5.3±0.6	78.4±10.9	12.4±1.2	0.5±0.1	0.1±0.01	3488 ±416	3400 ±476
Дерново-карбонатная типичная смытая (Бугульминский, Л)	8	6.7±0.9	202.9±42.0	13.5±2.9	1.0±0.2	0.1±0.01	3464 ±473	3014 ±511
Аллювиальная дерновая (Пестречинский, Л)	14	2.4±0.3	48.3±5.7	6.4±0.8	0.1±0.01	0.02±0.01	7271 ±888	3839 ±423
Дерново-подзолистая смытая (Пестречинский, ЛШ)	7	2.0±0.3	73.7±12.6	12.6±2.4	0.3±0.1	0.2±0.00	10846 ±5441	4011 ±869
Чернозем типичный (Бугульминский р-н, Л)	13	3.9±0.5	101.2±18.3	7.7±0.8	0.2±0.01	0.03±0.00	6706 ±392	4249 ±431
Светло-серая лесная (Зеленодольский р-н, Л)	27	2.8±0.3	57.1±6.0	16.4±1.7	5.6±0.4	1.1±0.1	2516 ±191	1884 ±174

Примечание. Л – луговой фитоценоз, ЛХ – лес хвойный, ЛШ – лес широколиственный, П – прогалина, УБФ – урбофитоценоз.

Как следует из полученных результатов, наибольшим содержанием Cu и Fe отличаются растения на дерново-карбонатной типичной почве в Бугульминском районе, Zn – растения на дерново-подзолистой почве в Зеленодольском районе, Pb

и Cd – растения на светло-серой лесной почве в Зеленодольском районе, К – растения на дерново-подзолистой смытой в Пестречинском районе, а Ca – растения на урбаноземах в Казани.

Расчет критерия Краскела-Уоллиса указывает на значимость различий по содержанию всех элементов между растениями, произраставших на разных типах почв ($p < 0.00001$).

В таблице 5 приведены значения выборочного среднего и медианные значения содержания изученных металлов в дикорастущих растениях.

Таблица 5

Региональное фоновое содержание биофильных элементов и тяжелых металлов в дикорастущих растениях

РТ (n=160)							
	Cu	Fe	Zn	Pb	Cd	K	Ca
Среднее выборочное							
В золе, мг/кг	61.2±3.1	1246±63	257.3±20	35.2±4.8	5.5±0.9	59938±2430	46443±2499
В сухом веществе, мг/кг	3.6±0.2	79.7±4.4	14.4±0.9	2.0±0.1	0.3±0.01	4192±237	3416±274
Медиана							
В золе, мг/кг	55.9	1013	161.1	9.7	1.1	51013	41169
В сухом веществе, мг/кг	3.0	63.5	10.8	0.7	0.1	3317	2759
Западное Предкамье (n=113)							
	Cu	Fe	Zn	Pb	Cd	K	Ca
Среднее выборочное							
В золе, мг/кг	58.5±3.6	1175±65	284±24	42.8±5.9	6.9±1.24	58096±2816	46283±3023
В сухом веществе, мг/кг	3.1±0.2	69.8±3.4	15.3±1.1	2.2±0.3	0.4±0.04	4047±283	3358±338
Медиана							
В золе, мг/кг	48.5	988	178	16.0	1.1	49086	39302
В сухом веществе, мг/кг	2.6	62.5	12.6	1.2	0.1	3307	2526
Восточное Закамье (n=33)							
	Cu	Fe	Zn	Pb	Cd	K	Ca
Среднее выборочное							
В золе, мг/кг	71.8±5.3	1520±169	154±15.1	7.1±1.1	1.0±0.1	67026±4489	47058±3460
В сухом веществе, мг/кг	5.1±0.4	117.6±15.3	10.8±0.9	0.5±0.04	0.1±0.01	4750±366	3641±279
Медиана							
В золе, мг/кг	75.4	1321	138	4.5	0.9	62208	48112
В сухом веществе, мг/кг	5.4	83.8	9.8	0.3	0.1	4757	3632

Показано, что для большей части элементов региональный фон ниже, либо существенно не превышает среднего уровня содержания элементов в наземной

растительности мира (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Ильин, 1991; Добровольский, 2003; Лархер, 1978). Zn и Cu в растениях большинства исследованных площадок содержатся в недостаточном или дефицитном количестве. Региональный фон Fe близок к нижней границе среднепланетарных значений (Добровольский, 1983; Ильин, 1991; Битюцкий, 2005). Фоновое содержание K и Ca оказалось ниже среднепланетарных значений, содержание Pb и Cd соответствует им.

Полученные данные по концентрации Cu в растениях Закамья согласуются с литературными данными по содержанию Cu в растительности Закамья РТ (Валеева, 2004; Иванова, 2008), но по содержанию Zn, Pb и Cd оказались ниже. Содержание Pb и Cd в растениях Закамья согласуется с данными Р.Г. Ильязова (2006), а содержание Pb в растениях Предкамья – с данными Д.В. Иванова (1997).

Региональный фон Cu, Fe, K и Ca в растениях Закамья выше, чем в растениях Предкамья, а содержание Zn, Pb и Cd ниже вследствие повышенного содержания биофильных элементов в почве Закамья при сравнении с почвами Предкамья.

3.2.2. Межвидовые особенности содержания биофильных элементов и тяжелых металлов в дикорастущих растениях

Отражением физиологических процессов, протекающих в растительном организме, является наличие определенных взаимосвязей в аккумуляции различных элементов между собой. Корреляционный анализ данных по содержанию металлов в дикорастущих растениях выявил антагонизм между содержанием K и Ca, с одной стороны, и Pb и Cd, с другой (табл. 6).

