

# ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ БАШКИРСКОГО ЗАУРАЛЬЯ

М.Г. Опекунова\*, В.В. Сомов\*, Ю.С. Сокульская,  
С.Ю. Кукушкин, Л.Ю. Царапина, Э.Э. Папян

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

\* Эл. почта: m.opekunova@mail.ru, vomos\_v\_v@mail.ru

Статья по поступила в редакцию 11.04.2015; принята к печати 12.05.2015

Рассмотрены особенности аккумуляции химических элементов в растениях фоновых и антропогенно нарушенных природно-территориальных комплексов (ПТК) Башкирского Зауралья по результатам исследований 1998–2014 гг. на модельных площадях, расположенных в фоновых ПТК, в естественных геохимических аномалиях Красноуральско-Сибай-Гайской рудоносной зоны и в антропогенно загрязненных ПТК на различном удалении от объектов горнорудного производства. Дана детальная характеристика накопления S и тяжелых металлов (ТМ) – Cu, Zn, Fe, Pb, Cd, Ni, Co, Cr и Mn – в почвах и анализ изменчивости концентрации подвижных форм за пятнадцать лет. Особое внимание уделено концентрации ТМ в укосах наземной биомассы и индикаторных видах растений *Artemisia austriaca* Jack., *Salvia stepposa* Schost., *Thymus marschallianus* Willd., *Veronica incana* L., *Caragana frutex* L., *Phlomis tuberosa* L., *Achillea setacea* Waldst. et Kit., *Gallium verum* L. Показаны различия в аккумуляции ТМ растениями различных агроботанических групп – злаков, разнотравья, бобовых, осок, ветоши. На основе сопряженного анализа содержания подвижных форм ТМ в почвах и в индикаторных видах растений продемонстрирована определяющая роль ландшафтно-геохимических факторов в накоплении ТМ в биомассе. Рассмотрена изменчивость химического состава растений под воздействием погодных условий. Отмечено отсутствие прямой корреляции между содержанием подвижных форм ТМ в почвах и уровнем их концентрации в растениях и наличие временного сдвига в один-два года в ходе их изменений. На основе расчета коэффициентов биологического поглощения составлены ряды видов-концентраторов ТМ, рекомендованных для оценки с помощью биоиндикации техногенной трансформации ландшафтов.

**Ключевые слова:** растения, почвы, тяжелые металлы, загрязнение, биоиндикация.

## THE INFLUENCE OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS ON THE ELEMENT COMPOSITION OF PLANT SPECIES IN BASHKIRIAN TRANSURAL REGION

M.G. Opekunova\*, V.V. Somov\*, Yu.S. Sokulskaya, S.Yu. Kukushkin, L.Yu. Tsarapina,  
E.E. Papian

Saint-Petersburg State University (Saint-Petersburg, Russia)

\* E-mail: m.opekunova@mail.ru, vomos\_v\_v@mail.ru

Based on studies carried out in 1998–2014, specific features of chemical elements accumulation by plants species in anthropogenically disturbed and background natural territorial complexes (NTC) of the Bashkirian Transural Region are characterized. Study sites were arranged within the area of natural geochemical anomalies of Krasnouralsk-Sibay-Gaiskoy ore-bearing zone (background NTC) and in anthropogenically polluted NTC at different distances from mining industry facilities. Sulfur and heavy metal (Cu, Zn, Fe, Pb, Cd, Ni, Co, Cr, Mn) levels and the concentrations of the mobile forms of elements in soils were monitored over 15 years in comparison with heavy metal concentrations in the cuts of above-ground vegetation and in indicator species (*Artemisia austriaca* Jack., *Salvia stepposa* Schost., *Thymus marschallianus* Willd., *Veronica incana* L., *Caragana frutex* L., *Phlomis tuberosa* L., *Achillea setacea* Waldst. et Kit., and *Gallium verum* L.). Differences in heavy metal accumulation by different agro-botanical groups (cereals, herbs, legumes, sedges, dead grass) were revealed. Based on mobile HM content in soils and indicator plant species, landscape-related and geochemical factors modulated by meteorological conditions are suggested to play the determinative role in HM accumulation by plant biomass. No immediate correlations between the contents of the mobile forms of elements in soils and in plants was found. Instead, there were one or two-year lags between their changes. Indicator plant species were ranked according to their calculated bioaccumulation factors, and the ranked series are suggested for the bioindicator-based estimation of the degrees of anthropogenic transformation of landscapes.

**Keywords:** plant species, soils, heavy metals, pollution, bioindication.

## Введение

В природе растения обладают хорошо выраженными индивидуальными биохимическими особенностями, которые обусловлены различиями по накоплению микроэлементов в зависимости от внешних обстоятельств (геологических, почвенных, погодных и других ландшафтно-геохимических условий) и внутренних факторов (систематической принадлежности, жизненной формы, органа, фенологической фазы и других биологических особенностей) [1, 2, 5, 13, 16, 17 и др.]. Большое влияние на биогенную миграцию вещества оказывает антропогенное загрязнение. Поэтому особый интерес представляет изучение роли природных и антропогенных факторов в биогеохимическом круговороте в условиях тесного взаимодействия.

### Объект и методика исследований

С 1998 г. на территории Баймакского и Хайбуллинского районов республики Башкортостан на различном удалении от источников антропогенной нагрузки ежегодно проводятся ландшафтно-экологические исследования с применением методов биоиндикации.

Район исследований находится на восточном макросклоне хребта Ирэндык. В его геологическом строении принимают участие древние изверженные и глубинные кристаллические горные породы, представленные гранитами, гнейсами, порфитами, диабазами, а также осадочные образования – известняки и доломиты. Здесь выделяются две металлогенные зоны – Баймак-Бурибаевская смешанно-меднорудная (месторождение Юбилейное, Семеновское) и Красноуральско-Сибай-Гайская меднорудная (месторождение Сибайское), что определяет высокие фоновые концентрации Cu, Zn, Cd, Fe, Mn и других тяжелых металлов (ТМ) во всех компонентах ПТК [5]. Детальное физико-географическое описание района исследований приведено в опубликованных ранее работах [7, 9, 10].

Почвенный покров изученной территории характеризуется значительной неоднородностью. Преобладающие почвы – черноземы. В районах предгорий распространены горные разновидности черноземов и серых лесных почв. При близком залегании коренных пород формируются недоразвитые каменисто-щебнистые почвы на грубом маломощном элювии и делювии. Среди черноземов исследованной территории преобладают по площади обыкновенные и южные черноземы (AU – BCA – Cca). Перевыпас скота приводит к уплотнению почв, истощению гумусового горизонта и снижению их плодородия. Вследствие вырубки лесов серые лесные почвы развиваются по черноземному типу.

По механическому составу изученные черноземы представляют собой тяжелые суглинки. Реакция почвенного раствора исследованных черноземов близка к нейтральной (рН = 6,1–7,5), с глубиной по почвенному профилю наблюдается подщелачивание (рН до 8,3). Содержание гумуса в целинных почвах территории достигает 6,2–10,5%. Южно-Уральские черноземы отличаются языковатым строением почвенного профиля, поэтому гумусовый профиль сильно растянут. Характерной чертой почв является повышенная плотность генетических горизонтов, вызванная засоленностью. Последняя обусловлена особенностями почвообразующих пород, которые наряду с карбо-

натами и сульфатами кальция содержат также соли натрия. Подробная характеристика изученных почв дана в работах [7, 9 и др.].

Большое влияние на формирование степных фитоценозов Зауралья оказывают холмисто-увалистый рельеф и близкое залегание горных пород. Это ведет к большому участию петрофитных элементов в составе травостоя и к отбору среди них видов, наиболее устойчивых к повышенному содержанию ТМ, с возможным образованием металлоустойчивых популяций [8, 17]. Изменчивость химического состава растений обусловлена степенью доступности для них ТМ. На поступление ТМ в растения влияют также видовые особенности растений, тип почвы, концентрация, форма ТМ, рН почвы, механический состав, содержание органического вещества и наличие техногенных источников загрязнения.

Южный Урал – старейший промышленный район России. Интенсивная производственная деятельность, освоение и разработка месторождений полезных ископаемых, урбанизация, агропроизводство и другие виды преобразований приводят к значительной техногенной трансформации ПТК, влияют на содержание и соотношение химических элементов в геохимической среде и организмах, нарушают биогенные циклы элементов. Антропогенное загрязнение и вторичное рассеяние ТМ накладываются друг на друга, вызывая усиление токсического воздействия на биоту.

Горнорудные предприятия Башкирского Зауралья оказывают всестороннее воздействие на окружающую среду: ландшафтно-деструктивное, параметрическое и эмиссионное. Среди них наиболее существенное – загрязнение ТМ. В Сибайском филиале ОАО «Учалинский горно-обогатительный комбинат», ООО «Башмедь», ЗАО «Бурибаевский горно-обогатительный комбинат», ОАО «Башкирский медно-серный комбинат» (БМСК) ежегодно образуются миллионы тонн вскрышных пород, обогащенных Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, As и т. д.

В состав БМСК входят Сибайская обогатительная фабрика (СОФ) и Сибайский карьер. СОФ расположена в восточной части города и граничит с жилым массивом и коллективными садами № 10 и 13. Вблизи СОФ размещено хвостохранилище, состоящее из 2 отсеков: западного – 267,5 тыс. м<sup>2</sup> и восточного – 847,5 тыс. м<sup>2</sup>. С 1996 г. эксплуатируется хвостохранилище, расположенное в п. Калининское Баймакского района в 100 м от р. Карагайлы. За год с подотвальными и шахтными водами в р. Карагайлы (бассейн р. Урал) сбрасывается 10 тыс. т поллютантов, включая сотни тонн ТМ (Zn, Cu, Mn, Fe, Cd и др.) в ионной форме.

Сибайский карьер находится в юго-западной части города. Только на территории Сибайского комплекса общий объем вскрышных пород достиг 600 млн тонн. ТМ и As поступают в почвы, вовлекаются в биологический круговорот, участвуют в латеральной и радиальной миграции, образуя техногенные ореолы рассеяния.

В качестве модельных площадей выбраны несколько участков, находящихся на разном расстоянии от объектов горнорудного производства. За условно-фоновую территорию принята площадь вблизи п. Мукасово, расположенная в пределах естественной геохимической аномалии Красноуральско-Сибай-Гайской

рудноносной зоны, но вне прямого воздействия горнорудных предприятий. Профиль, включающий 8 пикетов (ПК), проложен в 1,5 км к югу от п. Мукасово с вершины одного увала через долину к вершине другого увала. Кроме того, за фоновую территорию принята также площадь вблизи оз. Талкас, находящаяся в Баймак-Бурибаевской смешанно-меднорудной зоне на значительном удалении от золоторудных месторождений. Изучены природно-территориальные комплексы (ПТК) на западном берегу оз. Талкас на профиле, состоящем из 4 ПК и проходящем от уреза воды по склону восточной экспозиции к вершине увала.

Значительная техногенная трансформация ПТК наблюдается, как отмечалось ранее, в районе БМСК – в г. Сибай, вблизи п. Старый Сибай, п. Калининское. Вблизи объектов горнорудного производства заложено три модельных площади. На западном берегу оз. Култубан в 10 км к югу от СОФ и карьера находится профиль из 8 ПК, проходящий от уреза воды по склону восточной экспозиции через вершину увала. Около п. Старый Сибай в 2 км от отвалов Сибайского карьера изучается профиль из 6 пикетов, проходящий с вершины по склону восточной экспозиции к подножью увала по направлению к карьере. Еще один профиль проложен в 1 км к востоку от СОФ в 100 м к западу от жилых построек п. Калининское и в 50 м к востоку от борта хвостохранилища. Наиболее загрязненными являются участки вблизи п. Калининское и п. Старый Сибай – они находятся на наименьшем удалении от источника загрязнения. Помимо этого, большое воздействие на данные участки оказывает сельскохозяйственная деятельность. Подробный анализ изменения растительности в районе БМСК представлен в работах [10, 11 и др.].

Полевые исследования осуществляются в относительно короткие сроки в конце июня – начале июля, то есть в одну фенологическую фазу при относительно однородных метеорологических условиях. На каждом из участков делается детальное геоэкологическое описание, изучаются опорные почвенные разрезы, дается характеристика фитоценоза. На каждом ПК проводится отбор проб почв из поверхностного горизонта методом конверта (ГОСТ 17.4.4.02-84).

Для изучения закономерностей поглощения химических элементов растениями на модельных участках отбираются укосы биомассы и пробы дикорастущих видов-индикаторов, известных концентраторов Cu, Zn, Fe [1, 13, 16 и др.]: полынь австрийская *Artemisia austriaca*

Jack., шалфей степной *Salvia stepposa* Schost., чабрец Маршалла *Thymus marschallianus* Willd., вероника серая *Veronica incana* L., караганник *Caragana frutex* L., зопник клубненосный *Phlomis tuberosa* L., тысячелистник *Achillea setacea* Waldst. et Kit., подмаренник настоящий *Gallium verum* L., мордовник *Echinops ritro* L.

