

Использование биоиндикационных свойств растительности при оценке трансформации ландшафтов в районе разработки Сибайского медно-колчеданного месторождения (Южный Урал)

М. Г. ОПЕКУНОВА, А. Ю. ОПЕКУНОВ, Э. Э. ПАПЯН, В. В. СОМОВ

Санкт-Петербургский государственный университет
199178, Санкт-Петербург, ВО 10-я линия, 33/35
E-mail: m.opekunova@mail.ru

Статья поступила 22.11.2016

Принята к печати 09.12.2016

АННОТАЦИЯ

Рассмотрено изменение биогеохимических, морфологических, флористических и фитоценологических признаков растительности в районе разработки Сибайского медно-колчеданного месторождения на различном удалении от объектов горно-промышленного комплекса. Изучено содержание тяжелых металлов (ТМ) (Cu, Zn, Fe, Pb, Cd, Ni, Co, Cr и Mn) в почвах, природных водах, донных осадках, укосах наземной биомассы и растениях *Artemisia austriaca*, *Salvia stepposa*, *Thymus marschallianus*, *Veronica incana*, *Caragana frutex*, *Phlomis tuberosa*, *Achillea setacea*, *Galium verum*, *Phragmites australis*. На основе расчета коэффициентов межвидовой сопряженности растений выделены плеяды видов, отвечающих экологическим условиям местообитаний и интенсивности антропогенного воздействия. Предложен набор биоиндикационных признаков для оценки трансформации природных комплексов под влиянием горно-рудного производства.

Ключевые слова: растения, горно-рудное производство, окружающая среда, тяжелые металлы, загрязнение, биоиндикация.

Башкирское Зауралье относится к основным горно-промышленным регионам России. Здесь сосредоточены полиметаллические, медно-колчеданные, марганцевые и другие месторождения, на базе которых функционируют крупнейшие горно-добывающие предприятия цветной металлургии. Их деятельность приводит к значительной трансформации окружающей среды. Примером служит г. Сибай и его окрестности, где в 1940-х гг.

начал работать Башкирский медно-серный комбинат (БМСК), добывающий и обогащающий медно-колчеданные руды. Только в 2014 г. здесь образовано более 800 тыс. т вскрышных пород, а в хвостохранилище размещено около 1 млн т хвостов обогащения [Обзор..., 2015].

В результате производственной деятельности тяжелые металлы (ТМ) и мышьяк поступают в природные воды и почвы, участву-

ют в латеральной и радиальной миграции, вовлекаются в биологический круговорот. Вокруг объектов горно-рудных предприятий выявлены зоны экологического кризиса [Обзор..., 2015]. Техногенные ореолы и потоки рассеяния накладываются на естественно повышенный фон содержания ТМ в компонентах ландшафта, увеличивая риск негативного воздействия на здоровье населения.

Цель исследования – сравнительное изучение и выявление наиболее информативных биоиндикационных показателей для оценки антропогенной трансформации природно-территориальных комплексов (ПТК) в зоне воздействия горно-рудных предприятий.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектом исследования служили лесостепи и степи Башкирского Зауралья на переходе восточных хребтов и предгорий Южного Урала в Зауральский пенеПЛен. Здесь выделяется несколько рудоносных зон, к числу которых относится Красноуральско-Сибай-Гайская с высокими концентрациями Cu, Zn, Cd, Ni, Co, Mn и других металлов во всех компонентах ландшафтов [Ковальский и др., 1981].

С 1998 г. ежегодно проводятся комплексные экологические исследования в зоне воздействия горно-рудных предприятий [Опеку-

нова и др., 2001, 2015; Опекунов, Опекунова, 2013; и др.]. Изучаются ПТК, расположенные на различном удалении от источников загрязнения, по мере нарастания антропогенного стресса (рис. 1).

Детально изучены водные объекты района (озера Култубан, Талкас, р. Карагайлы). Река Карагайлы протекает в зоне непосредственного воздействия БМСК (отвалы, Сибайская обогатительная фабрика – СОФ, хвостохранилища). Она имеет длину более 11 км, пересекает город с юго-запада на северо-восток, дренируя в верхнем течении отвалы вскрышных пород Сибайского карьера, и впадает в р. Худолаз. В нижнем течении вблизи реки размещается свалка бытовых отходов.

Для оценки состояния ПТК использовали методы эталонов и экологического профилирования, а также комплекс биогеохимических, флористических и фитоценологических методов. На каждом из участков закладывали почвенные разрезы и отбирали образцы из всех генетических горизонтов. На пикетах в пределах почвенной катены осуществляли отбор проб почв из поверхностного горизонта методом конверта. Особое внимание уделяли составу и структуре фитоценозов, изучали морфологическую изменчивость растений и запасы биомассы, отбирали на химический анализ пробы различных агроботанических групп (общий укос, злаки, разнотра-