Ca, наряду с P и Mg – главный антагонистический элемент в отношении поглощения многих микроэлементов (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989), существенно снижающий поглощение Cd корнями разных видов растений (Jarvis et al., 1976; Kawasaki, Moritsugu, 1987; Jensen, 1997). Pb и Cd в большинстве случаев также тормозят поглощение как катионов, так и анионов (Серегин, Иванов, 2001). Корреляционный анализ показал наличие синергических взаимодействий в растениях между различными элементами – Cu и Fe, Cu и Zn, Zn и Pb, Pb и Cd. При комбинированном действии Cd и Pb чаще наблюдается синергизм и редко антагонизм (Серегин, Иванов, 2001).

Таблица 6

Коэффициенты корреляции (r) между содержанием элементов в дикорастущих растениях (n=160)

	Cu	Fe	Zn	Pb	Cd	K	Ca
Cu		0.51	0.23	-0.10	-0.04	0.00	0.21
Fe	0.51		0.07	-0.11	-0.15	0.08	0.21
Zn	0.23	0.07		0.25	0.16	-0.03	0.04
Pb	-0.10	-0.11	0.25		0.45	-0.27	-0.07
Cd	-0.04	-0.15	0.16	0.45		-0.18	-0.20
K	0.00	0.08	-0.03	-0.27	-0.18		0.19
Ca	0.21	0.21	0.04	-0.07	-0.20	0.19	

Примечание. Выделенные жирным шрифтом коэффициенты корреляции значимы при $p < 0.05$.

Известно, что на аккумуляцию химических элементов растениями влияет целый комплекс факторов (Ильин, 1985, 1991). Важнейшие среди них – видовые особенности растений (Шильников, 1994; Cheng, 2003; Eriksson, 1990). Сравнительный анализ данных по содержанию элементов в растениях указывает на

значительную вариабельность этого показателя в различных видах растений. Концентрация Cu в растениях разных видов отличается в 31 раз, Fe – в 28 раз, Zn – в 62 раза, Pb в 1659 раз, Cd – в 1764 раза, K – в 21 раз, Ca – в 380 раз (табл. 7). Значительная вариабельность содержания металлов прослеживается и в пределах одной пробной площадки: в растениях некоторых площадок коэффициент вариации (C_v) содержания Cu достигает 75%, Fe и Zn – 65%, Pb – 147%, Cd – 195%, K – 63%, Ca – 98%. Следовательно, накопление элемента в растениях разных видов зависит от специфики протекающих в растительном организме биохимических процессов, позволяющих регулировать его количество даже при одинаковой концентрации в почве. Неодинаковое накопление элементов является результатом избирательного их поглощения растениями, количественной характеристикой которого является величина КБП.

Таблица 7

Минимальные и максимальные значения содержания биофильных элементов и тяжелых металлов в дикорастущих растениях

Элемент	Содержание, мг/кг сухого веса		Вид	Район	№ ПП
	min	max			
Cu	min	0.39±0.01	Полевица тонкая (<i>Agrostis tenuis</i>)	Зеленодольский	2
	max	12.12±0.01	Полынь обыкновенная (<i>Artemisia vulgaris</i>)	г. Казань	11
Fe	min	16.05±0.01	Щавель конский (<i>Rumex confertus</i>)	Пестречинский	12
	max	456±0.05	Тимьян ползучий (<i>Thymus serpyllum</i>)	Бугульминский	10
Zn	min	1.82±0.03	Щавель конский (<i>Rumex confertus</i>)	Пестречинский	12
	max	113±0.08	Чистотел большой (<i>Chelidonium majus</i>)	Зеленодольский	6
Pb	min	0.02±0.01	Синяк обыкновенный (<i>Echium vulgare</i>)	Пестречинский	12
	max	33.17±0.01	Вьюнок полевой (<i>Convolvulus arvensis</i>)	Зеленодольский	1
Cd	min	0.003±0.001	Цикорий обыкновенный (<i>Cichorium intybus</i>)	г. Казань	7
	max	4.41±0.08	Вьюнок полевой (<i>Convolvulus arvensis</i>)	Зеленодольский	1
K	min	736±0.05	Брусника (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>)	Зеленодольский	4
	max	15493±0.02	Щитовник мужской (<i>Dryopteris filix-mas</i>)	Мамадышский	15
Ca	min	98.91±0.02	Вейник наземный (<i>Calamagrostis epigeios</i>)	Зеленодольский	1
	max	37571±0.07	Лопух паутинистый (<i>Arctium tomentosum</i>)	г. Казань	7

В соответствии с классификацией А.И. Перельмана (1975) при КБП>1 элементы накапливаются в растениях, а при КБП<1 только захватываются. Следовательно, растения с КБП>1 можно отнести к концентраторам, а с КБП<1 – деконцентраторам. По величине КБП исследуемые элементы можно расположить в следующем порядке: Zn (32.5) > Cu (22.3) > Cd (20.5) > Pb (9.9) > Fe (0.4). В

соответствии со шкалой И.А. Авессаломовой (1987) к элементам энергичного накопления ($КБП > 10$) относятся Zn, Cu, Cd, к элементам сильного накопления ($10 > КБП \geq 1$) – Pb, к элементам слабого накопления и слабого захвата ($1 > КБП \geq 0.1$) – Fe.

Виды с $КБП > 100$ были отнесены к интенсивным концентраторам элементов. Интенсивными концентраторами Cu являются черника, брусника, костяника, земляника; деконцентраторами – вейник наземный, хвощ лесной, копытень европейский. Концентраторы Zn – земляника лесная, брусника, вейник лесной; деконцентраторы Zn не обнаружены. Концентраторы Pb – зверобой продырявленный, вьюнок полевой, земляника лесная; деконцентраторы – цикорий обыкновенный, трехреберник непахучий, синяк обыкновенный и др. Концентраторы Cd – тысячелистник обыкновенный, ландыш майский, зверобой продырявленный; деконцентраторы – бедренец камнеломка, лопух паутинистый, марь белая. Интенсивных концентраторов Fe среди исследованных растений не обнаружено – 85% проб растений относятся к деконцентраторам. Возможно, это обусловлено преобладанием в почве труднодоступных форм железа для растений.