Химический анализ проб почв и растений проводится в лаборатории Геоэкологического мониторинга Санкт-Петербургского государственного университета. В почвах определяются механический состав, величина pH, содержание гумуса, валовое содержание и концентрация подвижных форм ТМ, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером, в растениях – общее содержание ТМ. Анализ проб на содержание ТМ осуществляется на атомно-абсорбционном спектрометре NOVAA 300. Относительная погрешность метода составляет 8–10%, предел обнаружения – 0,05 мг/кг [12].

Концентрация ТМ в почвах и растениях определяется на атомно-абсорбционном спектрометре Квант-АФА в лаборатории экологического мониторинга СПбГУ по стандартным методикам.

## Результаты

### Содержание серы в почвах и растениях.

Как показали проведенные анализы, все изученные почвы в пределах рудоносных зон характеризуются высоким содержанием серы, вызванным сульфидной минерализацией пород (табл. 1). Концентрации серы в пробах почвы с приусадебных участков, превышающие предельно допустимую концентрацию (ПДК) в 3–15 раз, объясняются, скорее всего, индивидуальными агромероприятиями по повышению почвенного плодородия, а также поливом огородов загрязненной водой, в том числе из р. Карагайлы, куда сбрасываются неочищенные сточные воды комбината. Существенно загрязнены серой почвы в г. Сибай. В загрязненных почвах концентрация сульфатов в 26–185 раз превышает фоновое значение и в 1,5–11 раз – ПДК.

Концентрация серы в растениях Южного Урала в несколько раз превосходит ее содержание в почве, что вызвано биофильностью элемента и активным ее поступлением при загрязнении из воздуха и из почв. На фоновой территории средний уровень ее аккумуляции составляет 850 мг/кг сухого вещества (далее – мг/кг) и меняется от 20 до 2500 мг/кг.

По мере приближения к источнику выбросов концентрация серы в растениях увеличивается в 2–11 раз. В слабонарушенных местообитаниях ее содержа-

Табл. 1

Содержание серы в почвах ПТК Южного Урала

Характеристика места отбора проб	Содержание серы, мг/кг	
	среднее	диапазон
Коллективные сады (n = 9)	788	175–1575
п. Калининское, пастбищные угодья (n = 3)	283	200–438
п. Калининское, приусадебные участки (n = 7)	1200	45–2063
п. Старый Сибай–Золото-2–Аркаим, пастбищные угодья (n = 17)	230	38–1463
п. Семеновское, приусадебные участки (n = 4)	965	400–1375
п. Семеновское, пастбищные угодья (n = 6)	31	10–70
п. Тубинский-Талкас, приусадебные участки (n = 4)	1640	490–2390
п. Тубинский-Талкас, пастбищные угодья (n = 7)	110	10–190
п. Мукасово ЭП 1, пастбищные угодья (n = 19)	275	10–1575
г. Сибай, микрорайоны города (n = 13)	685	50–2163
ПДК	160	

ние изменяется от 1100 мг/кг в *Phlomis tuberosa* до 9600 мг/кг в *Thymus marschallianus*, превышая на порядок локальный фон. При этом количество серы в растениях в районе оз. Талкас невелико и варьируется в пределах фона от 10 мг/кг (укоcos бобовых) до 160 мг/кг (укоcos злаков). Однако выделяются виды разнотравья (*Achillea setacea*, *Salvia stepposa*, *Veronica incana*), в которых содержание серы составляет от 1100 до 5250 мг/кг, превышая фон в 6 раз. Концентрация ее в растениях приусадебных хозяйств еще выше и превосходит фон в 11 раз (лук перо – 9350 мг/кг, причем в луковице в 2 раза меньше – 4150 мг/кг).

В районе Семеновской золотоизвлекательной фабрики содержание серы в растениях изменяется от 40 мг/кг в злаках и *Veronica incana* до 850 мг/кг в ветвях и листьях вишни *Cerasus vulgaris* L. Ее накопление обнаружено в *Artemisia austriaca* – 6000 мг/кг, *Gallium verum* – 5700 мг/кг, *Salvia stepposa* – 5750 мг/кг, грибах шампиньонах *Agaricus arvensis* – 10000 мг/кг, укосе бобовых – 5000 мг/кг, луке – 6000 и 7350 мг/кг; ботве свеклы – 8600 мг/кг и капусте – 18000 мг/кг, что превосходит фон в 7–12 раз (максимум в 21 раз).

Высокие концентрации серы (5500–12100 мг/кг) отмечены в *Veronica incana*, *Achillea setacea*, *Salvia stepposa* и *Gallium verum* вблизи Сибайского карьера и в районе п. Калининское. В растениях, выращиваемых на приусадебных участках г. Сибай, содержание серы также велико и составляет в луке 7200–10850 мг/кг, что в 8–13 раз больше локального фона.

Таким образом, в семиаридных ПТК Южного Урала в условиях техногенеза концентрация серы в растении

является локальный фон у дикоросов в 6–9 раз, у культурных растений – в 10–21 раз. Основными растениями-концентраторами серы выступают *Artemisia austriaca*, *Salvia stepposa*, *Veronica incana*, *Gallium verum*, *Thymus marschallianus* и грибы шампиньоны *Agaricus arvensis*. Культурные растения (лук, капуста) также накапливают серу в большем количестве в связи с поливом водой, загрязненной сульфатами.

**Содержание тяжелых металлов в почвах**

Как показали проведенные исследования, для почв региона характерны высокие содержания Cu, Zn, Cd и Fe, обусловленные минерализацией горных пород (табл. 2). Концентрация подвижных форм ТМ в почвах может сильно варьироваться (табл. 3). Она определяется совокупностью факторов, из которых наибольшее значение имеют положение ПТК в элементарном геохимическом ландшафте, тип миграционных потоков, гидрометеорологические условия, кислотность почв и удаленность от источников антропогенного загрязнения.

Большую роль в миграции химических элементов играют погодные условия, прежде всего, количество выпавших осадков и влажность почв, так что по годам на одних и тех же пробных площадках отмечаются существенные различия в концентрации подвижных форм ТМ. Наблюдается также резкое изменение их содержания по профилю элементарного геохимического ландшафта. Так, высоким содержанием Mn характеризуются почвы подчиненных ПТК в нижней части склона увала. Максимальная

Табл. 2

**Валовое содержание некоторых ТМ в почвах Башкирского Зауралья, мг/кг (среднее/минимум-максимум) (по [6] с дополнениями и изменениями)**

ПТК	Cu	Zn	Fe	Mn	Ni
Фоновая территория, п. Мукасово-Туркменево, Красноуральско-Сибай-Гайская рудоносная зона (n = 43)	49 30–168	235 86–517	40563 13755–106310	1457 324–10957	34 16–74
п. Калининское, приусадебные участки вблизи хвостохранилища БМСК (n = 12)	153 97–205	460 328–622	31694 30138–33083	704 681–736	53 43–68
Берег оз. Култубан, в 10 км к югу от Сибайской обогатительной фабрики и карьера БМСК (n = 34)	292 92–520	223 50–630	н/о	3259 900–15000	92 42–160
г. Сибай, микрорайоны города (n = 150)	248 83–632	487 224–762	34667 22173–44795	1338 669–6644	49 38–99
Региональный фон	49	223	37100	1060	34
Фон для черноземов	25	68	–	–	45
Ориентировочно допустимая концентрация (ОДК), 2009	132	220	–	–	80

Табл. 3

**Содержание подвижных форм ТМ в почвах Башкирского Зауралья, мг/кг (среднее/минимум-максимум) (по [6] с дополнениями и изменениями)**

ПТК	Cu	Zn	Fe	Mn	Pb	Ni
Фоновая территория, п. Мукасово-Туркменево, Красноуральско-Сибай-Гайская рудоносная зона (n = 161)	0,8 <0,05–1,8	7,2 0,6–43,8	9,4 0,29–36,5	42,1 19,6–96,2	1,4 0,01–4,7	0,5 0,01–4,5
п. Калининское, приусадебные участки вблизи хвостохранилища БМСК (n = 12)	2,2 0,4–5,4	65 42–108	0,8 0,2–1,8	52 34,4–84	2,1 1,7–3,1	0,4 0,05–0,8
Берег оз. Култубан, в 10 км к югу от СОФ и карьера БМСК (n = 40)	2,1 0,2–4,7	31 1,7–77	24 0,6–74,0	72,2 34,7–270,0	2,6 1,8–3,4	1,5 <0,01–5,2
г. Сибай (n = 166)	7,3 0,1–77	47,2 0,2–409	5,6 0,1–26,8	55 0,2–181,5	2,7 0,1–11,6	1,1 0,01–2,9
Региональный фон	0,2	9,7	3,2	29	0,3	0,1
ПДК	3,0	23,0	–	140	6,0	4,0

концентрация Fe, Cu и Zn, в основном, приходится на средние части склонов и на вершины. Содержание подвижных форм Pb и Ni в почвах различных ПТК практически не изменяется.

В почвах фоновой территории доля подвижных форм ТМ составляет 0,1–3% от их валового содержания. В засушливые годы она уменьшается до 0,01%, а во влажный период может достигать 3–5%, что объясняется деятельностью почвенных организмов, феноритмическими изменениями интенсивности поглощения химических элементов растениями и другими факторами.

Наибольшему загрязнению подвергаются почвы в радиусе 2–5 км от горнорудных предприятий. Максимальные содержания ТМ обнаружены в почвогрунтах на территории г. Сибай вблизи производственных объектов БМСК: СОФ, Сибайского и Камаганского карьеров и др. Высокие концентрации Cu и Zn наблюдаются в почвах п. Калининское, расположенного вблизи хвостохранилища. Валовое содержание Zn и Cu в почвах приусадебных участков превышает уровень 3 ориентировочно допустимых концентраций (ОДК), концентрация подвижных форм в 2–5 раз превосходит предельно допустимую концентрацию (ПДК). Почвы коллективных садов, расположенных в санитарно-защитной зоне СОФ, загрязнены Cu (1,2–2,4 ОДК), Zn (1,6–2,6 ОДК). В зоне влияния отвалов Сибайского карьера (п. Старый Сибай) выявлено загрязнение почв Zn, Cu, Pb: концентрация подвижных форм достигает ПДК, валовое содержание – ОДК.

Антропогенное загрязнение приводит к резкому увеличению содержания подвижных форм ТМ в почвах. Вблизи горнорудных предприятий их доля возрастает до 16–24 %, что обусловлено техногенными выбросами серы и сульфатов и подкислением почв до

pH 4,3–5,9. В зоне воздействия предприятий загрязнение почв соответствует категориям «чрезвычайно-опасная» и «опасная». Об этом свидетельствует суммарный показатель загрязнения почв ( $Z_c$ ), рассчитанный по формуле

$$Z_c = \sum_{i=1}^n \frac{C_{i.onp}}{C_{i.pф}} - (n - 1)$$

где:  $C_{i.onp}$  – определяемое содержание  $i$ -го токсиканта в почве;

$C_{i.pф}$  – значение регионально-фоновое содержание в почве  $i$ -го токсиканта.

Значения  $Z_c$  для этих территорий в разные годы изменялись в пределах 122–320. Вместе с тем, сокращение объемов добычи руды в целом и переход в начале 2000-х годов на добычу сырья шахтным методом способствовали существенному сокращению площадей «чрезвычайно-опасной» категории на территории г. Сибай и его окрестностей (рис. 1).

Метод главных компонент факторного анализа выявил 4 парагенезиса химических элементов, отражающих закономерности миграции и аккумуляции ТМ в почвах естественных геохимических аномалий Южного Урала (табл. 4).

Первый фактор  $Mn_{91} Cr_{87} Ni_{85} Pb_{78} Cu_{77}$  – кварцевого разбавления – «отвечает» влиянию подстилающей горной породы. Он объясняет от 45 до 60% корреляционных связей.

Второй фактор  $Zn_{77} Fe_{64}$  обусловлен изменением подвижности ТМ в системе почва–растение в связи с погодными условиями. Вес этого фактора (от 17 до 27%) существенно меняется в зависимости от количества атмосферных осадков и интенсивности вовлечения ТМ в биологический круговорот.