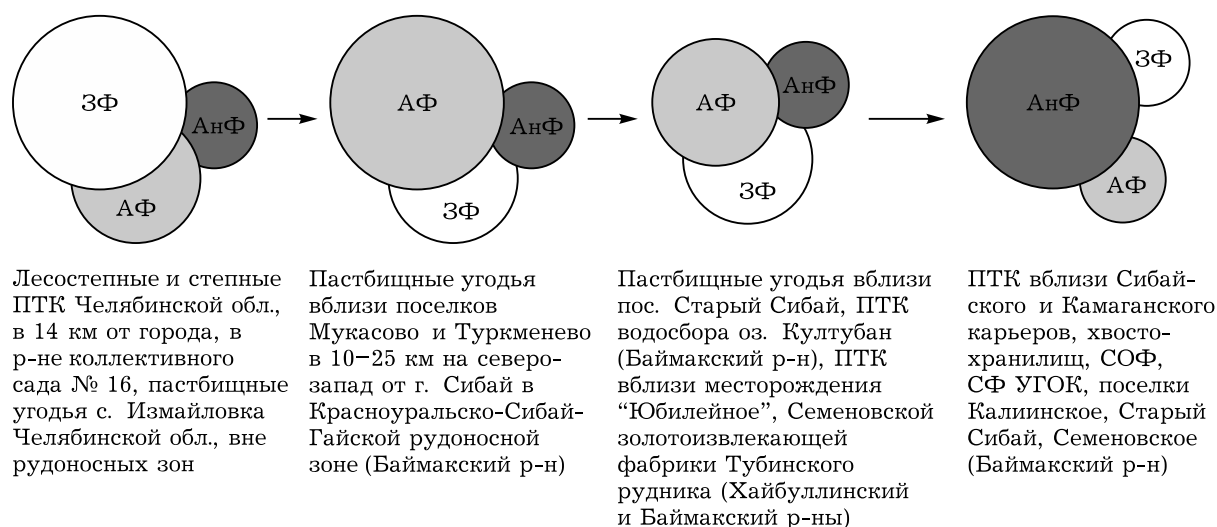


Рис. 1. Соотношение зональных (ЗФ) и аazonальных факторов (АФ) в биогеохимическом круговороте в исследованных ПТК по мере роста антропогенной нагрузки (АнФ)

вье, бобовые, осоки, кустарники, ветошь) и дикорастущих видов растений (*Artemisia austriaca* Jack., *Salvia stepposa* Schost., *Thymus marschallianus* Willd., *Veronica inca-na* L., *Caragana frutex* L., *Phlomis tuberosa* L., *Achillea setacea* Waldst. et Kit., *A. milifolium* L., *Galium verum* L., *Echinops ritro* L., *Potentilla humifusa* Willd. ex Schlecht., *Medicago falcata* L., *Verbascum phoeniceum* L., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.).

Содержание химических элементов в почвах, природных водах, донных осадках и растениях определяли в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), а их подвижные формы с использованием ацетатно-аммонийного буфера (рН 4,8) – методом атомно-абсорбционной спектроскопии в лаборатории геоэкологического мониторинга СПбГУ и БИН РАН. При оценке видового разнообразия и флористических особенностей ПТК использовали нелинейный графический метод дендритов с выделением плеяд, тесно связанных между собой видов [Терентьев, 1959]. При расчете межвидовой сопряженности применяли коэффициент ранговой корреляции Бравэ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание ТМ в почвах. Все компоненты фоновых ПТК рудоносной зоны (пос. Мукасово), расположенных в 10–15 км к северу от Сибайского горно-рудного комплекса, характеризуются повышенным уровнем Cu, Zn и Fe (табл. 1). Валовое содержание Cu и Zn в почвах в 2–3 раза превышает фон для черноземов. Концентрация Ni, Pb и Co в почвах фоновых ПТК невелика и стабильна как в пространстве (по элементам рельефа), так и во времени (с 1998 по 2015 г.).

Почвы степных геосистем Башкирского Зауралья характеризуются низким содержанием подвижных форм ТМ (см. табл. 1). В почвенном профиле оно изменяется незначительно. Доля подвижных форм металлов от валового содержания в почвах фоновых ПТК за период исследований значительно менялась и составляла для Cu, Zn, Ni и Pb – от 0,0n до 1,8, 5,5, 3,5 и 14 % соответственно.

Минимальные значения установлены для Fe – 0,04–0,17 %.

Наблюдается зависимость подвижности ТМ от погодных условий, что подтверждается U-критерием Манна – Уитни ($p < 0,05$). В дождливый период снижение величины рН до 5,8 и менее сопровождается значительным ростом мобильности катионогенных ТМ [Опекунов, Опекунова, 2013]. Концентрация подвижных форм Cu и Zn в почвах в этом случае может достигать 2 ПДК.

В зоне аэротехногенного загрязнения в 10 км к югу от отвалов Сибайского карьера и города Сибай на берегу оз. Култубан среднее содержание большинства ТМ в почвенной катене в 2 раза выше, чем на фоновой территории. В несколько раз возрастает концентрация и доля подвижных форм ТМ в почвах. Среднее за многолетний период количество подвижных форм Zn достигает ПДК.

Компоненты окружающей среды вблизи объектов Сибайского горно-рудного комплекса и города Сибай, характеризуются аномально высокими концентрациями ТМ, типоморфных для медно-колчеданной минерализации и селитебных зон. Средние валовые содержания большинства изученных ТМ в почвах в 1,5–10 раз превышают фоновые величины. На пробной площади около пос. Калининское, расположенной на расстоянии менее 1 км от СОФ и в 200 м от хвостохранилища БМСК, отчетливо проявляется загрязнение Cu и Zn, что приводит к резкому росту содержания подвижных форм ТМ в почвах. Вблизи горно-рудных предприятий доля их возрастает до 16–24 %. Аномально высокие валовые содержания Cu, Zn, Fe, Mn и Cd в почвах отмечены вблизи отвалов Сибайского карьера, а концентрация Cu, Zn и Cd в почвах на берегу искусственного пруда в русле р. Карагайлы в промышленной зоне города превышает ОДК соответственно в 6, 13 и 5 раз. Здесь же установлена максимальная доля подвижных форм изученных ТМ, а содержание Zn, Cu и Ni превышают ПДК соответственно в 38, 19 и 2,5 раза. В пробах грунта вблизи автодороги концентрация подвижных форм Pb достигает 2,5 ПДК.