Обнаружить влияние внешних факторов на содержание металлов в растениях позволило сравнение концентраций металлов в растениях видов, встречающихся в нескольких биотопах. Среди 90 исследуемых видов растений 42 вида встречались на разных пробных площадках. Содержание некоторых металлов в растениях одних и тех же видов, произраставших на нескольких площадках, значительно отличалось, в то время как в растениях других видов оставалось практически одинаковым. Например, содержание Pb в растениях вьюнка полевого (*Convolvulus arvensis*) на разных пробных площадках отличалось в 369 раз, а в растениях земляники зеленой (*Fragaria viridis*), трехреберника продырявленного (*Tripleurospermum perforatum*) и копытня европейского (*Asarum europaeum*), также произраставших на нескольких пробных площадках, значительно не различалось. Содержание Cd в растениях вьюнка полевого (*Convolvulus arvensis*) различалось в 882 раза, а в растениях трехреберника продырявленного (*Tripleurospermum perforatum*), пролесника многолетнего (*Mercurialis perennis*), иван-чая узколистного (*Chamerion angustifolium*), зверобоя продырявленного (*Hypericum perforatum*), вероники широколистной (*Veronica teucrium*), таволги обыкновенной (*Filipendula vulgaris*), свербиги восточной (*Bunias orientalis*), подмаренника душистого (*Galium odoratum*) оставалось одинаковым.

Следует отметить, что трехреберник продырявленный (*Tripleurospermum perforatum*) и подмаренник душистый (*Galium odoratum*) на всех пробных площадках по содержанию всех элементов за исключением Fe и K для трехреберника (*Tripleurospermum perforatum*) и Pb – для подмаренника (*Galium odoratum*), практически не отличались.

Такое значительное варьирование уровней содержания металлов в растениях одного вида свидетельствует о влиянии на процесс аккумуляции не только биологических особенностей, но и внешних факторов, в том числе эдафических, которые будут рассмотрены ниже.

3.2.3. Оценка экологической безопасности дикорастущих растений по содержанию в них тяжелых металлов

Содержание тяжелых металлов в дикорастущих растениях, как источнике лекарственного растительного сырья, является важнейшим показателем

биологического и гигиенического качества растений. Для оценки безопасности дикорастущих растений для здоровья человека данные по концентрации тяжелых металлов сравнивали со значениями ПДК нормируемых элементов: Pb (6 мг/кг) и Cd (1 мг/кг) (СанПин 2.3.2.1078-01). При этом было обнаружено превышение уровней ПДК Pb и Cd в некоторых растениях Зеленодольского района. Значительное превышение ПДК Pb обнаружено в растениях вьюнка полевого (*Convolvulus arvensis*) (33.2 мг/кг) – в 5.5 раза. В растениях нивяника обыкновенного (*Leucanthemum ircutianum*) (12.0 мг/кг), зверобоя продырявленного (*Hypericum perforatum*) (12.7 мг/кг) и лапчатки серебристой (*Potentilla argentea*) (12.6 мг/кг) превышение ПДК Pb составило в 2 раза, в растениях вейника наземного (*Calamagrostis epigeios*) (18.5 мг/кг) – в 3.1 раз (ПП №1). В растениях площадки №2 в Зеленодольском районе обнаружено превышение ПДК Pb в растениях земляники лесной (*Fragaria vesca*) (11.5 мг/кг) в 1.9 раз. Обнаружено превышение ПДК Pb в 1.2 раза в растениях линнеи северной (*Linnaea borealis*) (7.4 мг/кг), произраставших на ПП №3 в хвойном лесу в Зеленодольском районе.

Содержание Cd в некоторых растениях Зеленодольского района также превышало ПДК. В растениях мать-и-мачехи обыкновенной (*Tussilago farfara*) и крестовника Якова (*Senecio jacobaea*) содержание Cd было выше ПДК в 1.3 раз, в растениях бедренец-камнеломки (*Pimpinella saxifraga*), льнянки (*Linaria vulgaris*), подмаренника мягкого (*Galium mollugo*) в 1.2, 1.5 и 1.6 раза, соответственно. В растениях полевицы (*Agrostis tenuis*) концентрация Cd превышала ПДК в 2.3 раза, в растениях земляники лесной и вьюнка в 4.1 и 4.4 раза соответственно. В растениях прогалины в хвойном лесу превышение концентраций Cd выявлено в растениях тысячелистника (*Achillea millefolium*) и ландыша (*Convallaria majalis*) в 1.3 и в 2.0 раза.

Во всех вышеперечисленных видах растений обнаружено также значительное превышение МДУ Pb (5 мг/кг) и Cd (0,3 мг/кг) в кормах: до 6.6 раз свинца и до 14.6 раз кадмия (СанПин 2.1.7.573-96).

Концентрация Pb и Cd в растениях остальных исследованных площадок, в том числе в урбофитоценозах, оказалась значительно ниже ПДК в пищевых продуктах и МДУ в кормах. Высокие уровни содержания Pb и Cd в растениях Зеленодольского района могут быть обусловлены повышенным региональным фоном Pb и Cd в почвах Предкамья (Иванов и др., 1994; Григорьян и др., 1994). Кроме того, они могут свидетельствовать и об аэротехногенном поступлении этих металлов. Господствующими направлениями ветра в регионе являются южное и юго-западное, в летний период увеличивается повторяемость западных и северо-западных ветров (Климат ..., 1983). Местоположение пробных площадок в Зеленодольском районе попадает под воздействие выбросов крупных предприятий г. Зеленодольска, а при смене направления ветра - предприятий г. Казани. В частности, работами А.Р. Валетдинова с соавторами (2007, 2008) выявлен повышенный уровень загрязнения тяжелыми металлами снежного покрова указанных территорий.