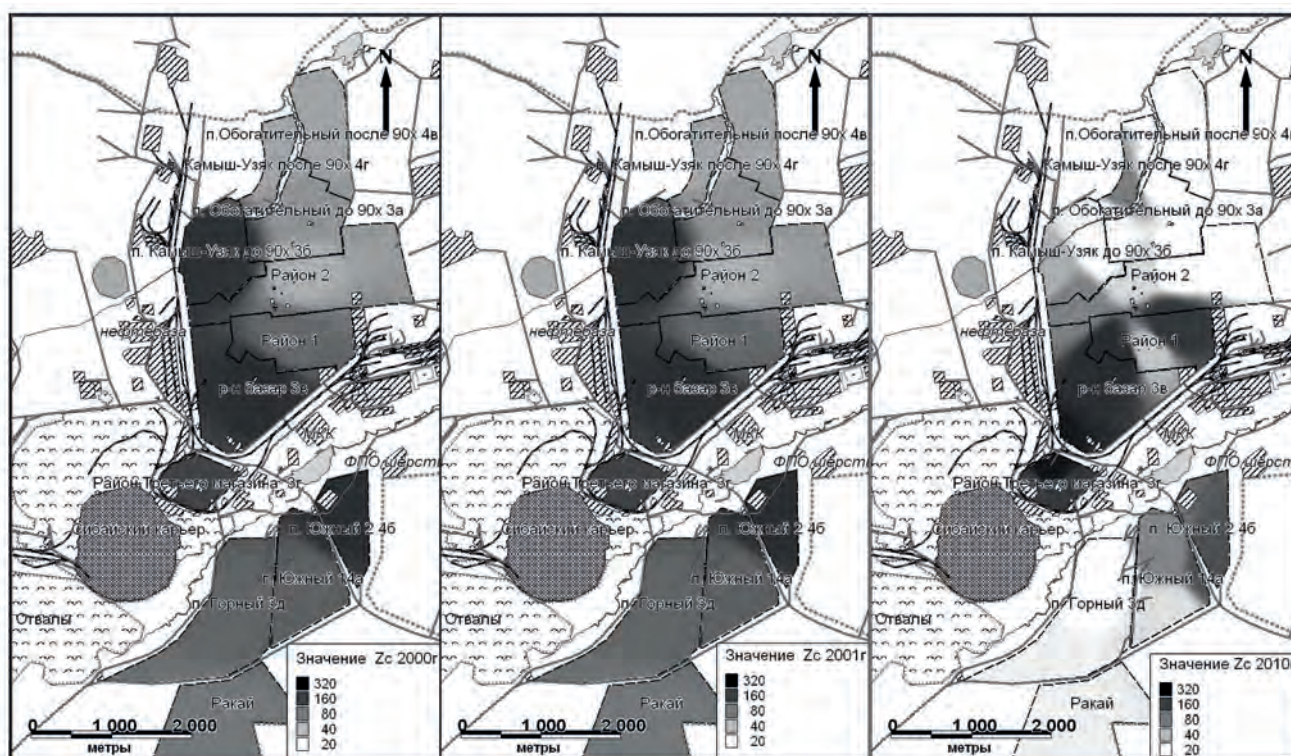


Рис. 1. Динамика загрязнения почв г. Сибай (по величине  $Z_c$ , см. текст)

**Парагенезисы химических элементов в обобщенных факторных нагрузках, отвечающие за распределение ТМ в почвах антропогенно загрязненных ПТК**

Название	Выборка	Парагенезис	Вклад фактора, %
Техногенное загрязнение- <del>Загрязнение</del> , сопровожаемое поступлением аэрозолей конденсации ТМ	Обобщенная выборка	$\frac{Cd^*_{99} Pb_{95} Cd_{93} Zn_{93} As_{92} Zn^*_{90} Cu_{87} Cu^*_{85} Ni^*_{83} Pd^*_{67} Fe^*_{63}}{Mn^*_{65} Co^*_{44}}$	45,37
	Валовое содержание	$\frac{Pb_{95} Cd_{95} Zn_{94} Cu_{92} As_{88} Hg_2}{Sc_{32} (Cr, Ti, Mn)}$	38,01
	Подвижные формы	$\frac{Cd^*_{93} Zn^*_{91} Cu^*_{88} Ni^*_{78} Pb^*_{78} Mn^*_{68} Co^*_{35}}$	53,76
Подвижность химических элементов при изменении рН	Обобщенная выборка	$\frac{Pb^*_{43} pH_{43} Mn^*_{38}}{Ti_{72} Hg_{70} Co_{63} Fe^*_{52} Ni^*_{42} Cr_{40} Mn_{35}}$	14,98
	Подвижные формы	$\frac{Co^*_{78} Ni^*_{46}}{pH_{62} Pb^*_{43}}$	19,03
Породный фактор. Фактор влияния зеленокаменных пород	Обобщенная выборка	$\frac{Co^*_{49} Fe^*_{44}}{Ni_{75} Cr_{72} Mn_{55} Ti^*_{44} Sc_{37}}$	12,52
	Валовое содержание	$\frac{Ti_{81} Cr_{73} Ni_{68} Mn_{67} Sc_{48} Hg_{33}}$	21,49
Зональность вторичного ореола рассеивания	Валовое содержание	$\frac{pH_{89} Ni_{58} Cr_{32}}{Hd_{56}}$	13,34
Хелатообразование, органоминеральные комплексы	Обобщенная выборка	$\frac{Sc_{46} Mn_{38} Mn^*_{35}}{pH_{67} Ni_{45}}$	4,96
	Подвижные формы	$\frac{Mn^*_{35}}{pH_{72}}$	9,56

\* Подвижные формы; над чертой – положительные коэффициенты факторных нагрузок; под чертой – отрицательные коэффициенты факторных нагрузок.

Третий  $\frac{Co_{48} Pb_{43}}{Fe_{64} Cu_{53}}$  (5%) и четвертый  $\frac{Fe_{50}}{Zn_{45}}$  (9%) факторы являются рудными и характеризуют зональность вторичного ореола рассеивания.

При антропогенном загрязнении факторная структура ТМ в почвах меняется (табл. 4). Ведущим становится парагенезис, ответственный за аэротехногенное загрязнение. На его долю приходится от 38 до 54% всех корреляционных связей, вес его в выборке подвижных форм ТМ существенно выше, что подтверждает известное положение об увеличении подвижности элементов в техногенезе. Положительные нагрузки фактора имеют пространственную приуроченность к Сибайскому карьеру и хвостохранилищу. Второй фактор обусловлен влиянием погодных условий (через рН почвенных растворов) на миграционную способность химических элементов и может иметь как природное, так и антропогенное происхождение. В процентном отношении значимость его в естественных и антропогенно нарушенных ПТК не изменилась. Породный фактор, отвечающий в фоновых условиях за 45–60% корреляционных связей, в зоне воздействия БМСК становится третьим с весом 12,5–21,5%. Доля рудного фактора сохраняется и составляет 13%. Изменение поведения Mn в антропогенно загрязненных ПТК в связи с уменьшением вовлечения его в биологический круговорот отражает

пятый фактор, объединяющий от 5 до 9,5% всех связей.

Горнорудное производство способствует значительной трансформации ПТК. Техногенные ореолы рассеивания накладываются на природные геохимические аномалии, приводя к интенсивному вовлечению Zn, Cu, Fe и других ТМ в биологический круговорот [5, 10, 14 и др.]. Большую роль в техногенной трансформации ландшафтов играют также вырубки и агропроизводство.

**Содержание тяжелых металлов в растениях**

Интегральным показателем экологического состояния ландшафтов служит биологическая продуктивность, в том числе запасы биомассы и ее химический состав. Динамика запасов биомассы и изменение содержания в ней микроэлементов, отражающие интенсивность биологического круговорота в ПТК Южного Урала, представлены в табл. 5 и на рис. 2. Как видно из приведенных данных, растения разных агроботанических групп характеризуются неодинаковым уровнем аккумуляции химических элементов. Наименьшее содержание их наблюдается в злаках. Максимальные концентрации всех изученных элементов обнаружены в разнотравье, что хорошо согласуется с литературными данными [5, 14, 16 и др.]. В сравнении со Среднерусской возвышенностью [13] изученные растения Красноуральско-Сибай-Гайской

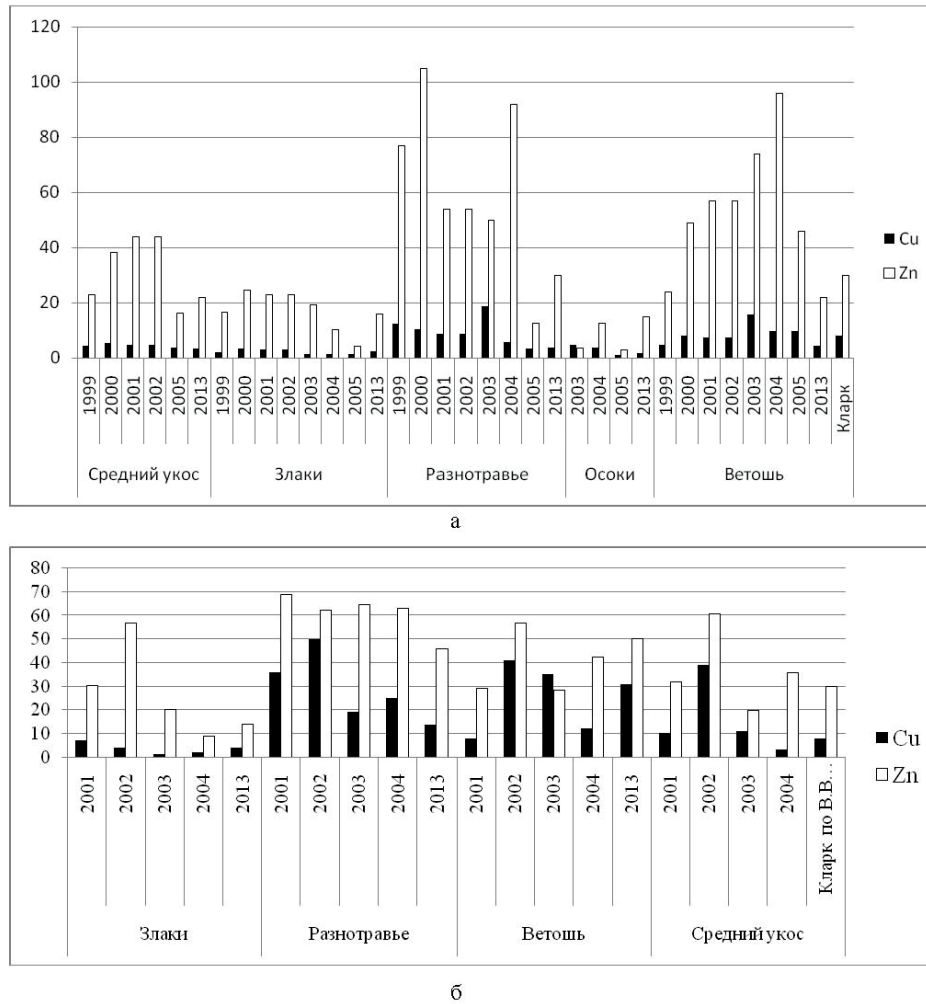
рудоносной зоны отличаются низкой концентрацией Mn, Ni, Pb и повышенной – Zn, Cu и Fe. Концентрации металлов в средних укосах и отдельных агроботанических группах существенно различаются по годам. Основное влияние при этом оказывают гидрометеорологические факторы. При неблагоприятных погодных условиях, в частности, при поздней весне и засушливом лете, отмечается угнетение роста и развития растений, что отражается в уменьшении

запасов фитомассы и интенсивности биологического круговорота. В такие годы уровень содержания ТМ в растениях резко снижается. И наоборот, теплая весна и обильные осадки, выпадающие в начале лета, способствуют усилению процессов жизнедеятельности, в том числе микробиологической активности и интенсивному переходу микроэлементов из почвы в надземную биомассу. В таких условиях наблюдается максимальное содержание ТМ в растениях.

Табл. 5

**Содержание химических элементов в укосах биомассы растительности некоторых ПТК Башкирского Зауралья (числитель – среднее, знаменатель – диапазон, мг/кг сухого вещества)**