Содержание ТМ в природных водах и донных осадках. Вода оз. Култубан характеризуется природным соотношением основных

Содержание тяжелых металлов в компонентах ПТК Башкирского Зауралья, мг/кг (мг/л для воды); среднее и стандартная ошибка среднего (уровень значимости 5 %)

Компонент	Cu		Zn	Ni	Fe	Mn	Pb	Co	Cd
	2	3	4	5	6	7	8	9	
Фоновая площадь, Сибайская Cu-Zn биогеохимическая провинция, окрестности пос. Мукасово									
Почвы, валовое содержание ($n = 122$)	61 ± 7	162 ± 14	26 ± 3	35 080 ± 2570	901 ± 210	22 ± 2	17 ± 2	0,13 ± 0,04	
Почвы, подвижные формы ($n = 176$)	0,75 ± 0,49	7,3 ± 1,2	0,6 ± 0,7	10,2 ± 2,2	44 ± 3,8	1,33 ± 0,28	0,19 ± 0,04	0,06 ± 0,02	
<i>Artemisia austriaca</i> ($n = 44$)	9,00 ± 0,90	37,4 ± 4,8	1,14 ± 0,29	114 ± 21	74 ± 15	1,74 ± 1,12	0,18 ± 0,06	0,32 ± 0,06	
<i>Veronica incana</i> ($n = 30$)	5,40 ± 0,51	30,7 ± 3,1	1,35 ± 0,41	140 ± 34	24 ± 4,3	1,05 ± 0,34	0,13 ± 0,06	0,08 ± 0,04	
<i>Thymus marschallianus</i> ($n = 18$)	5,62 ± 0,66	32 ± 5,2	1,68 ± 0,42	147 ± 52	51 ± 21	1,45 ± 0,53	0,12 ± 0,05	0,04 ± 0,03	
Фоновая площадь, Баймакская Au-Cu биогеохимическая провинция (берег оз. Талкас)									
Вода, мг/л ($n = 1$)	0,003	0,081	< 0,002	0,087	0,014	0,003	< 0,001	< 0,0005	
Донные осадки, валовое содержание ($n = 14$)	61,9 ± 9,4	75,2 ± 5,0	46,8 ± 8,5	31 000 ± 4000	1361 ± 310	13,5 ± 2,8	20,4 ± 3,6	0,25 ± 0,03	
Донные осадки, подвижные формы ($n = 12$)	1,12 ± 1,13	3,7 ± 1,4	1,2 ± 0,52	19,3 ± 11,1	462 ± 195	4,54 ± 1,50	0,60 ± 0,37	0,09 ± 0,04	
Почвы, валовое содержание ($n = 43$)	72 ± 9,1	107 ± 17	193 ± 65	28 394 ± 4765	1576 ± 329	23 ± 3,5	35 ± 4,8	0,22 ± 0,10	
Почвы, подвижные формы ($n = 43$)	0,47 ± 0,14	4,5 ± 1,9	0,83 ± 0,23	13,8 ± 5,6	96 ± 22	1,06 ± 0,29	0,29 ± 0,10	0,06 ± 0,03	
<i>Artemisia austriaca</i> ($n = 20$)	11,6 ± 2,1	30,5 ± 4,8	1,78 ± 0,37	110,4 ± 32	85 ± 31	1,07 ± 0,23	0,27 ± 0,07	0,36 ± 0,08	
<i>Veronica incana</i> ($n = 4$)	6,2 ± 1,3	26 ± 6,2	2,18 ± 0,57	247 ± 44	68 ± 50	1,17 ± 0,51	0,09 ± 0,13	0,05 ± 0,04	
<i>Thymus marschallianus</i> ($n = 14$)	6,2 ± 1,0	32 ± 11	2,41 ± 0,54	132 ± 48	42,3 ± 17,6	1,28 ± 0,45	0,16 ± 0,11	0,14 ± 0,09	
<i>Phragmites australis</i> ($n = 4$)	2,3 ± 0,5	10,2 ± 0,6	0,52 ± 0,01	36 ± 4,6	60 ± 25	0,54 ± 0,20	0,05 ± 0,03	0,02 ± 0,001	
Зона умеренного воздействия, берег оз. Кулгубан (10 км к югу от отвалов карьера)									
Вода, мг/л ($n = 1$)	0,004	0,055	0,003	0,232	0,070	0,004	< 0,001	< 0,0005	
Донные осадки, валовое содержание ($n = 8$)	165 ± 6,6	248 ± 23	34,4 ± 2,6	31 824 ± 2800	1268 ± 49	30,3 ± 3,5	14,4 ± 0,7	0,88 ± 0,16	
Донные осадки, подвижные формы ($n = 16$)	2,55 ± 0,57	14,6 ± 3,1	1,02 ± 0,14	40,6 ± 13,9	613 ± 94	6,0 ± 1,4	0,77 ± 0,21	0,2 ± 0,04	
Почвы, валовое содержание ($n = 41$)	216 ± 23	215 ± 32	70 ± 6	27 889 ± 4385	2736 ± 470	38 ± 12	27 ± 3	0,63 ± 0,15	
Почвы, подвижные формы ($n = 60$)	1,63 ± 0,50	22,5 ± 5,07	1,04 ± 0,32	34,1 ± 17,1	107 ± 17,7	1,30 ± 0,27	0,51 ± 0,14	0,17 ± 0,04	
<i>Artemisia austriaca</i> ($n = 49$)	11,8 ± 1,5	47 ± 6,5	1,34 ± 0,27	93 ± 27	82 ± 17	0,96 ± 0,18	0,22 ± 0,07	0,43 ± 0,15	