Несмотря на повышенное содержание как валовых, так и подвижных форм Cu, Zn и Pb в почвах урбофитоценозов, содержание этих элементов в растениях не превышает фоновых. В условиях нейтрального рН почвенного раствора растворимость большинства ионов металлов ограничена вследствие их седиментации или в результате связывания с оксидами, гидроксидами, карбонатами или фосфатами, глинистыми минералами или органическим веществом

(Markiewicz-Patkowska, 2005). Таким образом, отсутствие превышения ПДК металлов в растениях урбофитоценозов может быть обусловлено слабощелочной реакцией их почв, наличием карбонатов, и, следовательно, слабой подвижностью микроэлементов.

В целом региональное фоновое содержание нормируемых элементов в дикорастущих растениях не превышает ПДК в продуктах питания и МДУ в кормах. По результатам наших исследований экологически безопасными по содержанию тяжелых металлов Pb и Cd являются исследованные дикорастущие растения в Верхнеуслонском, Пестречинском, Мамадышском, Бугульминском и Альметьевском районах.

3.2.4. Аккумуляция биофильных элементов и тяжелых металлов в различных органах дикорастущих растений

В растениях имеется корневой барьер, препятствующий транслокации тяжелых металлов в надземные органы (Ягодин, Говорина, 1995; Ramos et al., 2002). Для обнаружения наличия корневого барьера в исследуемых растениях был рассчитан коэффициент корневого барьера $K_{кб}$ (Плеханова, 2007). Значения данного коэффициента выше единицы указывают на наличие корневого барьера при поглощении элементов растениями. В наших исследованиях мы получили противоречивые результаты. Единственный элемент, для поступления которого характерен барьерный тип, это Fe. Аккумуляция его в корнях наблюдалась у 81 % исследованных растений. Около половины исследованных растений (49 %) аккумулялировали Cu в надземных органах. Zn накапливался в надземной части у 62 % растений, Pb и Cd – у 48 % и 41 % растений. К и Ca преимущественно накапливались также в надземных органах – у 92 % и 78 % растений соответственно. Данные, описывающие преимущественное накопление биофильных элементов в надземных частях растения встречаются и в литературе (Дибирова, Ахмедова, 2005; Стрекалова, 2007; Денисова, 2006).

Отсутствие корневого барьера при поглощении Cu и Zn большинством исследованных растений, возможно, связано с недостаточным содержанием этих элементов в почве.

В связи с тем, что у некоторых лекарственных растений терапевтическим эффектом обладают только определенные органы, в работе исследовалось распределение элементов по органам растений. На рисунках 1–3 приведены данные по содержанию элементов в различных органах растений, из которых видно, что наибольшим содержанием Cu, Zn, Pb и Cd отличаются генеративные органы большинства изученных растений, Fe – корни. Стебли выполняют функции проводящих путей, поэтому в них происходит наименьшее накопление микроэлементов. Аккумуляция Zn в генеративных органах обусловлена тем, что Zn играет важную роль в формировании генеративных органов и плодоношении (Школьник, 1974). К преимущественно аккумулялируется в цветах и листьях, Ca - в листьях.

Дикорастущие растения были отобраны с пробных площадок в трех регионах, различающихся по уровню техногенной нагрузки (техногенная нагрузка оценивалась по «Карте экологической ситуации РТ» (1994) и по «Карте предрасположенности территории РТ к проявлению неблагоприятных ситуаций» (2002)): в пригородной зоне Казани и Зеленодольска (Казанско-Зеленодольский промышленный регион), на территории Восточного Закамья (нефтедобывающей

регион) и на территориях, значительно удаленных от воздействия промышленных выбросов (фон).

Распределение всех элементов, за исключением Pb и Cd, по органам в растениях регионов с различной техногенной нагрузкой значительно не отличается. Следует отметить, что в растениях фоновых территорий содержание Pb и Cd в корнях превышает содержание этих элементов в генеративных органах. Pb и Cd в условиях Казанско-Зеленодольского промышленного и нефтедобывающего регионов аккумулируются преимущественно в генеративных органах. Возможно, такое распределение Pb и Cd по органам растений в пригородной зоне промышленного региона обусловлено аэральным их поступлением.

Расчет критерия Краскела-Уоллиса указывает на значимость различий по содержанию всех элементов ($p < 0.0001$) между органами дикорастущих растений за исключением Cd.

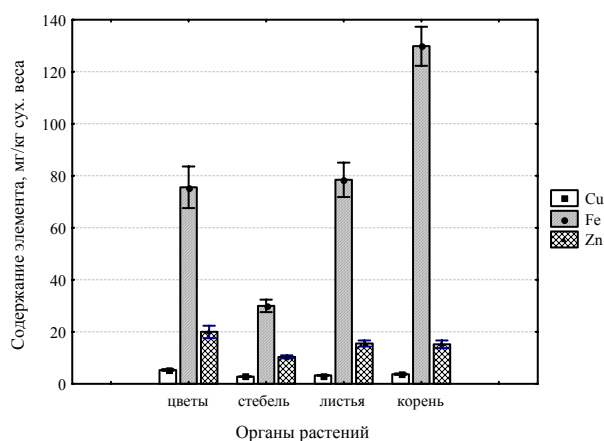


Рис. 1. Распределение микроэлементов по органам дикорастущих растений, мг/кг сухого веса