Агроботаническая группа	Cu	Zn	Fe	Mn	Ni	Pb	Cd
Фоновые ПТК Красноуральско-Сибай-Гайской рудоносной зоны, п. Мукасово*, 1999–2013							
Общий укос	<u>4,3</u> 3,3–5,3	<u>31,3</u> 16,4–44	<u>77</u> 51–156	<u>27</u> 16–39	<u>0,8</u> 0,2–1,3	<u>0,72</u> <0,001–1,8	<u>0,15</u> 0,001–0,40
Злаки	<u>2,3</u> 1,4–3,2	<u>17,2</u> 4,3–24,7	<u>89</u> 27–235	<u>23</u> 7–40	<u>0,43</u> 0,01–1,05	<u>0,83</u> <0,001–1,8	<u>0,01</u> 0,001–0,03
Разнотравье	<u>8,9</u> 3,4–18,7	<u>59</u> 12–105	<u>169</u> 34–735	<u>48</u> 12–98	<u>0,91</u> 0,01–2,0	<u>1,3</u> <0,001–2,5	<u>0,2</u> <0,001–0,4
Осоки	<u>2,7</u> 0,9–4,5	<u>8,5</u> 3–15	<u>51</u> 11,5–92	<u>19</u> 8,7–33	<u>1,25</u> 0,01–2,5	<u>0,24</u> <0,01–0,95	<u>0,01</u> 0,001–0,02
Ветошь	<u>8,9</u> 4,2–15,6	<u>53</u> 22–96	<u>169</u> 58–1577	<u>48</u> 28–97	<u>0,9</u> 0,5–2,9	<u>3,0</u> <0,01–4,3	<u>0,19</u> 0,001–0,3
Фоновые ПТК Баймакского рудного района, оз. Талкас, 2001–2003							
Общий укос	<u>5,9</u> 5,6–6,1	<u>27,7</u> 23,5–31,9	<u>34,5</u> 17,2–52	<u>44</u> 35–53	<u>1,8</u> 1,8–1,8	2,5*	0,003*
Злаки	<u>1,7</u> 0,6–2,7	<u>17,4</u> 7,5–31,3	<u>159</u> 56,9–222	<u>23,8</u> 7,0–39,4	4,4	<u>0,27</u>	<u>0,02</u> 0,003–0,03
Разнотравье	<u>5,8</u> 4,7–7,5	<u>35,9</u> 25,6–42,4	<u>128</u> 31,7–204	<u>48,8</u> 12,9–79	<u>2,5</u> 1,2–4,3	<u>1,5</u> 0,7–2,4	<u>0,03</u> <0,001–0,1
Ветошь	<u>4,1</u> 1,3–6,6	<u>20,9</u> 7,1–34,7	<u>315</u> 90–697	<u>70</u> 9,2–146	<u>3,7</u> 1,8–6,2	<u>2,3</u> 1,2–3,5	<u>0,04</u> 0,003–0,072
Слабонарушенные ПТК в 10 км от СОФ и Сибайского карьера, берег оз. Култубан, 2005–2013							
Злаки	<u>1,3</u> 1,0–2,0	<u>6,7</u> 4,0–10,0	<u>31,3</u> 9,0–72	<u>21,0</u> 7,0–43	<u>0,5</u> 0,3–1,3	<u>0,1</u> <0,001–0,3	<u>0,004</u> <0,001–0,01
Разнотравье	<u>4,3</u> 3,0–7,0	<u>23</u> 13–42	<u>38,5</u> 23,0–58,6	<u>42,0</u> 19–85	<u>0,3</u> <0,01–0,8	<u>0,8</u> <0,01–2,0	<u>0,1</u> <0,001–0,2
Осоки	<u>10,5</u> 1–20	<u>18</u> 3–33	<u>29,5</u> 11–48	<u>39</u> 10–68	<u>0,70</u> <0,001–1,4	<u>0,001</u> <0,001–0,001	<u>0,001</u> <0,001–0,001
Ветошь	<u>9,8</u> 7,0–12,4	<u>35,7</u> 21,0–46	<u>81</u> 57–95	<u>234</u> 16–659	<u>1,4</u> 1,2–1,7	<u>7,2</u> <0,001–9,8	<u>0,1</u> <0,001–0,1
Кустарники	7,1	33	94,9	147	1,5	1,92	0,06
Нарушенные ПТК в 50 м к востоку от борта хвостохранилища СОФ, п. Калининское, 1998–2013							
Общий укос	<u>16,8</u> 3,0–39	<u>47,6</u> 19,9–101	<u>162</u> 59,0–331	<u>21,0</u> 6,5–50	<u>0,8</u> 0,3–1,6	<u>1,4</u> 0,4–2,8	<0,001
Злаки	<u>3,3</u> 1,0–7,0	<u>23,2</u> 9,0–56,7	<u>133</u> 44–345	<u>17,6</u> 1,9–43,7	<u>1,1</u> 0,3–3,1	<u>0,01</u> <0,001–2,5	<0,001–0,008
Разнотравье	<u>23,8</u> 10,0–50	<u>54,4</u> 36,7–69	<u>214</u> 88–530	<u>27,3</u> 14,7–61	<u>1,6</u> 0,3–2,7	<u>2,4</u> 1,7–4,1	<0,001–0,21
Ветошь	<u>20,6</u> 7,0–41	<u>40,8</u> 17–62	<u>542</u> 53–2750	<u>31,3</u> 8,4–76	<u>1,6</u> 0,2–3,2	<u>1,5</u> <0,001–3,4	<0,001–0,116
РКР	13	43	112	39	1,3	2,1	0,05
Кларк растений по В.В. Добровольскому	8	30	–	205	2	1,25	0,035



**Рис. 2.** Изменения содержания Cu и Zn (мг на кг воздушно-сухой биомассы) в укосах биомассы на фоновой территории Сибай-Гайской рудоносной зоны, п. Мукасово (а) и вблизи хвостохранилища СОФ, п. Калининское (б)

Важным показателем процессов, происходящих в ПТК, является также ветошь. Количество отмершей биомассы растений и ее химический состав индицируют особенности биологического круговорота, сбалансированность миграционных потоков и уровень техногенной нагрузки. С отмершей надземной частью растений выводятся излишки химических элементов, и таким образом поддерживается оптимальный уровень ТМ в живых тканях. Исследования, проведенные в естественных ПТК рудоносной зоны, показали, что ветошь отличается высоким содержанием Zn, Cu, Fe и Cd. Это хорошо согласуется с отмеченным выше увеличением концентрации данных металлов в фитомассе. Максимальное количество ТМ в ветоши наблюдается на следующий год после увеличения их содержания в надземной фитомассе степной растительности. Скорость возвращения в почву ТМ, закрепленных в очесе, определяется опять же погодными условиями и интенсивностью биогеохимического круговорота в конкретные годы. В засушливые годы опад служит мощной депонирующей системой. Накопление ТМ в ней снижает интенсивность биогеохимического круговорота и поступление ТМ в растения. Быстрая минерализация ветоши во влажные годы, наоборот, способствует высвобождению ТМ и поглощению их растениями, главным образом, видами-концентраторами (рис. 3). Поэтому, как отмечалось выше, уровень содержания подвижных форм

ТМ в почвах, а также количество ТМ в системе почва-растение резко меняется по годам, что обусловлено комплексом ландшафтно-геохимических условий конкретного года и факторами «последствия» в определенный временной интервал.

Анализ накопления ТМ дикорастущими растениями в зоне воздействия горнорудных предприятий указывает на превышение в укосах биомассы содержания Cu, Zn, Pb и Mn в 1,5–2 раза по сравнению с фоновыми (табл. 5). Наиболее устойчивы к загрязнению ТМ представители семейства злаков, что хорошо согласуется с литературными данными [4]. Повышенные содержания ТМ в зоне воздействия предприятий горнорудного комплекса отмечаются в разнотравье. В биомассе растений этой фракции содержание Cu превышает региональный кларк растений Южного Урала (РКУ) в 3 раза, Zn – в 2 и Fe – в 1,5 раза.

Особый интерес представляет изучение химического состава отдельных видов группы разнотравья, отличающихся избирательной аккумуляцией и относящихся к концентраторам ТМ. Содержание микроэлементов в растениях на водосборе оз. Талкас, на территории, находящейся в Баймакском золоторудном районе за пределами Красноуральско-Сибай-Гайской полиметаллической рудоносной зоны, невысоко и близко к кларку по В.В. Добровольскому [3]. В целом, содержание микроэлементов в растениях,



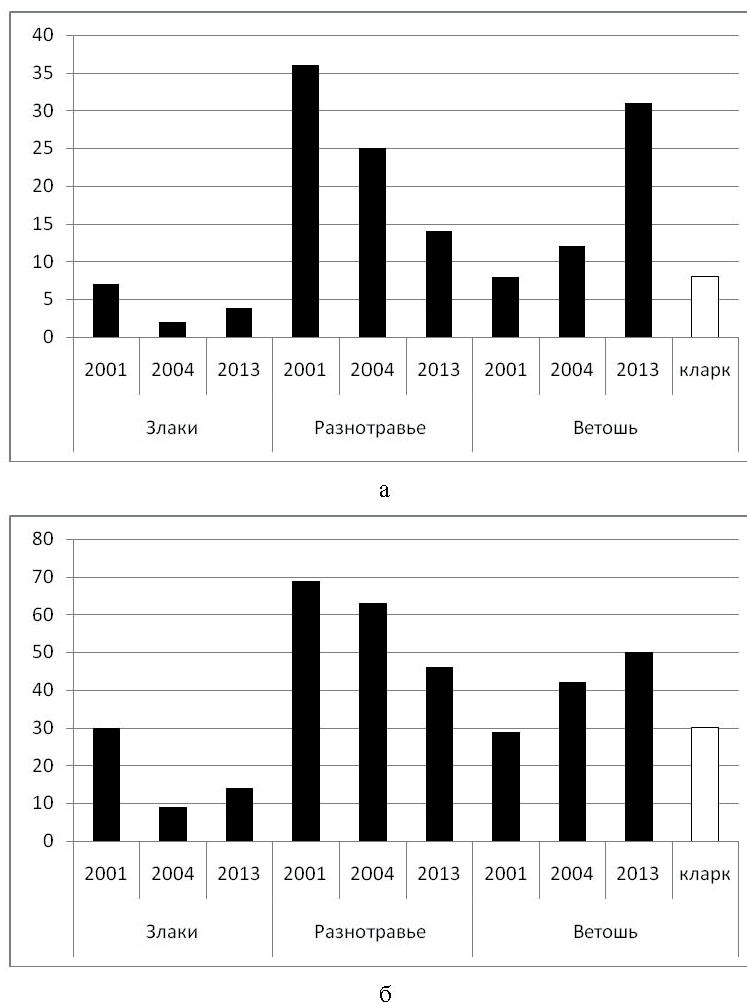


Рис. 3. Содержание (мг/кг воздушно-сухой биомассы) Cu (а) и Zn (б) в укосах биомассы (п. Калининское)

произрастающих в фоновых ПТК, не превышает РКР. Исключение составляет только содержание Fe – практически во всех изученных видах содержание его в 1,5–2 раза превышает РКР.

Химический состав растений, произрастающих в пределах *естественных геохимических аномалий* Южного Урала, определяется спецификой медноколчеданной минерализации. Как показал анализ полученных результатов за период с 1999 по 2014 г., концентрация ТМ в различных видах растений сильно варьируется (рис. 4). В разные годы отмечаются значительные концентрации Cu, Zn, Fe, Pb и Cd, превышающие не только кларк по В.В. Добровольскому, но и региональный фон. По полученным данным, региональный кларк Cu для растений Южного Урала несколько выше кларка растений по В.В. Добровольскому (8 мг/кг) и составляет 13 мг/кг [10]. В течение пятнадцатилетнего периода исследований максимальным содержанием Cu среди всех растений выделяется *Artemisia austriaca* (табл. 6). Пониженные значения этого микроэлемента обнаружены в *Galium verum* (5,7 мг/кг) и в бобовых (5,4 мг/кг).

Средняя концентрация Zn в растениях ПТК естественных геохимических аномалий значительно выше РКР (43 мг/кг). К концентраторам Zn относится *Thymus marschallianus*, который накапливает до 160 мг/кг этого металла. Высокое содержание Zn отмечено в *Artemisia austriaca* – 52–154 мг/кг (рис. 5). В этих

условиях у растений появляются биогеохимические эндемии – аномалии развития, выражающиеся в морфологических изменениях, израстаниях соцветий, срастании листьев и др. [5, 13]. Поступление Zn в растения зависит от pH почвенных растворов: в случае снижения pH до 5,5 увеличивается доступность элемента и резко возрастает его биоаккумуляция. В подчиненных ПТК при нейтрализации почвенных растворов содержание Zn в растениях не превышает 50–65 мг/кг, что связано с переходом Zn в нерастворимую форму.

Максимальное содержание Fe отмечено у *Thymus marschallianus* – до 588 мг/кг, что позволяет отнести этот вид к непривычным концентраторам железа. В *Artemisia austriaca* в тех же условиях оно немного ниже РКР (112 мг/кг) и составляет 88 мг/кг. В остальных видах растений его концентрация ниже 65 мг/кг. Оценивая распределение концентраций Fe в растениях по элементам рельефа, можно отметить, что наибольшее его значение наблюдается в элювиальных фашиях; в иллювиальных и подчиненных условиях Fe находится в недоступном растениям виде, и поэтому его содержание низко (45–65 мг/кг).