<i>Veronica incana</i> ($n = 32$)	7,06 ± 0,69	39 ± 4,3	1,69 ± 0,48	100 ± 26	31 ± 5,8	0,98 ± 0,26	0,15 ± 0,12	0,07 ± 0,02	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Thymus marschallianus</i> (n = 10)	5,71 ± 2,69	72 ± 13	2,13 ± 0,73	114 ± 45	98 ± 35	2,14 ± 1,06	0,05 ± 0,09	0,11 ± 0,08
<i>Phragmites australis</i> (n = 3)	1,40 ± 0,93	9,49 ± 5,32	0,48 ± 0,26	41 ± 12	127 ± 52	0,22 ± 0,15	0,02 ± 0,03	0,02 ± 0,01
Загрязненная территория (берег р. Карагайлы около отвалов карьера и обогажительной фабрики)								
Вода, мг/л (n = 1)	0,581	24,13	0,0092	0,155	1,117	0,0302	0,0308	0,0477
Донные осадки, валовое содержание (n = 11)	7392 ± 1274	8918 ± 3511	28,2 ± 8,0	127 000 ± 35 000	1149 ± 517	52,9 ± 14	65,8 ± 19,3	14,2 ± 7,3
Подвижные формы (n = 10)	1995 ± 1020	4811 ± 3086	7,1 ± 5,4	6467 ± 2493	311 ± 402	4,1 ± 1,2	16,9 ± 14,1	6,87 ± 4,77
Почвы, валовое содержание (n = 6)	417 ± 254	980 ± 833	53 ± 16	26 570 ± 3680	1950 ± 870	40 ± 19	28 ± 3,7	2,37 ± 3,26
Почвы, подвижные формы (n = 6)	14,6 ± 17,4	183 ± 274	1,40 ± 0,68	60 ± 41	182 ± 93	5,58 ± 4,30	0,72 ± 0,45	1,04 ± 1,51
<i>Phragmites australis</i> (n = 3)	5,01 ± 2,28	86 ± 11	0,39 ± 0,08	48 ± 15	127 ± 110	0,38 ± 0,48	0,03 ± 0,03	0,04 ± 0,04
Загрязненная территория (берег р. Карагайлы около пос. Калининское, вблизи хвостохранилища)								
Вода, мг/л (n = 1)	0,0125	0,826	0,0092	0,3241	0,113	0,0204	0,0006	0,003
Донные осадки, валовое содержание (n = 5)	1670 ± 1418	6872 ± 4425	57,8 ± 13,1	59 850 ± 8400	1364 ± 788	38,9 ± 22,9	36,4 ± 15,3	11,3 ± 6,8
Донные осадки, подвижные формы (n = 5)	618 ± 604	2268 ± 1853	1,83 ± 2,52	133 ± 105	279 ± 267	3,7 ± 3,2	3,6 ± 3,3	9,8 ± 7,4
Почвы, валовое содержание (n = 12)	153 ± 50	460 ± 37	53 ± 2	31 694 ± 1780	704 ± 76	22 ± 7	26 ± 2	1,18 ± 0,22
Почвы, подвижные формы, среднее, мин., макс. (n = 18)	4,18 <0,05–22	68 0,4–131	0,79 0,4–2,6	44 1,5–349	58 17–126	1,64 <0,05–2,9	0,39 <0,05–0,72	0,50 0,17–0,85
<i>Artemisia austriaca</i> (n = 6)	15,2 ± 5,4	44 ± 22	1,64 ± 0,88	308 ± 118	54 ± 27	1,70 ± 0,80	0,29 ± 0,10	0,20 ± 0,06
г. Сибай								
Вода, мг/л (n = 1)	0,003	0,031	0,0049	0,256	0,0375	0,0181	< 0,001	< 0,0005
Донные осадки, валовое содержание (n = 6)	87,0 ± 25,0	197 ± 87	57,2 ± 6,7	54 700 ± 12 500	1756 ± 354	20,7 ± 5,2	31,4 ± 7,0	0,48 ± 0,27
Донные осадки, подвижные формы (n = 9)	3,6 ± 2,0	28,9 ± 15,2	2,1 ± 0,62	137 ± 37	465 ± 297	3,2 ± 1,6	0,89 ± 0,57	0,19 ± 0,09
Почвы, валовое содержание (n = 150)	248	487	49	34 667	1338	50	15	0,15
Региональный геохимический фон [Опекунова и др., 2001]	49	223	34	37 100	1060	20	15	0,15
Фон для черноземов России [Методические..., 1993]	25	68	45	–	–	20	15	0,24
Кларк в почвах [Виноградов, 1962]	47	83	58	46 500	1000	16	18	0,13
ОДК (ГН 2.1.7.2511-09)	132	220	80	–	–	130	–	2,0
ПДК в почвах	3	23	4	–	140	6	5	–

анионов и катионов. Содержание в воде Cu, Cd, Mn, Cr ниже установленных ПДК для рыбохозяйственных водоемов, а концентрация Cu, Pb, Zn, Fe, Ni превышает нормативные значения в 1,5–3 раза (см. табл. 1). Валовое содержание металлов в донных осадках находится на уровне РГФ. Доля подвижных форм Cu, Zn, Co и Pb близка к показателям почв. Это подтверждает большое влияние латеральной миграции вещества в пределах катены. Металлы в донных отложениях в основном находятся в кристаллических формах, что типично для природных условий.