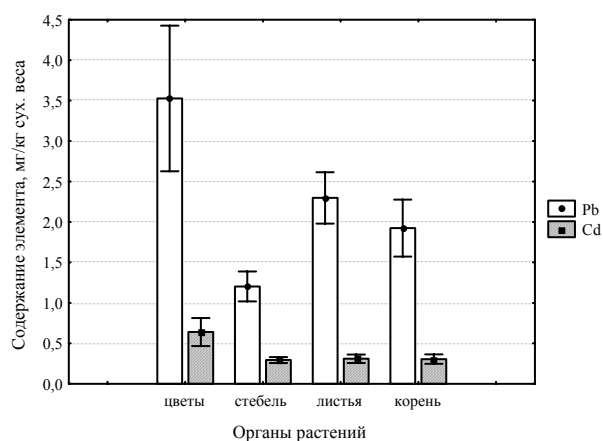


Рис. 2. Распределение Pb и Cd по органам дикорастущих растений, мг/кг сухого веса

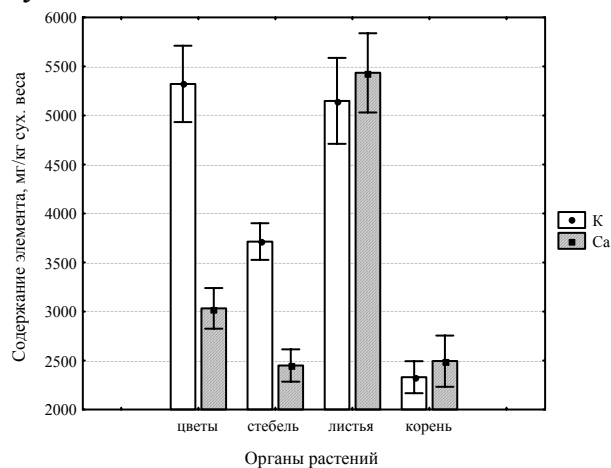


Рис. 3. Распределение макроэлементов по органам дикорастущих растений, мг/кг сухого веса

3.2.5. Эдафические и фитоценотические факторы накопления биофильных элементов и тяжелых металлов дикорастущими растениями

Одним из факторов, определяющих характер аккумуляции металлов растениями, является содержание их подвижных форм в почве. Однако некоторыми авторами обнаружено, что содержание микроэлементов в растениях не зависит от содержания их подвижных форм в почве (Шихова, 1997; Старова, 1998, 2003;

Валеева, 2004) или связь их не проявляется при статистическом анализе.

Корреляционный анализ данных по содержанию металлов в растениях и почвах показал наличие значимой положительной зависимости между содержанием Zn, Pb, Cd, K и Ca в растениях и содержанием подвижных форм этих элементов в почве (табл. 8). Между содержанием Zn, Pb и Cd в растении и содержанием в почве K и Ca обнаружена значимая отрицательная связь. В главе 3.2.2 (табл. 6) было показано наличие антагонизма между содержанием в растениях K и Ca с одной стороны, и Pb и Cd, с другой. Следовательно, повышенное содержание K в почве также как и Ca оказывает ингибирующее влияние на транслокацию в растения некоторых металлов, и, что особенно важно, опасных токсикантов – Pb и Cd.

Выявленная нами особенность почвенного K снижать поступление микроэлементов в растения подтверждается некоторыми литературными данными, согласно которым повышенное содержание K в среде приводит к снижению коэффициентов накопления Cu, Zn и Cd (Суслина, Анисимова и др., 2006), а также к снижению поступления Pb в растения (Chen, 2007).

Таблица 8

Коэффициенты корреляции (r_s) между содержанием биофильных элементов и тяжелых металлов в растениях и концентрацией их подвижных форм в почве (n=160)

		Содержание подвижных форм элементов в почве						
		Cu	Fe	Zn	Pb	Cd	K	Ca
Содержание элементов в растениях	Cu	0.03	-0.31	-0.16	-0.05	0.01	0.10	0.18
	Fe	-0.05	-0.09	-0.18	0.04	-0.19	0.01	0.14
	Zn	0.03	0.29	0.24	0.37	0.08	-0.40	-0.40
	Pb	-0.21	0.37	0.33	0.63	0.12	-0.68	-0.61
	Cd	-0.31	0.11	0.43	0.32	0.71	-0.37	-0.53
	K	-0.003	-0.21	-0.28	-0.46	-0.14	0.40	0.47
	Ca	0.18	-0.27	-0.19	-0.18	-0.15	0.22	0.32

Примечание. Выделенные жирным шрифтом коэффициенты корреляции значимы при $p < 0.05$.

Выявлена значимая ($p < 0.05$) отрицательная корреляция между содержанием в почве гумуса и содержанием Zn ($r_s = -0.71$) и Pb ($r_s = -0.65$) в растениях. Коэффициент корреляции между величиной pH и содержанием элементов в растениях также указывает на наличие значимой ($p < 0.05$) отрицательной зависимости между этими показателями для Zn, Pb, Cd, но менее выраженной ($r_s = -0.27$, $r_s = -0.31$, $r_s = -0.35$ соответственно). Обнаруженные особенности подтверждают вышеописанные закономерности о преимущественном влиянии органического вещества на подвижность Pb в почве, и, соответственно, на доступность его растениям.

Интенсивность поступления химических элементов в растения из почвы отражают коэффициенты накопления. По величине коэффициента накопления растениями биофильные элементы и тяжелые металлы можно расположить в ряд: K (144.1) > Cu (124.9) > Zn (34.7) > Fe (22.4) > Ca (6.7) > Pb = Cd (2.6).