Содержание Mn в растениях изменяется в широких пределах – от 3,4 мг/кг в *Veronica incana* до 226 мг/кг в *Thymus marschallianus* при среднем значении в растениях 36–90 мг/кг, что почти в 2 раза ниже регионального фона (164 мг/кг). Это хорошо согласуется с

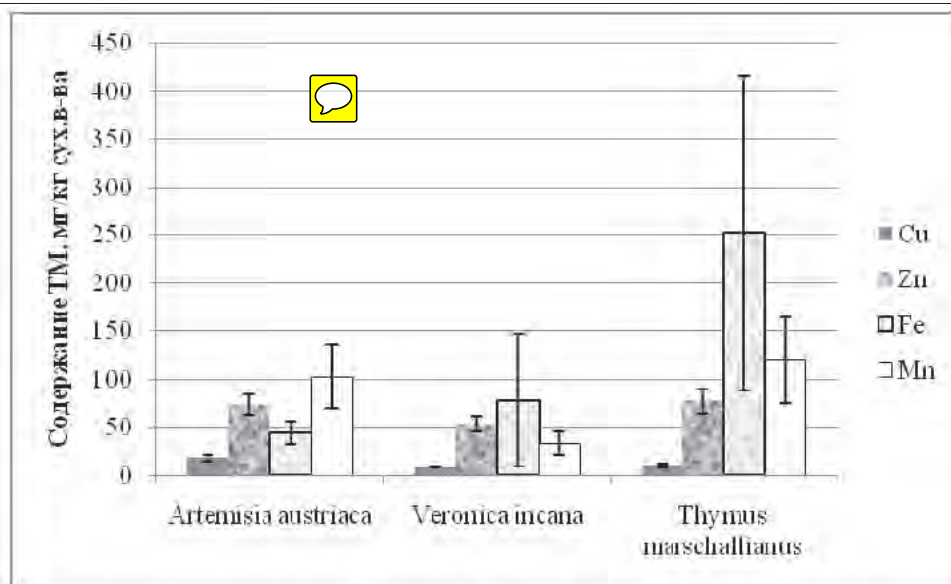
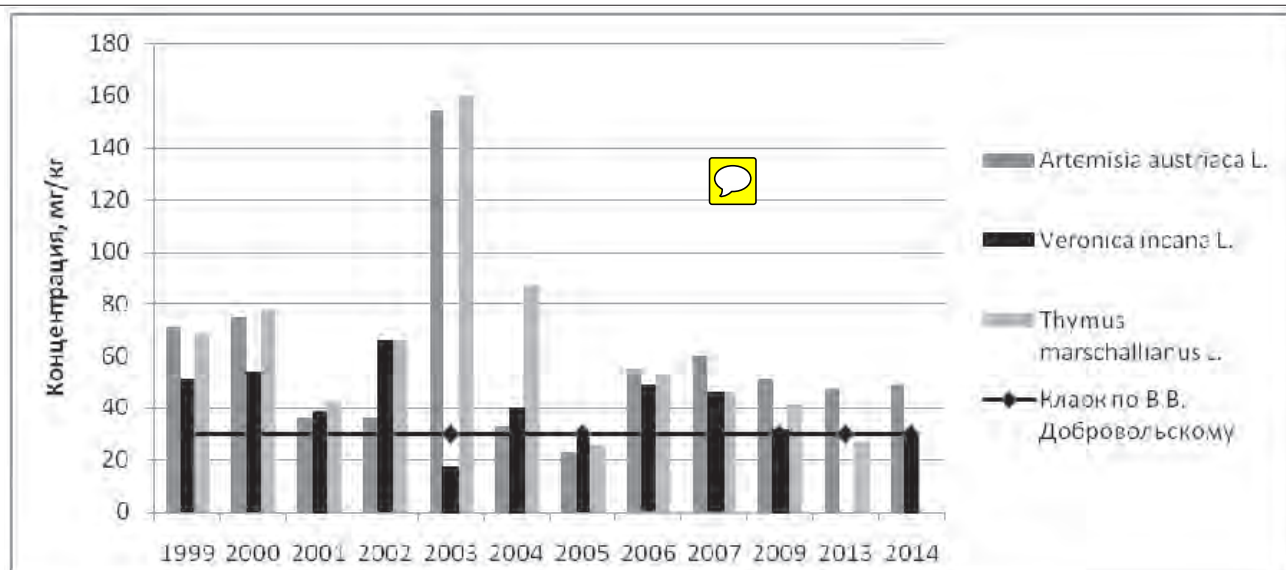


Рис. 4. Содержание ТМ в растениях фоновой территории Сибай-Гайской рудоносной зоны, п. Мукасово

Табл. 6

Среднее содержание ТМ в некоторых видах растений Башкирского Зауралья (числитель – среднее, знаменатель – диапазон, мг/кг сухого вещества)

	Cu	Zn	Fe	Mn	Ni	Pb	Cd
<b>Фоновые ПТК Красноуральско-Сибай-Гайской рудоносной зоны, вблизи п. Мукасово</b>							
<i>Artemisia austriaca</i> , 1999–2014	<u>13,2</u> 2,8–23	<u>52</u> 16,9–154	<u>88</u> 10,6–212	<u>51</u> 8,8–122	<u>1,2</u> <0,01–3,5	<u>1,6</u> <0,001–4,2	<u>0,7</u> 0,003–3,5
<i>Veronica incana</i> , 1999–2014	<u>7,9</u> 4,3–18	<u>40</u> 17–66	<u>52</u> 5–122	<u>36</u> 11–92	<u>1,2</u> 0,5–4	<u>1,4</u> <0,001–2,7	<u>0,2</u> <0,01–0,7
<i>Thymus marschallianus</i> , 1999–2013	<u>8,2</u> 5,3–12,3	<u>63</u> 26–160	<u>176</u> 43–271	<u>56</u> 19–120	<u>1,7</u> 0,8–3	<u>1,6</u> <0,001–3,5	<u>0,2</u> <0,001–0,3
<b>Модельный участок вблизи оз. Култубан</b>							
<i>Artemisia austriaca</i> , 2002–2014	<u>15,6</u> 8,8–24,6	<u>63</u> 32,5–146	<u>81</u> 49–196	<u>63</u> 13,1–186	<u>1,1</u> 0,6–1,8	<u>1,1</u> 0,2–1,7	<u>0,6</u> 0,3–1,2
<i>Veronica incana</i> , 2002–2013	<u>10,5</u> 4,7–18,9	<u>44,9</u> 32,8–66	<u>100</u> 15,8–181	<u>37</u> 18–66	<u>1,7</u> 0,7–6	<u>1,7</u> 1–2,7	<u>0,1</u> <0,001–0,5
<i>Thymus marschallianus</i> , 2002–2009	<u>5,9</u> 0,1–9,3	<u>61</u> 29,4–88	<u>76</u> 40–135	<u>72</u> 20,6–98	<u>1,1</u> 0,2–1,8	<u>0,9</u> <0,001–3,2	<u>0,1</u> <0,001–0,2
<b>Модельный участок у п. Старый Сибай</b>							
<i>Artemisia austriaca</i> , 2002–2014	<u>21</u> 5–62	<u>59</u> 25–149	<u>109</u> 17–268	<u>64</u> 31,6–107	<u>1,8</u> 0,3–5	<u>2,2</u> 0,7–5	<u>0,8</u> 0,3–2,4
<i>Veronica incana</i> , 2002–2014	<u>9,5</u> 4,2–26	<u>50</u> 19–143	<u>165</u> 41–272	<u>24,2</u> 13,6–35	<u>1,8</u> 0,5–5	<u>1,9</u> 1–4	<u>0,21</u> <0,01–0,5
<i>Thymus marschallianus</i> , 2002–2013	<u>11,3</u> 0,4–38	<u>69</u> 16–246	<u>328</u> 75–853	<u>43</u> 21–75	<u>2,2</u> 1–8	<u>2</u> 1–4	<u>0,2</u> <0,01–1
<b>Модельный участок у п. Калининское</b>							
<i>Artemisia austriaca</i> , 1998–2013	<u>24,7</u> 7,8–41,5	<u>87,6</u> 39–164	<u>210</u> 29,7–575	<u>27,1</u> 13,7–47,7	<u>1,6</u> 0,5–2,9	<u>2</u> 0,4–6,2	<u>0,4</u> <0,001–0,7
<i>Veronica incana</i> , 2000–2004	<u>13,1</u> 6,2–23	<u>64,1</u> 48,4–78,2	<u>179</u> 44,5–344	<u>11,7</u> 5,5–22,1	<u>0,6</u> 0,4–0,8	<u>0,6</u> <0,001–0,9	<u>0,2</u> 0,2–0,2
<i>Thymus marschallianus</i> , 2004–2013	<u>16,2</u> 10,1–25,4	<u>61</u> 28,7–83	<u>699</u> 248–1470	<u>47,8</u> 20,9–76	<u>2</u> 1,25–2,8	<u>0,94</u> <0,001–1,5	<u>0,1</u> 0,03–0,1
<b>Территория г. Сибай</b>							
Корка <i>Populus nigra</i> , 2010	<u>14</u> 10–23,5	<u>88</u> 60–115	<u>349</u> 175–597	<u>33</u> 22,5–47,5	<u>3,4</u> 1,7–5,5	<u>0,4</u> 0,005–0,7	<u>0,3</u> 0,1–0,5



**Рис. 5.** Содержание Zn в дикорастущих видах растений на фоновой площади Красноуральско-Сибай-Гайской рудоносной зоны (мг/кг)

известным антагонизмом в накоплении Cu и Mn [1, 4]. Повышенная аккумуляция Cu в надземной биомассе растений приводит к уменьшению содержания в них Mn.

Содержание Pb в большинстве растений близко к кларку растений по В.В. Добровольскому и изменяется в пределах от <0,2 мг/кг до 2,0 мг/кг. Увеличение его концентрации до 3,5 мг/кг отмечено в *Thymus marschallianus* и 4,2 мг/кг в *Artemisia austriaca* в иллювиальных фациях.

Содержание Co в растениях варьируется от 0,01 мг/кг в *Veronica incana* до 0,9 мг/кг в *Artemisia austriaca*, среднее содержание в остальных видах растений – 0,2 мг/кг, что выше кларка растений в 6 раз.

Как видно из полученных данных, интенсивность поглощения изученных элементов растениями невелика, коэффициент биологического поглощения (Кб), представляющий собой отношение содержания химического элемента в растении к содержанию его в почве, в основном < 1. Растения степных ПТК естественных геохимических аномалий Южного Урала наиболее активно аккумулируют Cu, Zn, Mn и Pb.

#### *Artemisia austriaca*:

Zn 0,38 (0,12–0,61) > Cu 0,30 (0,11–0,55) > Cd 0,22 (0,007–0,44) > Mn 0,16 (0,017–0,52) > Pb 0,064 (0,00003–0,09) > Ni 0,041 (0,016–0,060) > Co 0,0086 (0,0004–0,019) > Fe 0,0015 (0,0002–0,003).

#### *Veronica incana*:

Zn 0,28 (0,17–0,40) > Cu 0,14 (0,078–0,24) > Cd 0,06 (0,007–0,12) > Mn 0,058 (0,01–0,22) ≈ Pb 0,057 (0,00003–0,110) > Ni 0,035 (0,015–0,05) > Co 0,007 (0,0004–0,01) > Fe 0,002 (0,001–0,004).

#### *Thymus marschallianus*:

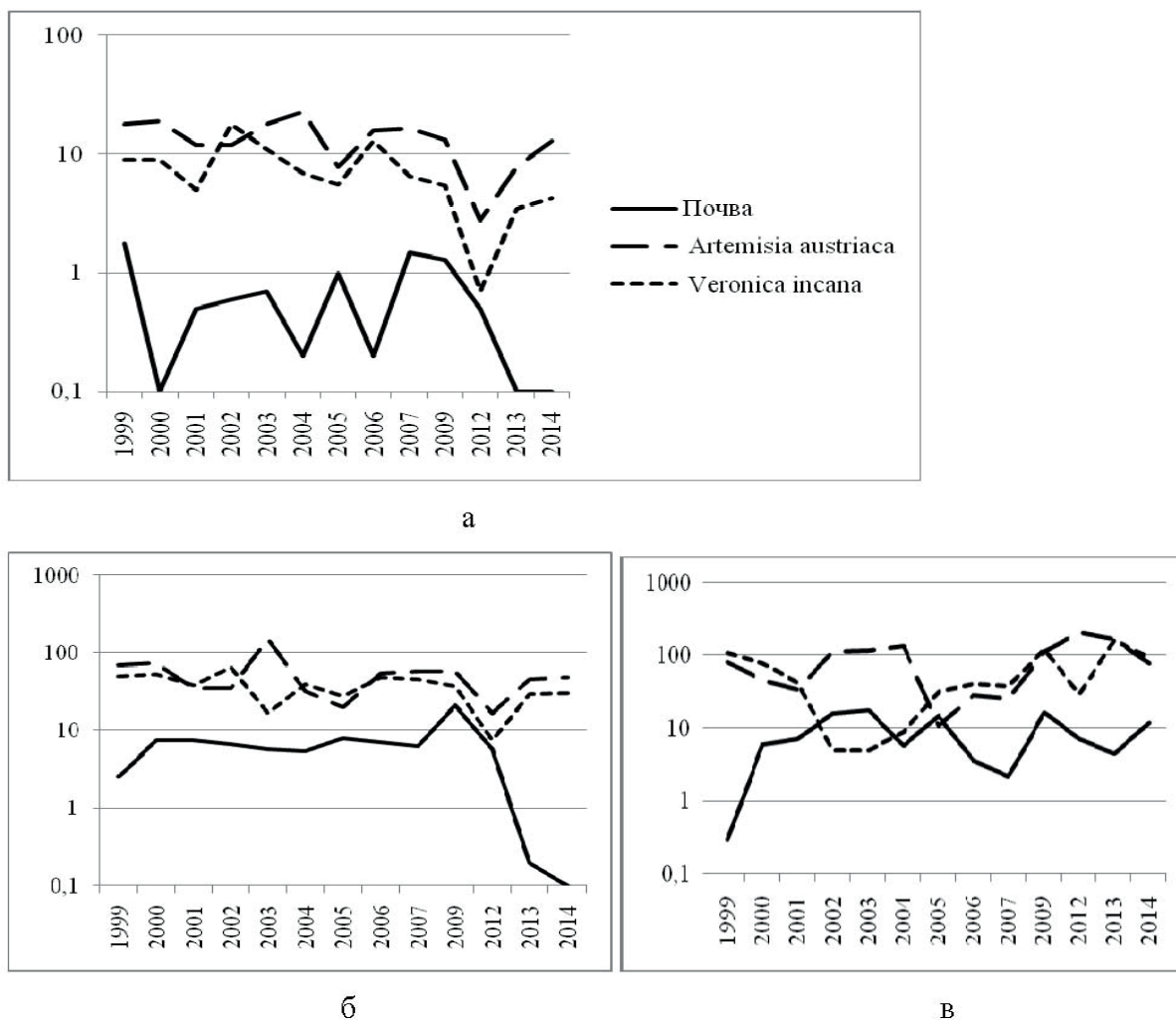
Zn 0,40 (0,3–0,6) > Cu 0,20 (0,13–0,2) > Mn 0,2 (0,13–0,2) > Pb 0,10 (0,09–0,1), Ni 0,07 (0,04–0,08) > Co 0,01 (0,01–0,02) > Fe 0,003 (0,001–0,006).