Наиболее высокий уровень загрязнения отмечается в р. Карагайлы, принимающей сток с техногенного ландшафта. Однако загрязнение водотока обусловлено не столько латеральной миграцией вещества в пределах ландшафтно-геохимической катены, сколько прямым поступлением поллютантов при разгрузке подотвальных вод и сбросом карьерных.

Разработка медно-колчеданного месторождения стала причиной выраженной техногенной метаморфизации речной воды по анионно-катионному и микроэлементному составу, приведшей к формированию вод сульфатно-магниевого типа с высоким содержанием металлов (Cu, Zn, Cd). Состав донных осадков характеризуется аномальными концентрациями валового содержания рудных элементов (Cu, Zn, Cd) и их подвижных форм (см. табл. 1). Наиболее высокие концентрации ТМ установлены в истоке реки при смешении кислых подотвальных вод и слабощелочных трещинных, разгрузка которых происходит под отвалами, в районе сброса кислых карьерных вод, в акватории разлива водотока, куда осуществляется сброс воды с очистных сооружений, в среднем течении реки в искусственном пруду. Основным механизмом аккумуляции ТМ на этих участках служат литолого-геохимические барьеры. В первом и втором случаях формируется щелочной барьер, который способствует осаждению гидросульфатов металлов. На участке сброса с очистных сооружений щелочных вод (рН до 9,5) с высоким содержанием железа образуется комплексный сорбционно-щелочной барьер, аккумулирующий сульфаты рудных метал-

лов, а также элементы, сорбирующиеся на свежееобразованных оксигидроксидах железа. Акватория искусственного пруда представляет комплексный литолого-геохимический барьер, где происходит активное осаждение металлов, адсорбированных на глинистых минералах, органическом веществе (ОВ) и оксигидроксидах железа и марганца. Осаждающая способность перечисленных геохимических барьеров приводит к тому, что в отдельных пробах содержание Cu и Zn превышает 1 % на сухое вещество осадка, а содержание Cd достигает 48 мг/кг.

Содержание ТМ в растениях. Растения Башкирского Зауралья характеризуются повышенной концентрацией ТМ, типоморфных для медно-колчеданных руд (Cu, Zn, Fe, Pb и Cd), по сравнению с кларком по В. В. Добровольскому [1998]. Химический состав растений различных агроботанических групп существенно меняется. Относительно низким и стабильным содержанием ТМ характеризуются злаки и осоки, а высоким – разнотравье и ветошь (см. табл. 1). Максимальное количество ТМ в ветоши наблюдается на следующую год после роста их содержания в надземной фитомассе. Выявлены достоверные различия в накоплении ТМ в *Salvia stepposa*, *Veronica incana*, *Artemisia austriaca*, *Galium verum*, *Caragana frutex*, *Thymus marschallianus* и *Achillea milifolium*.

Биогеохимическая активность в р. Карагайлы изучена по содержанию ТМ в листьях и стеблях тростника *Pragmites australis*, отобранного в русле реки в четырех створах. Установлено, что аномальным содержанием в растениях характеризуется только Zn, концентрация которого превосходит кларк по В. В. Добровольскому [1998] в 5–10 раз. При этом максимальное значение Zn обнаружено в нижнем течении реки. В то же время тростник является видом, индифферентным к накоплению Cu, что характерно и для наземных растений. Существенных различий в накоплении металлов в листьях и стеблях не отмечено.

Морфологическая изменчивость растений. Наиболее яркие морфологические эндеми растений обнаружены у полыней *Artemisia austriaca*, *A. marschalliana*, вероники *Veronica incana*, подмаренника *Galium verum*,