Величины коэффициентов накопления (КН) Cu изменялись в диапазоне от 0.3 для свербиги восточной (*Bunias orientalis*) до 940.0 для бодяка щетинистого (*Cirsium setosum*); КН Fe – от 0.2 для ландыша майского (*Convallaria majalis*) до 668.7 для тимьяна ползучего (*Thymus serpyllum*); КН Zn – от 0.5 для свербиги восточной (*Bunias orientalis*) до 390.4 для цикория обыкновенного (*Cichorium intybus*); КН Pb – от 0.01 для цикория обыкновенного (*Cichorium intybus*) и

трехреберника продырявленного (*Tripleurospermum perforatum*) до 16.2 для вьюнка полевого (*Convolvulus arvensis*); КН Cd – от 0.06 для цикория обыкновенного (*Cichorium intybus*) до 81.5 для ландыша майского (*Convallaria majalis*); КН К – от 5.7 для ковыля перистого (*Stippa pennata*) до 2864 для люпина многолистного (*Lupinus polyphyllus*); КН Са – от 0.03 для ежи сборной (*Dactylis glomerata*) до 79.4 для черноголовки обыкновенной (*Prunella vulgaris*).

Луговые растения отличаются интенсивным накоплением Cu, Fe и Zn, растения хвойных лесов – Pb, а растения прогалины – Cd, K и Ca. Наименьшая интенсивность аккумуляции Cu, Zn, Pb, Cd и K характерна для растений урбофитоценозов.

Высокая вариабельность коэффициентов накопления свидетельствует об изменчивости почвенных условий произрастания растений. Различие между величинами КН биофильных элементов и тяжелых металлов более чем на порядок указывает на предпочтительное поглощение жизненно необходимых элементов по сравнению с токсикантами. Таким образом, наиболее высокая степень накопления в растительности свойственна элементам с низким региональным фоном. В условиях малого содержания элемента в почве, растение поглощает все имеющееся количество доступных для него форм этого элемента (Ивлев, 1986).

Анализ средневидовых величин содержания элементов в растениях различных типов фитоценозов показал, что наименьшими концентрациями Cu и Pb отличаются растения широколиственных лесов. Растения этих же биотопов характеризуются и высоким содержанием К. Следует отметить также, что растениям широколиственного леса свойственно высокое значение зольности – 13.2 %. Самые низкие значения зольности наблюдаются в растениях хвойного леса – 4.5 %. Эти особенности подтверждаются литературными данными (Перельман, 1975). Растения урбофитоценозов отличаются более высоким содержанием Cu, Fe и Ca, а также занимают второе место по зольности – 8.5 %. Для растений, произраставших в луговых фитоценозах, характерно повышенное содержание Cu. Наибольшее содержание Zn обнаружено в растениях прогалины в хвойном лесу, а Pb – в растениях луговых фитоценозов в Зеленодольском районе.

3.2.6. Аккумуляция биофильных элементов и тяжелых металлов дикорастущими растениями в зависимости от типов адаптивных стратегий

Известно, что в зависимости от условий и адаптивных способностей растений изменяется их химический состав. В связи с этим мы предположили, что содержание химических элементов в растениях определенным образом связано с их типами стратегий адаптации. За основу была выбрана классификация типов адаптивных стратегий растений Раменского-Грайма.

Среди исследованных дикорастущих растений были выявлены следующие типы адаптивных стратегий: С – конкурентный; R – рудеральный; S – стресс-толерантный; CR – тип стратегии с сочетанием свойств конкурентности и рудеральности; CS – тип стратегии с сочетанием свойств конкурентности и стресс-толерантности; CSR – тип стратегии с сочетанием свойств первичных типов стратегий. Преобладающим типом стратегии является конкурентный тип (n=54), второе место занимают виды со стратегией CSR (n=32) и третье – виды со стратегией CS (n=24).

Расчет критерия Краскела-Уоллиса показал значимость различий по содержанию металлов между растениями разных типов адаптивных стратегий

только для Zn ($p=0.02$). Следовательно, об особенностях аккумуляции остальных элементов растениями различных типов адаптивных стратегий можно говорить лишь как о тенденции. Одним из критериев дифференциации растений по типам адаптивных стратегий является перераспределение материально-энергетических ресурсов между процессами воспроизведения и поддержанием активности воспроизводящей особи (Усманов и др., 2001). Zn играет важную роль в формировании генеративных органов и плодоношении растений (Школьник, 1974), а также имеет прямое влияние на процессы роста (Чернавина, 1970), следовательно, растения различных типов адаптивных стратегий проявляют избирательность в накоплении этого элемента.

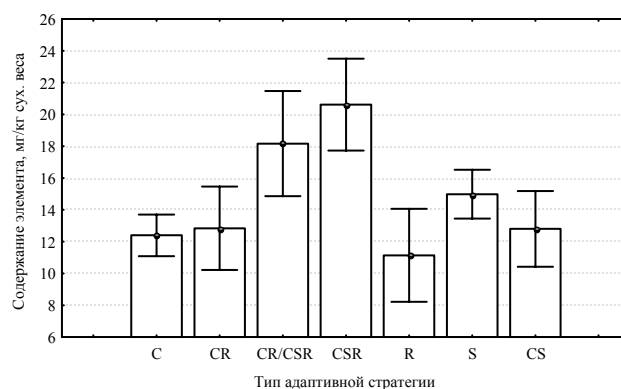


Рис. 4. Содержание Zn в растениях различных типов адаптивных стратегий, мг/кг сухого веса

Большее содержание Cu, Zn, Pb свойственно для растений с типами стратегий CR/CSR и CSR, Cd – для CR, а K и Ca – для S. Растения стресс-толеранты отличаются высоким значением зольности. В литературе (Пьянков и др., 2001б; Юмагулова, 2007) имеются сведения о том, что в ряду $S \rightarrow R \rightarrow C$ уменьшается показатель зольности, а в ряду $R \rightarrow C \rightarrow S$ увеличивается содержание микроэлементов и уменьшается количество растворимых сахаров. При исключении промежуточных типов стратегий по показателю зольности наши данные совпадают с литературными (Пьянков и др., 2001б; Юмагулова, 2007): S (9.3%) \rightarrow R (7.7%) \rightarrow C (7.1%), а по металлам тенденция прослеживается для Cu, Zn, Pb и Ca:

Cu, мг/кг: R (3.0) \rightarrow C (3.4) \rightarrow S (3.6); Zn, мг/кг: R (11.1) \rightarrow C (12.4) \rightarrow S (15.0);
Pb, мг/кг: R (0.4) \rightarrow C (1.4) \rightarrow S (1.6); Ca, мг/кг: R (2711) \rightarrow C (3775) \rightarrow S (4844).