Сравнительный анализ химического состава индикаторных видов растений за период 1999–2014 гг. свидетельствует об увеличении содержания ТМ во

влажные годы. Это хорошо согласуется с отмеченными выше закономерностями изменения химизма укусов биомассы. Вместе с тем, прямой зависимости концентрации ТМ в биомассе от содержания их подвижных форм в почве не отмечается. Значение коэффициента корреляции варьируется от –0,4 до +0,2. По-видимому, повышенную интенсивность вовлечения ТМ в биологический круговорот и увеличение их концентрации в надземной биомассе растений определяет возрастание микробиологической активности. Образовавшиеся в результате деятельности микроорганизмов доступные растениям формы ТМ (прежде всего Zn и Cu) легко поглощаются и накапливаются в дикорастущих видах, обладающих естественной устойчивостью к повышенному содержанию рудных элементов. Как было показано ранее на примере *Salvia stepposa* [1, 2, 8, 17], на Южном Урале отмечается формирование металлофитных популяций растений, устойчивых к избытку Cu и Zn в среде обитания.

Сопряженный анализ изменения содержания ТМ в растениях и почве по годам показал, что микроэлементный состав растений определяется содержанием подвижных форм ТМ в почве, однако зависимость эта имеет некоторую отсрочку по времени. ТМ, поступающая в почву с опадом, становятся доступными для растений не сразу, а только после переработки их почвенными микроорганизмами. Как видно на рис. 6, динамика содержания Cu, Zn и Fe в растениях и почве имеет, в целом, сходный вид, но с определенным смещением во времени на один-два (иногда три) года. Вместе с тем, наблюдается межвидовая специфика аккумуляции ТМ растениями, так что отмеченная закономерность проявляется в изученных видах в разной степени. Таким образом, несмотря на низкие значения коэффициента корреляции, можно наблюдать достаточно сильную связь между изменением содержания микроэлементов в почве и растениях.

Большое влияние на аккумуляцию химических элементов в растениях оказывает положение ПТК в пределах элементарного геохимического ландшафта. Накопление ТМ в растениях фоновых ПТК Красноуральско-Сибай-Гайской рудоносной зоны изме-



**Рис. 6.** Изменение содержания (мг/г) подвижных форм Cu (а), Zn (б) и Fe (в) в почве, в *Artemisia austriaca* и *Veronica incana* на фоновой площади Красноуральско-Сибай-Гайской рудоносной зоны (мг/кг)

няется в зависимости от характера местообитания и увеличивается при переходе от элювиальных фаций к подчиненным, а также независимо от положения ПТК в рельефе при близком залегании обогащенных горных пород (рис. 7).

В зоне воздействия предприятий горнорудного производства в растениях увеличивается содержание ТМ типоморфных для медноколчеданной минерализации – Cu, Zn, Fe, Pb и Cd (табл. 6). Так, например, в *Artemisia austriaca* на модельной площади вблизи оз. Култубан наблюдается превышение РКР по Zn (2 РКР) и Cd (39 РКР). На участке у п. Старый Сибай, в зоне воздействия Сибайского карьера, небольшие превышения РКР фиксируются по Fe, Cu, Zn и значительные – по Pb (2 РКР) и Cd (24 РКР). Вблизи хвостохранилища СОФ наблюдается высокая аккумуляция ТМ на уровне: Fe – 3 РКР, Cu – 2,5 РКР, Pb – 2 РКР, Zn – 3 РКР, Cd – 26 РКР.

Содержание Cu в видах-концентраторах *Artemisia austriaca*, *Echinops ritro*, *Thymus marschallianus* и *Veronica incana* колеблется в пределах от 14 до 84 мг/кг, что до 6,5 раз превышает РКР Южного Урала и в 2–10 раз выше кларка по В.В. Добровольскому (рис. 8). Наибольшая концентрация ее наблюдается в *Salvia stepposa* на модельной площади у п. Калининское (рис. 9). В условиях техногенно загрязненных ПТК, также как и на территории естественных ге-

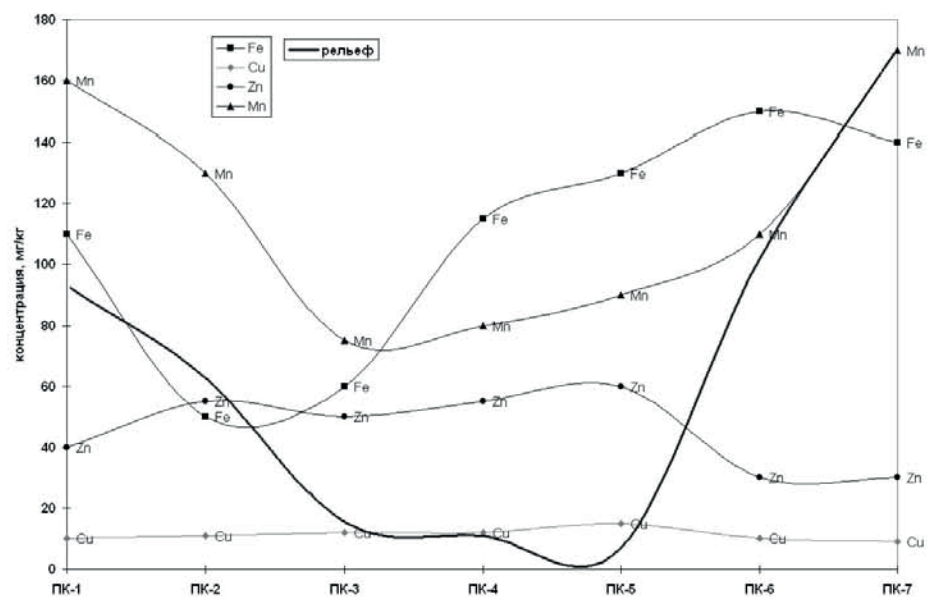
охимических аномалий, высокой аккумулярующей способностью Cu и Zn обладает *Artemisia austriaca* (рис. 10).

Максимальное содержание Zn наблюдается в *Salvia stepposa* (71 мг/кг), *Artemisia austriaca* (157 мг/кг) и *Galium verum* (69 мг/кг), что в 2–5 раз превышает кларк растений (30 мг/кг). В остальных же видах концентрация Zn находится на уровне РКР Южного Урала (43 мг/кг).

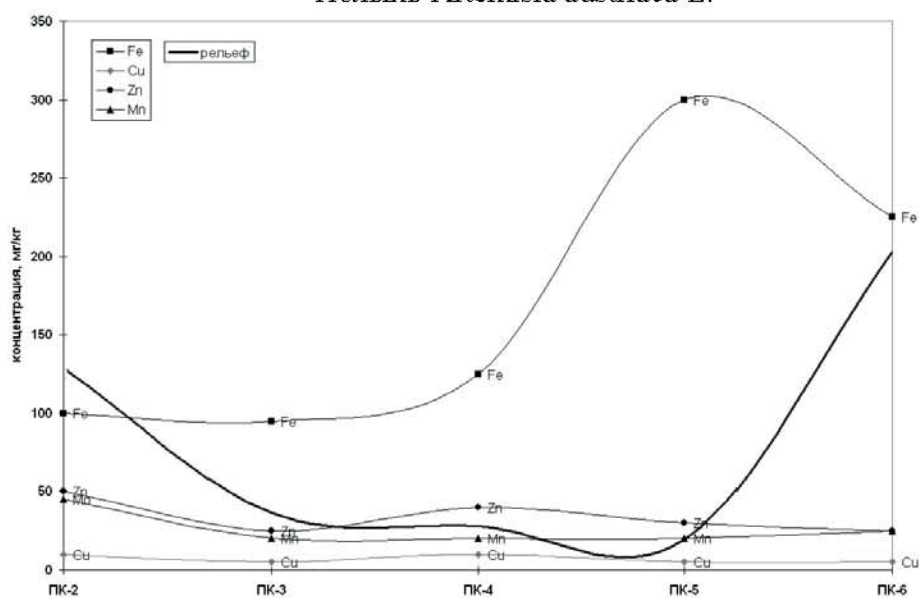
Содержание Pb практически во всех изученных видах растений выше кларка растений по В.В. Добровольскому в среднем в 1,5 раза. В *Galium verum* содержание его достигает 15 мг/кг, что в 12 раз превышает указанный показатель (1,25 мг/кг).

Практически во всех изученных видах растений наблюдаются повышенные содержания Fe (135–244 мг/кг) – в 1,5–2 раза больше РКР. Содержание Ni в растениях находится в пределах нормы и не превышает РКР и кларк растений по В.В. Добровольскому. Так же как и на других модельных площадях, растения техногенно трансформированных ПТК отличаются низким содержанием Mn (10–90 мг/кг, что в 2–10 раз ниже РКР).

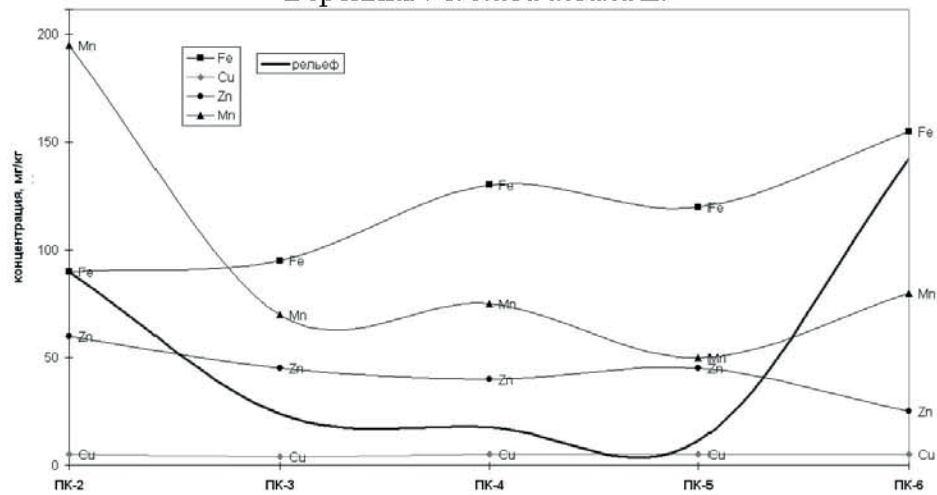
На территории г. Сибай отмечается повышенная концентрация Zn, Cd, Fe и Cu в корке тополя *Populus nigra* L., превышающая РКР в 1,5–2 раза. Максимальное накопление ТМ типоморфных для медноколчеданного



Полынь *Artemisia austriaca* L.

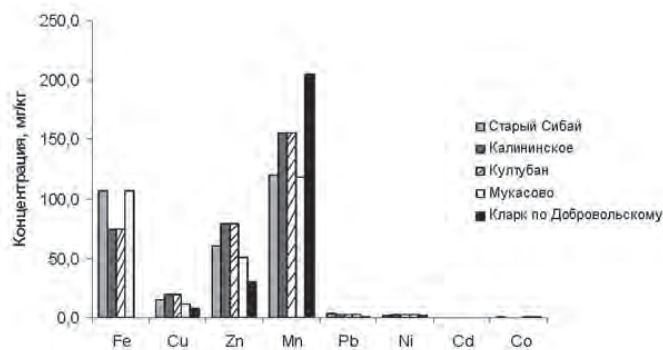


Вероника *Veronica incana* L.

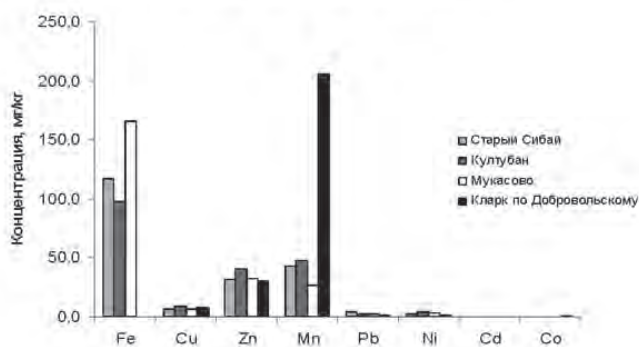


Чабрец *Thymus marschallianus* L.