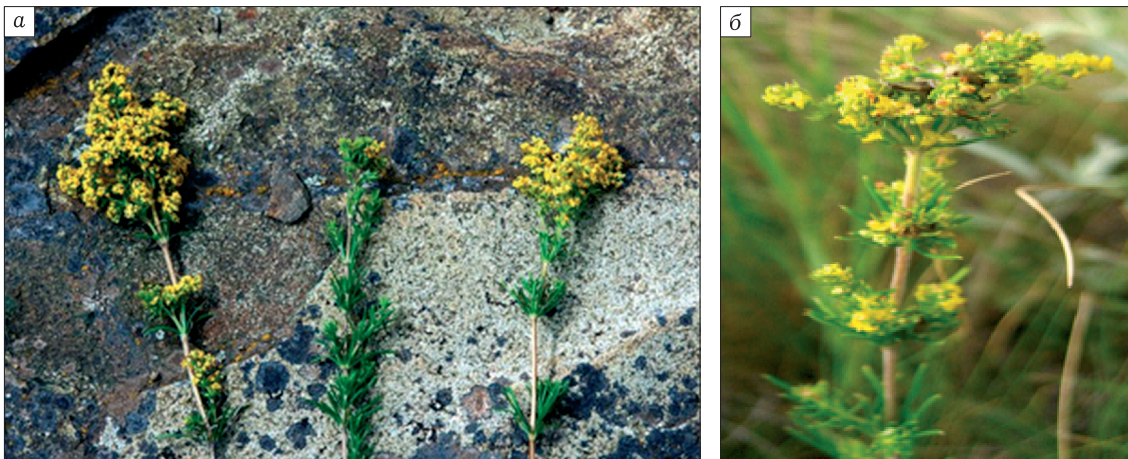
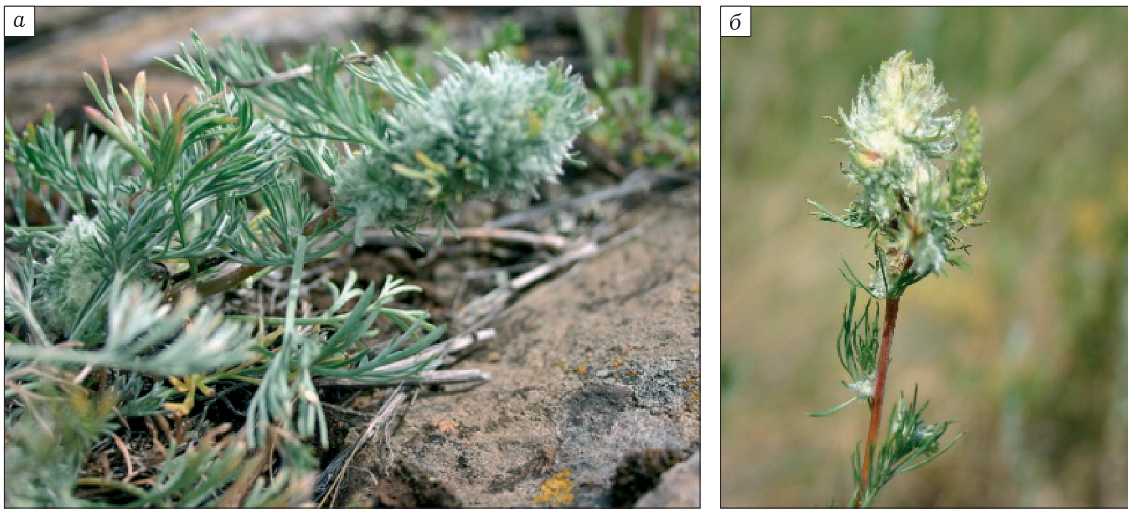


Рис. 2. Израстание соцветия у *Artemisia marschalliana* (1) и некроз цветков *Galium verum* (2) на фоновой территории (а) и в зоне техногенного загрязнения (б) в пределах Сибай-Гайской рудоносной зоны Южного Урала

лапчатки *Potentilla humifusa*. Они проявляются в различных аномалиях строения цветков, израстаниях соцветий, изменениях окраски околоцветника.

В пределах Красноуральско-Сибай-Гайской рудоносной зоны на фоновой площади вне антропогенного загрязнения обнаружено изменение нормальной окраски цветков растений. Так, под влиянием высокого содержания подвижных форм Cu в почвах (4 мг/кг), превышающего ПДК, отмечалось формирование розовых цветков у вероники *Veronica incana* и белых – у шалфея степного *Salvia stepposa*. Разнообразные оттенки окраски венчиков наблюдались у коровяка фиолетового *Verbascum phoeniceum* (от нормального фиолетового до розового и белого). Наряду с этим

встречались растения с видоизмененными соцветиями: ось соцветия, особенно в верхней части, утолщалась и раздваивалась, образуя дихотомически ветвящийся побег. Часто формировались экземпляры *Veronica incana* с уплощенной или расширенной в виде гребня верхушкой соцветий. Обнаружены массовые израстания и стерильность соцветий у *Artemisia austriaca* и *A. marschalliana* Spreng. Опушение таких побегов сильно увеличивалось, и в пазухе листьев вместо бокового соцветия развивался беловойлочный шар (рис. 2).

Сходные биогеохимические эндемии обнаружены вблизи объектов БМСК под влиянием техногенного загрязнения Cu, Zn, Fe и Pb. Изменение окраски *Salvia stepposa* с сине-

Запасы биомассы растительности в исследованных ПТК, ц/га

Год	Злаки	Разнотравье	Осоки	Бобовые	Кустарники	Ветошь	Общий укос
Фоновые ПТК Красноуральско-Сибай-Гайской рудоносной зоны, вблизи пос. Мукасово,							
2002	27*	7,8	2,5	<0,1	<0,1	15,8	53
	11-44	0,6-18	1,4-4			9-110	
2003	27	9	2	<0,1	4,6	48	91
	8-68	5-14	0,4-7		2-8	9-77	
2013	47	10	1,3	<0,1	2	24	83
	9-89	2-30	0,7-3		1-5,8	8,4-44	
2014	30	9,4	5,6	<0,1	1,8	27	70
	11-45	3,4-15	0,1-7,5		0,4-3,2	12-70	
2015	20,6	9	3	<0,1	<0,1	12,5	45
	1,6-28	4-14	2-4,6			5,7-18	
ПТК около пос. Старый Сибай, зона воздействия отвалов Сибайского и Камаганского карьеров							
2003	8	12	2,5	<0,1	1,8	6	31
	2-19	5-22	2-3,2		1,2-4	1,6-11	
2013	18	11	0,8	<0,1	0,8	12,1	43
	7-38	7,6-16	0,2-3		0,2-1,7	5,6-17	
2014	17	12,4	3,7	<0,1	1,7	17,6	52,5
	9,4-26	2,4-16	0,6-3,4			6,8-20,6	
2015	16,7	11,8	3,7	<0,1	<0,1	8	40
	14-20	10,5-13	1-3,6			4-11	
ПТК около пос. Калининское, зона воздействия хвостохранилища СОФ							
2002	9	7,3	2	<0,1	22	4,4	44,7
	6-15,2	0,9-14	0,3-4			2-10	
2003	11,4	9,6	1	<0,1	<0,1	9	31
	4-17,8	3,3-22	0,2-3,8			1,5-34	
2013	32	13,7	<0,1	<0,1	<0,1	9	55
	15-49	3,2-37,6				5,3-17,4	
2014	12,7	18,6	<0,1	<0,1	<0,1	15,5	47
	11-17,2	7,4-28,7				11,8-20	
2015	28	32	<0,1	<0,1	<0,1	6,4	66
	21-42	21,3-37,8				5,1-9	