Таким образом, несмотря на то, что продуктивность стресс-толерантов, по Грайму (Grime, 1974; Grime, 2001), ограничена вследствие низкой скорости роста из-за обитания в условиях стресса, доля участия зольных элементов в создании органического вещества у них выше, чем у конкурентов.

Растения промежуточных типов стратегий проявили тенденцию к более интенсивной аккумуляции некоторых элементов. Известно (Миркин, 2005), что в многовидовых сообществах, характеризующихся высокой фитоценотической сомкнутостью, растения занимают более узкое положение на оси эдафического фактора. Выше было отмечено, что исследованные экосистемы характеризуются преобладанием видов растений с конкурентным типом стратегии. В этих условиях виды с высокой способностью к дифференциации ниш, к которым можно отнести виды со стратегиями CR, CR/CSR, CSR, начинают более интенсивно использовать оставшиеся на их долю ресурсы, и, соответственно, интенсивнее накапливать химические элементы.

Поскольку влажность почвы является одним из факторов, обеспечивающих

поступление химических элементов из почвы в растения, в работе изучалось содержание элементов в растениях с различной способностью регулировать водный обмен. Среди исследуемых дикорастущих растений были идентифицированы следующие экологические группы: мезофиты (n=136), ксерофиты (n=18), мезогигрофиты (n=4).

Расчет критерия Краскела-Уоллиса показал значимость различий по содержанию элементов между растениями разных экологических групп только для Fe, Zn, Cd, K и Ca ($p < 0.001$).

Как следует из таблицы 9, мезогигрофиты отличаются минимальным содержанием элементов (кроме Fe), мезофиты – максимальным.

Таблица 9

Содержание металлов в растениях различных экологических групп,
мг/кг сухого веса

Экологические группы растений	Cu	Fe	Zn	Pb	Cd	K	Ca
Мезофиты (n=136)	3.6±0.2	77.8±3.9	15.1±1.0	1.9±0.2	0.4±0.01	4306±259	3630±313
Ксерофиты (n=18)	3.7±0.6	104.4±24.1	11.4±1.8	1.8±0.1	0.1±0.02	3770±636	2296±343
Мезогигрофиты (n=4)	1.9±0.4	30.4±5.4	6.3±1.8	1.6±0.4	0.01±0.01	2895±481	1897±137

Минеральные соединения переносятся главным образом с восходящим током воды. Скорость восходящего водного тока в растении связана с испаряющей деятельностью надземных органов (Жолкевич и др., 1989). Отсюда можно предположить, что растения с повышенным уровнем транспирации накапливают элементы в большем количестве. Согласно нашим данным эта закономерность прослеживается для мезофитов, отличающихся большей интенсивностью транспирации при сравнении с ксерофитами. Мезогигрофиты, характеризующиеся максимальной интенсивностью транспирации по сравнению с остальными группами растений, отличаются меньшим содержанием элементов. Это может быть связано как с недостатком их численности, особенностями эдафических условий, т.е. уровнем увлажнения в момент сбора растений, а также биологическими особенностями видов-мезогигрофитов. К мезогигрофитам были отнесены черника (*Vaccinium myrtillus*) и щавель конский (*Rumex confertus*). Черника на всех пробных площадках отличалась минимальным содержанием элементов по сравнению с остальными видами на этих же пробных площадках. А щавель конский – вид, для которого свойственно минимальное содержание Fe и Zn, а также низкое содержание остальных элементов. Таким образом, в условиях малой выборки группы мезогигрофитов низкое содержание элементов в них обусловлено скорее биологическими особенностями видов.

ВЫВОДЫ

1. Фоновые концентрации большинства металлов в дикорастущих растениях РТ ниже среднего уровня содержания элементов в наземной растительности мира. Региональный фон нормируемых элементов значительно ниже ПДК в пищевых продуктах и МДУ в кормах. По фоновому содержанию металлов в растениях построен следующий ряд (мг/кг сухого веса): K (3317) > Ca (2759) > Fe (63.5) > Zn (10.8) > Cu (3.0) > Pb (0.7) > Cd (0.1).

2. Изученные виды травянистых растений обладают различной способностью накапливать отдельные микроэлементы. Преобладающая часть исследованных растений является концентраторами Cu, Zn, Pb и Cd (КБП>1) и деконцентраторами

Fe (КБП<1). Интенсивными концентраторами Cu, Fe и Cd являются черника и брусника, Cu, Fe и Zn – костяника, Pb – брусника.

3. В дикорастущих лекарственных растениях локального участка в Зеленодольском районе РТ повышено содержание нормируемых элементов. Интенсивно аккумулирующими Pb (2.0-5.5 ПДК) видами являются нивяник иркутский, зверобой продырявленный, лапчатка серебристая, вейник наземный, вьюнок полевой. Накопителями Cd (1.3-4.4 ПДК) являются мать-и-мачеха обыкновенная, льнянка обыкновенная, подмаренник мягкий, полевица тонкая, земляника лесная, вьюнок полевой.

4. Органоспецифичность Pb и Cd зависит от уровня техногенной нагрузки на территорию: при ее отсутствии Pb и Cd накапливаются в корневой системе, в условиях техногенной нагрузки – в генеративных органах. Fe отличается акропетальным распределением, Cu и Zn преимущественно накапливаются в генеративных органах, K – в генеративных органах и листьях, Ca – в листьях.