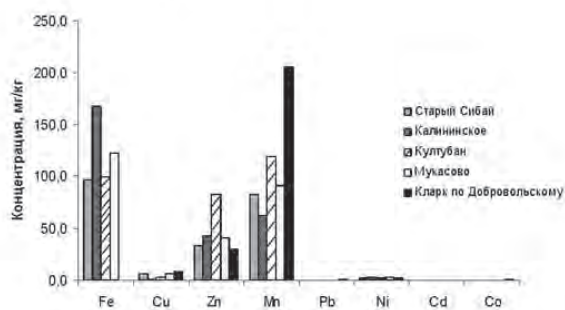
**Рис. 7.** Изменение концентрации ТМ в растениях по профилю фоновых ПТК Красноуральско-Сибай-Гайской рудной зоны (п. Мукасово)



Полынь *Artemisia austriaca L.*

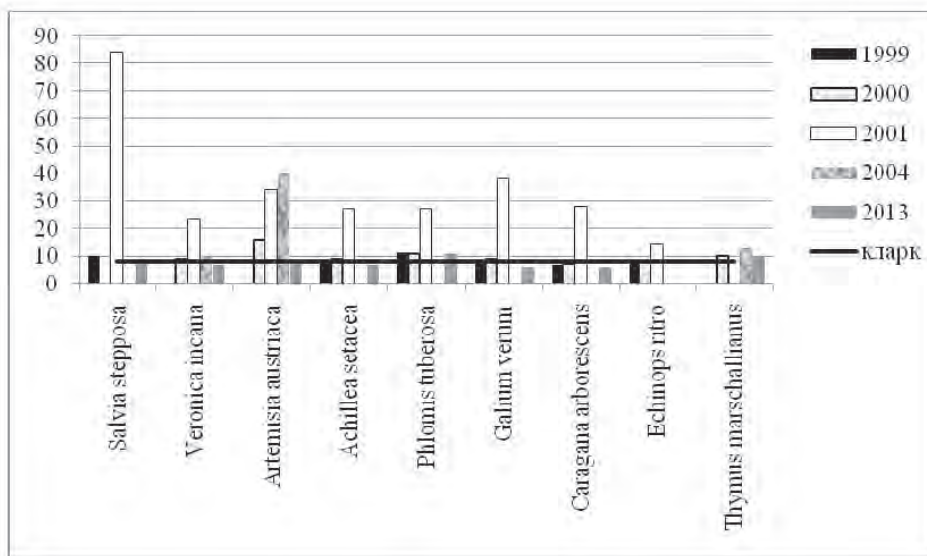


Вероника *Veronica incana L.*

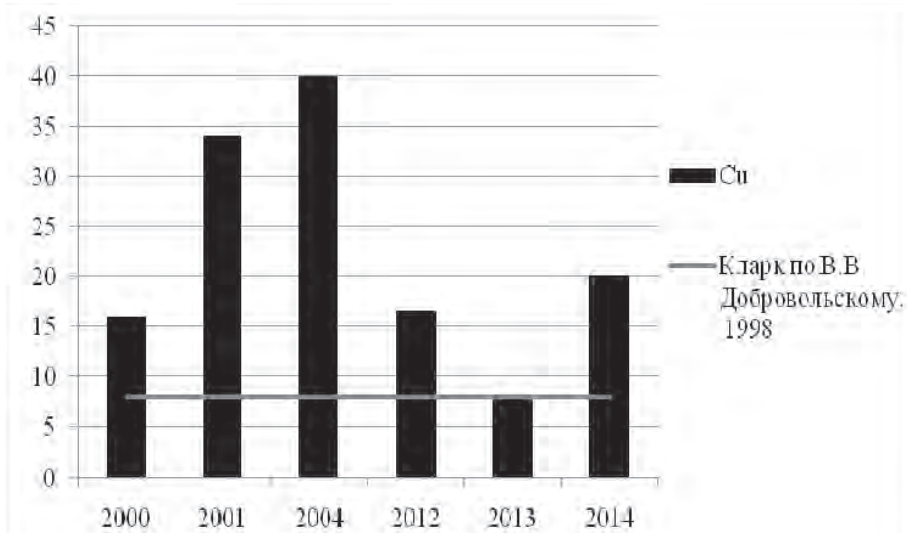


Чабрец *Thymus marschallianus L.*

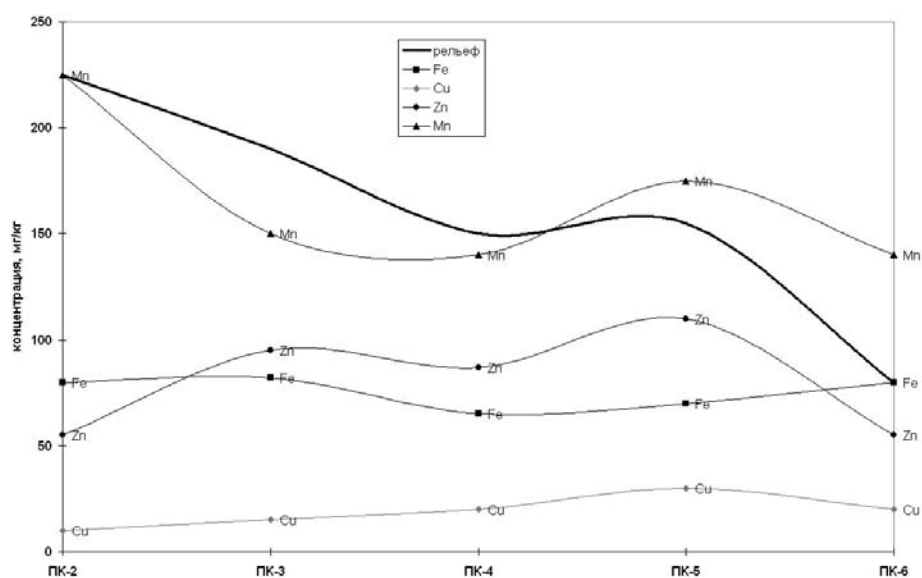
**Рис. 8.** Содержание ТМ в растениях техногенно трансформированных и фоновых ПТК Красноуральско-Сибай-Гайской рудоносной зоны



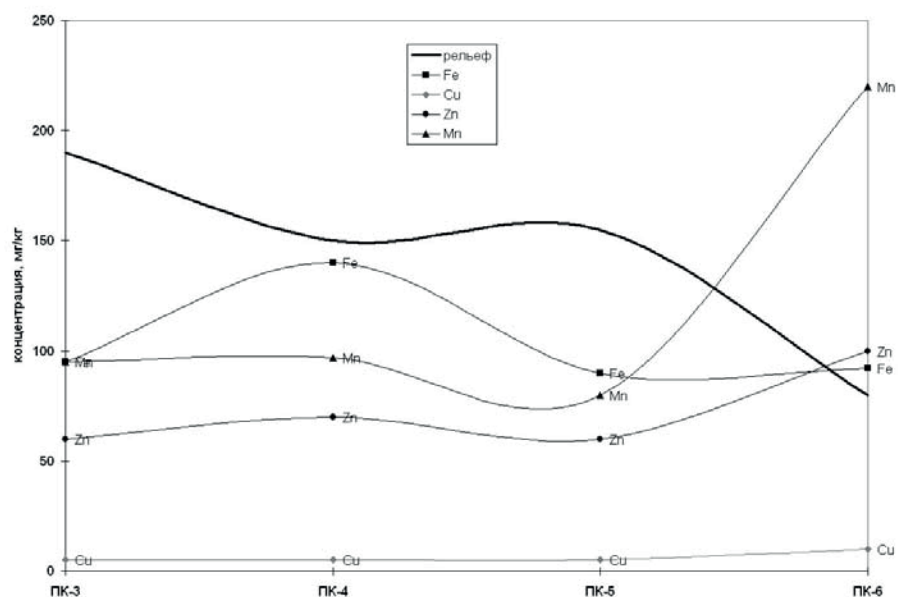
**Рис. 9.** Содержание (мг/кг воздушно-сухого вещества) Cu в растениях пастбищных угодий п. Калининское,



**Рис. 10.** Изменение содержание (мг/кг воздушно-сухого вещества) Cu в пыльце *Artemisia austriaca* вблизи п. Калининское



ПОЛЫНОК *Artemisia austriaca*



чабрец *Thymus marschallianus* L.

**Рис. 11.** Изменение концентрации ТМ в растениях по профилю (оз. Култубан)

оруденения отмечается вблизи СОФ и отвалов Сибайского карьера. Увеличение содержания ТМ в корке тополя наблюдается также в центральной части города, что связано с аэротехногенным загрязнением от автотранспорта и локальных источников загрязнения на селитебной территории.

Однако следует отметить, что абсолютные концентрации всех металлов значительно меняются по годам, что обусловлено изменением погодных условий. В засушливые годы, когда подвижность ТМ минимальна, поступление их в растения снижено и накопление в биомассе невелико. Превышение по годам максимального значения над минимальным может достигать 3–5 раз. Поэтому независимо от степени изученности территории необходимо ежегодное определение локальных фоновых значений металлов в растениях. В пределах элементарного геохимического ландшафта, как и на фоновой территории, отмечается повышение содержания ТМ при близком залегании горных пород, а также при переходе от элювиальных к иллювиальным и подчиненным фациям. Особенно это характерно для Zn, Cu, Fe и Mn (рис. 11).

Изученные растения на антропогенно загрязненных участках наиболее активно аккумулируют Cu и Zn. Это отчетливо видно из приведенных рядов биологического поглощения ТМ. Существенных различий в избирательности отдельных видов непривычных концентраторов не наблюдается. Исключение составляет *Veronica incana*, характеризующаяся преимущественным накоплением Zn, который выходит в ряду Кб на первое место и имеет значение, несколько превышающее показатель для Cu. Ряды химических элементов по интенсивности вовлечения ТМ в биологический круговорот изученными видами растений представлены ниже.

#### Модельная площадь вблизи хвостохранилища СОФ, п. Калининское

*Salvia stepposa* Cu (3,7) > Zn (1,2) > Pb (0,1) > Mn (0,01) > Ni (0,001) > Fe (0,009)  
*Veronica incana* Zn (1,1) > Cu (1,0) > Pb (0,4) > Mn (0,02) > Ni (0,01) > Fe (0,006)  
*Artemisia austriaca* Cu (1,5) > Zn (1,2) > Pb (0,08) > Mn (0,07) > Ni (0,01) > Fe (0,007)  
*Achillea setacea* Cu (1,2) > Zn (0,8) > Pb (0,08) > Mn (0,05) > Ni (0,006) = Fe (0,006)  
*Phlomis tuberosa* Cu (1,2) > Zn (0,7) > Pb (0,08) > Mn (0,04) > Ni (0,014) > Fe (0,001)  
*Galium verum* Cu (1,7) > Zn (1,2) > Pb (0,61) > Mn (0,06) > Ni (0,01) > Fe (0,006)  
*Caragana arborescens* Cu (1,2) > Zn (0,8) > Pb (0,08) > Mn (0,05) > Ni (0,02) > Fe (0,004)  
*Echinops ritro* Cu (0,6) > Zn (0,4) > Pb (0,03) > Mn (0,01) > Ni (0,01) > Fe (0,001)

#### Модельная площадь вблизи оз. Култубан (2005 и 2014 гг.):

*Artemisia austriaca*: Cd 1,24 (0,56–1,92) > Zn 0,37 (0,30–0,40) > Cu 0,16 (0,12–0,21) > Pb 0,05 (0,01–0,09) > Ni 0,02 (0,01–0,02) ≈ Mn 0,01 (0,01–0,02) > Fe 0,0015 (0,001–0,002) > Co 0,0005 (0,0004–0,0006).  
*Veronica incana*: Zn 0,28 (0,24–0,33) > Pb 0,06 (0,03–0,1) ≈ Cu 0,06 (0,06–0,07) > Cd 0,05 (0,001–0,10) > Ni 0,01 (0,01–0,012) > Mn 0,007 (0,006–0,008) > Co 0,004 (0,0002–0,0080) ≈ Fe 0,003 (0,0002–0,005).

Юбилейное месторождение, пастбищные угодья:  
*Artemisia austriaca* Zn (0,94) > Cu (0,52) > Mn (0,17) > Ni (0,13) > Fe (0,001)

*Veronica incana* Zn (0,42–0,53) > Cu (0,21–0,6) > Pb, Ni (0,05–0,09) > Mn (0,03–0,05) > Fe (0,002)

*Echinops ritro* Cu (0,52) > Zn (0,44) > Pb (0,1) > Mn (0,05) > Ni (0,04) > Fe (0,001)

*Achillea setacea* Zn (0,95–0,47) > Cu (0,81–0,59) > Ni (0,1–0,07) > Pb (0,08–0,09) > Mn (0,014–0,05) > Fe (0,002–0,001)

*Caragana arborescens* Zn (0,59–0,25) > Cu (0,19–0,32) > Ni (0,03–0,24) > Pb (0,1) > Mn (0,02–0,14) > Fe (0,001–0,002)

В условиях антропогенного загрязнения отмечается увеличение интенсивности вовлечения ТМ в биологический круговорот. Как видно из приведенных рядов Кб, меняется не только последовательность ТМ, но и их количественные показатели. При этом интенсивность поглощения ТМ значительно возрастает, так что значения Кб Zn и Cu у видов-концентраторов, адаптированных к их высоким концентрациям в естественных ПТК, становятся больше 1. По интенсивности аккумуляции ТМ разными видами растений можно построить следующие обобщенные ряды.