фиолетовой на голубую и почти белую наблюдалось на пастбищном угодье вблизи хвостохранилища в окрестностях города Сибай (пос. Калининское). Развивались карликовые (до 10-15 см высотой) формы *Galium verum* с редуцированными стерильными цветками и израстания соцветий у *Artemisia austriaca*. Найден экземпляр *Phlomis tuberosa* с двумя сросшимися листовыми пластинками на одном черешке. Широко распространены точечные и пятнистые некрозы и хлорозы листьев, поражающие около 5-8 % их поверхности. В пос. Старый Сибай в нижней части склона увала обнаружена карликовая подушкообразная форма *Potentilla humiphusa*, пред-

ставляющая собой плотный комок (диаметром около 4 см) с укороченными осями соцветий. Массовый хлороз и некроз листьев, поражающий до 30 % листовой поверхности, наблюдается на листьях *Salvia stepposa*.

Запасы биомассы. Нарастание техногенной нагрузки на исследованные ПТК сопровождается изменением запасов биомассы растительности (табл. 2). Вместе с тем отчетливо прослеживается влияние гидрометеорологических условий на растительный покров. Так, в наиболее влажные годы с большим количеством атмосферных осадков (2003, 2013 гг.) отмечаются самые высокие весовые значения укосов биомассы в фоновых ПТК

около пос. Мукасово – 91 и 83 ц/га. В более сухие годы и во время засухи (2009–2010 гг.) запасы биомассы оказались крайне низки и не превышали 1–5 ц/га.

Флористические и фитоценотические изменения. Метод корреляционных плеяд [Терентьев, 1959; Нешатаев, 1987; Опекунова, Муратова, 2005] выявил достоверное разделение всех исследованных видов на шесть групп (плеяд), связанных с зональной дифференциацией растительного покрова на южную лесостепь и настоящие степи и происходящими в них нарушениями под воздействием антропогенной нагрузки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Все компоненты ландшафтов Башкирского Зауралья (природные воды, донные осадки, почвы, растительность) обогащены ТМ, типоморфными для полиметаллических колчеданных руд. В степных ПТК с нейтральной реакцией почвенных растворов латеральная миграция ТМ в пределах почвенно-географических катен выражена слабо [Касимов, 1988]. Это подтверждают результаты многолетних исследований на эталонном участке в районе пос. Мукасово.

Анализ полученных и опубликованных в литературе данных [Семенова и др., 2011; Опекунов, Опекунова, 2013; и др.] свидетельствует о том, что под влиянием Сибайского горно-рудного комплекса в почвах сформировался техногенный ореол рассеяния индикаторных элементов (Zn, Cu, Cd и Fe) в радиусе 2–5 км от производственных объектов, а в донных осадках реки – техногенный поток рассеяния, протяженностью до 10 км. Они характеризуются значительным ростом валовых концентраций ТМ относительно естественных вторичных ореолов и потоков рассеяния, а также резким увеличением доли подвижных форм металлов. Последние представлены поверхностно-сорбированными (Cd), карбонатными (Zn) и органоминеральными (Co, Cu, Zn) формами. Основным элементом-индикатором техногенного загрязнения служит Zn, который менее прочно удерживается почвами по сравнению с Cu и Pb [Минкина и др., 2008; Манджиева и др., 2014].

Растения Башкирского Зауралья характеризуются ярко выраженными биогеохимическими особенностями. Концентрация ТМ в растениях превышает локальный фон у видов естественной флоры в 6–10 раз, у культурных растений – в 10–20 раз. Это согласуется с данными [Кужина и др., 2014], полученными при изучении отработанных или недействующих карьеров Башкирского Зауралья, а также содержанием ТМ в *Phragmites australis* вдоль загрязненного участка р. Карагайлы [Бактыбаева, 2014].

Большая изменчивость химического состава растений определяется валовым содержанием ТМ, величиной рН, механическим составом и содержанием органического вещества в почвах. Накопление ТМ в биомассе во многом зависит от степени их доступности растениям, а также видовых особенностей растений, их возраста и физиологической роли ТМ. Во влажные годы в растениях увеличивается концентрация Zn, Cu и Fe. Это подтверждает выводы M. Overesch et al. [2007], что при высоком содержании подвижных форм ТМ в почвах повышенной аккумуляцией характеризуются Cu и Zn, а Pb и Cd, не играющие существенной биологической роли, имеют низкие значения коэффициентов поглощения.

Прямой корреляции между аккумуляцией ТМ в биомассе растений и содержанием их подвижных форм в почвах в тот же год не наблюдается. Обнаружен сдвиг в 1–2 года в накоплении ТМ в растениях по сравнению с увеличением подвижности их в почвах (рис. 3). Содержание Cu и Fe в надземной фитомассе коррелирует с содержанием их подвижных форм в почве за год до сбора укосов ($r = 0,92$ и $0,66$ соответственно). Кроме того, прослеживается корреляция концентрации Cu в растениях с содержанием подвижных форм в почве за два и за три года до сбора укосов ($r = 0,89$ и $0,76$). Содержание Cu в фитомассе также тесно связано с ее валовым содержанием в почве ($r = 0,79$).