5. Специфичность аккумуляции металлов дикорастущими растениями определяется фитоценотическими условиями произрастания: растения широколиственных лесов преимущественно накапливают K, луговые растения – Cu, растения прогалины в лесу – Zn, растения урбофитоценозов – Cu, Fe, Ca.

6. Исследованные почвы отличаются низкой обеспеченностью подвижными формами Cu и Zn. Содержание Zn, Pb, Cd, K, Ca в растениях положительно коррелирует с содержанием их подвижных форм в почве. С увеличением содержания в почве K и Ca, органического вещества и понижением кислотности почвы снижается доступность Zn, Pb и Cd для растений.

7. Содержание Zn в растениях сопряжено с типом их адаптивной стратегии по Раменскому-Грайму. Растения промежуточных типов стратегий склонны к более интенсивной аккумуляции Zn, Cu, Pb, Cd. Содержание Zn, Cd, K, Ca в растениях снижается в ряду: мезофиты → ксерофиты → мезогигрофиты, Fe – в ряду ксерофиты → мезофиты → мезогигрофиты.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сибгатуллина, М.Ш. Особенности транслокации тяжелых металлов в растения в зависимости от типа экологической стратегии [Текст] / М.Ш. Сибгатуллина // Материалы XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов". – М.: СП "Мысль", 2007. – Том I. – С. 163.

2. Сибгатуллина, М.Ш. Оценка загруженности поллютантами лекарственных растений в пригородной зоне г. Казани [Текст] / М.Ш. Сибгатуллина, А.А. Зялалов // Материалы 7-й Международной научной конференции "Сахаровские чтения 2007 года: экологические проблемы XXI века". – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2007. – С. 109.

3. Сибгатуллина, М.Ш. Стратегии адаптации ряда лекарственных растений Республики Татарстан [Текст] / М.Ш. Сибгатуллина // Материалы всероссийской научно-технической конференции "Автотранспортный комплекс - проблемы и перспективы, экологическая безопасность". – Пермь: Изд-во Перм. гос.-тех. ун-та, 2007. – С. 368-371.

4. Сибгатуллина, М.Ш. Видовые особенности и эдафические факторы накопления тяжелых металлов лекарственными растениями пригородной зоны г. Казани [Текст] / М.Ш. Сибгатуллина, А.А. Зялалов // Сборник трудов первого

международного экологического конгресса (третьей международной научно-технической конференции) "Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2007». – Тольятти, 2007. – Том 1.– С. 395-400.

5. Сибгатуллина, М.Ш. Предварительная оценка состояния загруженности тяжелыми металлами лекарственных растений Татарстана [Текст] / М.Ш. Сибгатуллина, А.А. Зялалов // Тезисы докладов VII республиканской научной конференции «Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан». – Казань: Отечество, 2007. – С. 184-185.

6. Сибгатуллина, М.Ш. Содержание тяжелых металлов в лекарственных растениях лесных фитоценозов Республики Татарстан [Текст] / М.Ш. Сибгатуллина, А.А. Зялалов // Материалы IV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Экология и научно-технический прогресс». – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007 г. – С. 121-124.

7. Сибгатуллина, М.Ш. Тяжелые металлы в дикорастущих растениях пригорода Казани [Текст] / М.Ш. Сибгатуллина, А.А. Зялалов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Современные вопросы природопользования: агропромышленный комплекс и лесное хозяйство». – Казань: Изд-во КазГАУ, 2008. – С. 153-156.

8. Сибгатуллина, М.Ш. Факторы и характер аккумуляции металлов-поллютантов лекарственными растениями [Электронный ресурс] / М.Ш. Сибгатуллина // Материалы докладов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». – М.: Изд-во МГУ; СП МЫСЛЬ, 2008. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. - Систем. требования: ПК с процессором 486 +; Windows 95; дисковод CD-ROM; Adobe Acrobat Reader. [Адрес ресурса в сети интернет: [http://www.lomonosov-msu.ru/2008/.](http://www.lomonosov-msu.ru/2008/)]

9. Сибгатуллина, М.Ш. Экологическая безопасность лекарственных растений РТ [Текст] / М.Ш. Сибгатуллина, А.А. Зялалов // Материалы второй международной научно-практической конференции «Проблемы биологии, экологии, географии, образования: история и современность». – СПб.: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 2008 – С. 225-227.

10. Сибгатуллина, М.Ш. Разнообразие лекарственных растений Татарстана и их экологическая безопасность [Текст] / М.Ш. Сибгатуллина, А.А. Зялалов // Биология: традиции и инновации в XXI веке: Материалы I Всероссийского конгресса студентов и аспирантов-биологов «Симбиоз Россия-2008» с международным участием. – Казань: Изд-во КГУ, 2008. – С. 121-126.

11. Сибгатуллина, М.Ш. Опыт классификации растений Татарстана по адаптивным стратегиям и оценка их сродства к тяжелым металлам [Текст] / М.Ш. Сибгатуллина // Материалы конф. молодых ученых «Биосфера Земли: прошлое, настоящее, будущее» ИЭРиЖ УрО РАН. – Екатеринбург: Изд-во «Гощицкий», 2008. – С. 270-271.

12. Сибгатуллина, М.Ш. Аккумуляция металлов дикорастущими луговыми растениями различных типов экологических стратегий [Текст] / М.Ш. Сибгатуллина // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2008. – №3. – С. 121-128.

13. Сибгатуллина, М.Ш. Биофильные и техногенные элементы в лекарственных растениях пригородной зоны [Текст] / М.Ш. Сибгатуллина, А.А. Зялалов // Растительные ресурсы (принято в печать).