Cu *Salvia stepposa* > *Galium verum* > *Artemisia austriaca* > *Caragana arborescens* > *Phlomis tuberosa* = *Achillea setacea* > *Veronica incana* > *Echinops ritro*  
 Zn *Salvia stepposa* > *Galium verum* = *Artemisia austriaca* > *Veronica incana* > *Achillea setacea* > *Caragana arborescens* > *Phlomis tuberosa* > *Echinops ritro*

Fe *Salvia stepposa* > *Artemisia austriaca* > *Galium verum* > *Veronica incana* > *Achillea setacea* > *Caragana arborescens* > *Phlomis tuberosa* > *Echinops ritro*

Mn *Artemisia austriaca* > *Galium verum* > *Achillea setacea* = *Caragana arborescens* > *Veronica incana* > *Salvia stepposa* = *Echinops ritro*

Pb *Galium verum* > *Veronica incana* > *Salvia stepposa* > *Artemisia austriaca* = *Achillea setacea* = *Phlomis tuberosa* = *Caragana arborescens* > *Echinops ritro*

Ni *Caragana arborescens* > *Galium verum* > *Artemisia austriaca* > *Veronica incana* > *Echinops ritro* > *Achillea setacea*

### Выводы

Анализ изменения химического состава растений Башкирского Зауралья под воздействием природных и антропогенных факторов позволяет сделать следующие выводы.

Изученные растения Башкирского Зауралья характеризуются повышенным содержанием серы и ТМ типоморфных для медноколчеданных руд (Cu, Zn, Fe, Pb и Cd) по сравнению с кларком по В.В. Добровольскому (1998). Максимальные их концентрации обнаружены в разнотравье и ветоши. Злаки и осоки характеризуются относительно низким и стабильным содержанием изученных химических элементов.

Уровень содержания ТМ существенно меняется в зависимости от комплекса природных и антропогенных факторов. Основным источником поступления ТМ в растения степных ПТК являются почвы. Важнейшими почвенными факторами, определяющими



химизм растений в условиях естественных геохимических аномалий исследованной территории, служат породный и миграционный, а также зональность рудных ореолов рассеяния. Большое влияние на интенсивность поглощения ТМ растениями степных ПТК оказывает количество атмосферных осадков, определяя микробиологическую активность, а с ней и степень доступности металлов растениям и интенсивность биогеохимического круговорота. В зависимости от погодных условий содержание химических элементов в растениях в различные годы в одних и тех же ПТК может изменяться в несколько раз.

Прямой корреляции между аккумуляцией ТМ в биомассе растений и содержанием их подвижных форм в почвах не наблюдается. В большинстве индикаторных видов растений отмечается временной сдвиг в один-два года в ходе их изменений. В качестве буферной среды, определяющей интенсивность биогеохимического круговорота в системе почва–растение, выступает ветошь (очес), скорость разложения которой зависит от микробиологической активности и благоприятного соотношения температурного режима и увлажнения почв.

Антропогенное загрязнение ТМ и подкисление почвенных растворов способствует резкому усилению поступления поллютантов в растения. В условиях техногенеза концентрация серы и ТМ в растениях превышает локальный фон у дикоросов в 6–10 раз, у культурных растений – в 10–20 раз. Ответная реакция растений на антропогенное загрязнение имеет видоспецифичный характер. К растениям-концентраторам серы относятся *Artemisia austriaca*, *Salvia stepposa*, *Veronica incana*, *Galium verum*, *Thymus marschallianus* и грибы шампиньоны *Agaricus arvensis*. Наиболее чувствительными видами к антропогенному загрязнению ТМ являются полынь австрийская *Artemisia austriaca* (концентратор Cu, Pb, Cd и Zn), шалфей степной *Salvia stepposa* (концентратор Cu, Zn и Fe) и чабрец Маршалла *Thymus marschallianus* (концентратор Zn, Pb и Fe).

В связи с высокой изменчивостью подвижности ТМ в почвах Башкирского Зауралья и значительным варьированием концентрации ТМ в растениях при проведении экологических исследований независимо от степени изученности территории необходимо ежегодное определение локального фонового содержания ТМ в почвах и растениях.

## Литература

### Список русскоязычной литературы

1. Алексеева-Попова Н.В., Игошина Т.И. Устойчивость к тяжелым металлам (Pb, Zn, Cu) отдельных видов и популяций естественных фитоценозов из района медно-колчеданных рудопроявлений. В кн.: Растения в экстремальных условиях минерального питания. Л.; 1983, с. 22-42.
2. Алексеева-Попова Н.В. Клеточно-молекулярные механизмы металлоустойчивости растений. В кн.: Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов. Л.; 1991, с. 5-15.
3. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: Высшая школа; 1998.
4. Кабата-Пендиас А, Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир; 1989.
5. Ковальский В.В., Кривицкий В.А., Алексеева С.А., Летунова С.В., Опекунова М.Г., Скарлыгина-Уфимцева М.Д., Берман Ш., Илзиль А., Петерсон Н., Жогова Е.П., Рублик Р.Я. Южно-Уральский субрегион биосферы. Труды биогеохимической лаборатории. 1981;19:3-64.
6. Кузмина Г.Ш., Ягафарова Г.А., Янтурин С.И. Исследование содержания тяжелых металлов в почвах и растительности в окрестностях недействующих и отработанных карьеров Башкирского Зауралья. Концепт. 20:2426-30.
7. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г. Геохимия техногенеза в районе разработки Сибайского медно-колчеданного месторождения. Записки Горного института. 2013;203:196-204.
8. Опекунова М.Г. Особенности накопления цинка, марганца и железа *Salvia stepposa* при различном уровне меди в среде обитания. Тр.

VII Конф. молод. ученых Бот. ин-та АН СССР; Л.; 1985, с. 127-34.

9. Опекунова М.Г. Особенности почв аномальных фаций степных биогеохимических провинций Южного Урала. Вест. ЛГУ. 1987;(1):38-46.

10. Опекунова М.Г., Алексеева-Попова Н.В., Арестова И.Ю., Грибалев С.В., Краснов Д.А., Бобров Д.Г., Осипенко О.А., Соловьева Н.И. Тяжелые металлы в почвах и растениях Южного Урала. I. Экологическое состояние фоновых территорий. Вестн. С.-Петерб. ун-та. 2001;(4):45-53.

11. Опекунова М.Г., Алексеева-Попова Н.В., Арестова И.Ю., Грибалев С.В., Краснов Д.А., Бобров Д.Г., Осипенко О.А., Соловьева Н.И. Тяжелые металлы в почвах и растениях Южного Урала. II. Экологическое состояние антропогенно нарушенных территорий. Вестн. С.-Петерб. ун-та. 2002;(1):63-71.

12. Опекунова М.Г., Арестова И.Ю., Елсукова Е.Ю. Методы физико-химического анализа почв и растений: методические указания. – СПб.: Изд-во СПбГУ; 2002.

13. Опекунова М.Г. Диагностика техногенной трансформации ландшафтов на основе биоиндикации (автореферат диссертации). СПб.: Изд-во СПбГУ; 2013.

14. Савельева Л.Е. К оценке уровней содержания свинца в почвах техногенных ландшафтов. В кн.: Тяжелые металлы в окружающей среде. М.: МГУ; 1980. с. 63-68.

15. Семенова И.Н., Ильбулова Г.Р. Оценка загрязнения почвенного покрова г. Сибай республики Башкортостан тяжелыми ме-

таллами. Фундаментальные исследования. 2011;(8–3):491-5.

16. *Скарлыгина-Уфимцева М.Д., Березкина Г.А., Черняхов В.Б.* Биогеохимические особенности медноколчеданных месторождений Южного Урала. – Л.; 1976.

17. *Скарлыгина-Уфимцева М.Д., Опекунова М.Г.* Биологические реакции *Salvia stepposa* Schost. на высокое содержание Cu и Zn в среде обитания. Вестн ЛГУ; 1987;(2):77-84.

#### Общий список литературы/Reference List

1. *Alekseyeva-Popova N.V., Igoshina T.I.* [Tolerance of some species and populations to heavy metals (Pb, Zn, Cu) in natural phytocoenoses of chalcopirite field]. In: *Rasteniya v Eksremalnykh Usloviyakh Mineralnogo Pitaniya*. Leningrad; 1983. p. 22-42. (In Russ.)

2. *Alekseyeva-Popova N.V.* [Cellular-molecular mechanisms of plants' tolerance to metals]. In: *Ustoychivost k Tyazhelym Metallam Dikorastushchikh Vidov*. Leningrad; 1991. p. 5-15. (In Russ.)

3. *Dobrovolskiy V.V.* *Osnovy Biogeokhimii*. Moscow: Vysshaya Shkola; 1998. (In Russ.)

4. *Kabata-Pendias A., Pendias Kh.* *Mikroelementy v Pochvakh i Rastenyakh*. Moscow: Mir; 1989. (In Russ.)

5. *Kovalskiy V.V., Krivitskiy V.A., Alekseyeva S.A., Letunova S.V., Opekunova M.G., Skarlygina-Ufimtseva M.D., Berman Sh., Ilzin A., Peterson N., Zhogova Ye.P., Rublik R.Ya.* [The South Ural subregion of the biosphere]. *Trudy Biogeokhimicheskoy Laboratorii*. 1981;19:3-64. (In Russ.)

6. *Kuzhina G.Sh., Yagafarova G.A., Yanturin S.I.* [The study of content of heavy metals in soils and vegetation in the vicinity of inactive and waste quarries the Bashkir Zauralye]. *Kontsept*. 20:2426-30. (In Russ.)

7. *Opekunov A.Yu., Opekunova M.G.* [Technogenic geochemistry in the development of Sibai chalcopirite field]. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2013;203:196-204. (In Russ.)

8. *Opekunova M.G.* [Features of zinc, manganese and iron accumulation in *Salvia stepposa* at different levels of copper in the environment].

In: *Trudy VII Konferentsii Molodykh Uchenykh Botanicheskogo Instituta AN SSSR*; Leningrad; 1985. p. 127-34. (In Russ.)

9. *Opekunova M.G.* [Soils' features in anomal facies of South Ural's steppe biogeochemical provinces]. *Vestnik LGU*. 1987;(1):38-46. (In Russ.)

10. *Opekunova M.G., Alekseyeva-Popova N.V., Arestova I.Yu., Gribalev S.V., Krasnov D.A., Bobrov D.G., Osipenko O.A., Solovyeva N.I.* [Heavy metals in soils and plants of the South Urals. I. Ecology of background territories]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta*. 2001;(4):45-53. (In Russ.)

11. *Opekunova M.G., Alekseyeva-Popova N.V., Arestova I.Yu., Gribalev S.V., Krasnov D.A., Bobrov D.G., Osipenko O.A., Solovyeva N.I.* [Heavy metals in soils and plants of the South Urals. II. Ecology of destroyed territories]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta*. 2002;(1):63-71. (In Russ.)

12. *Opekunova M.G., Arestova I.Yu., Elsukova Ye.Yu.* *Metody Fisiko-Khimicheskogo Analisa Pochv i Rasteny: Metodicheskie Ukazaniya*. Saint Petersburg: Izdatelstvo SPbGU; 2002. (In Russ.)

13. *Opekunova M.G.* *Diagnostika Tekhnogennoy Transformazii Landshaftov na Osnove Bioindikatsii*. PhD Theses. Saint Petersburg: Saint-Petersburg State University; 2013. (In Russ.)

14. *Savelyeva L.Ye.* [Note about lead levels assessment in soils of technogenic landscapes]. In: *Tyazhelye Metally v Okruzhayushchey srede*. Moscow: MGU; 1980. p. 63-68. (In Russ.)

15. *Semenova I.N., Ilbulova G.R.* [Assessment of soil pollution, heavy metals in Bashkortostan Sibai]. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2011;(8–3):491-5. (In Russ.)

16. *Skarlygina-Ufimtseva M.D., Berzskina G.A., Chernyakhov V.B.* *Biogeokhimicheskiye Osobnosti Mednokolchedannykh Mestorozhdeniy Yuzhnogo Urala*. Leningrad; 1976. (In Russ.)

17. *Skarlygina-Ufimtseva M.D., Opekunova M.G.* [*Salvia stepposa* Schost. biological response to Cu and Zn high content in the environment]. *Biologicheskiye reaktzii Salvia stepposa* Schost. na vysokoe soderzhaniye Cu i Zn v srede obitaniya. *Vestnik LGU*. 1987;(2):77-84. (In Russ.)