В районе обогатительной фабрики, карьеров, хвостохранилищ и других объектов комбината наблюдается интенсивное вовлечение ТМ в биогеохимический круговорот и образование зон с повышенным содержанием руд-

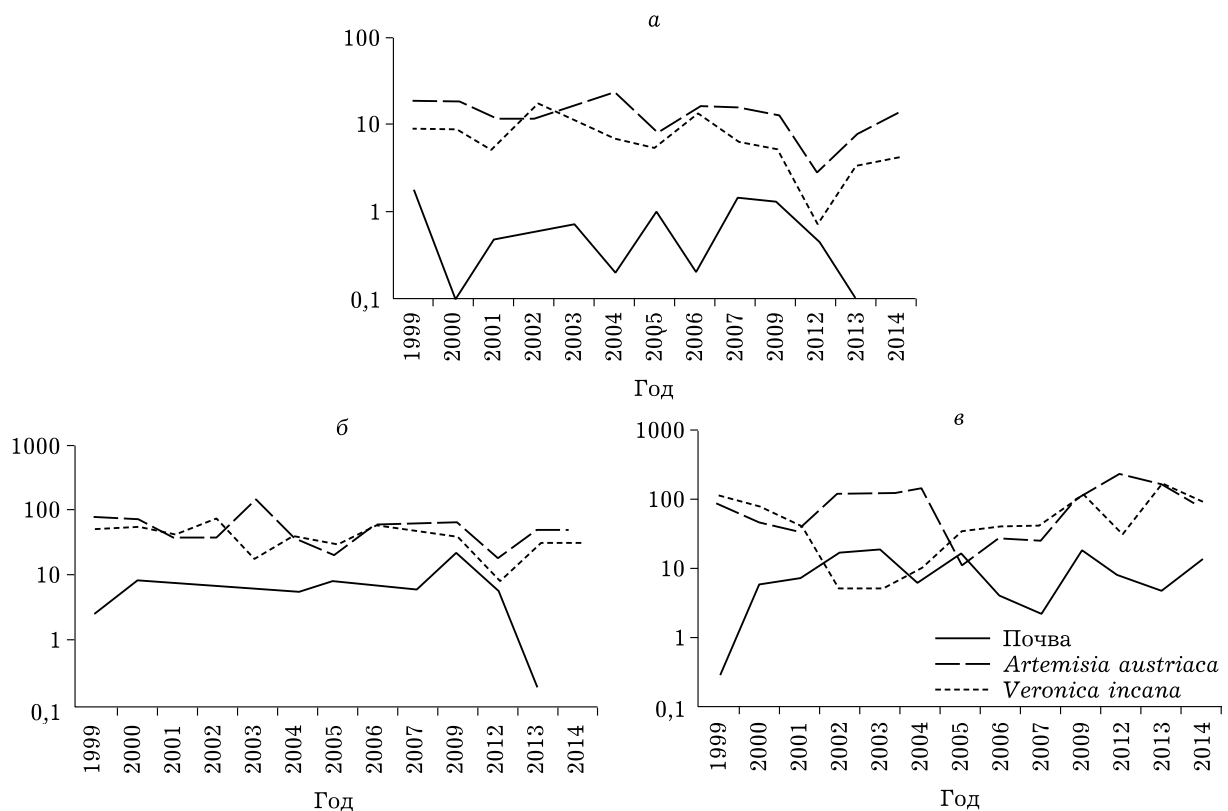


Рис. 3. Изменение содержания Cu (а), Zn (б) и Fe (в) в *Artemisia austriaca*, *Veronica incana* и их подвижных форм в почве на фоновой площади Красноуральско-Сибай-Гайской рудоносной зоны, мг/кг

ных элементов (Zn, Cu, Fe и др.) в растениях (см. табл. 1). Концентрация их сильно варьирует по годам в зависимости от местообитания, удаленности от источника загрязнения и биологических особенностей видов. Наименьшее содержание наблюдается в злаках и осоках. Максимальные концентрации всех изученных элементов обнаружены в ветоши и разнотравье – до 2 РКР по Cu и 4 РКР по Zn. Это согласуется с данными для загрязненных добывающей промышленностью территорий соседних регионов, в частности Среднего Урала: в луговых сообществах окрестностей г. Нижний Тагил максимальные содержания ТМ характерны для разнотравья, минимальные – для злаков [Безель и др., 2015]. Значительное превышение РГФ во всех агроботанических группах по Fe, Mn, Zn и Cu наблюдается на площадке вблизи хвостохранилища около пос. Калининское.

В ходе проводимых исследований выявлено несколько видов растений-концентраторов ТМ, которые могут использоваться при

оценке интенсивности техногенеза – польнь *Artemisia austriaca* накапливает в основном Zn, Cu и Pb, чабрец *Thymus marschallianus* – Fe и Zn, вероника *Veronica incana* – Cu и Zn, шалфей степной *Salvia stepposa* – Cu, Zn и Fe. Накопление ТМ (Ni, Cr, Pb, Cu, Co) в побегах *Artemisia austriaca* отмечается и в других районах Зауралья, в частности, в окрестностях г. Орска [Вельц, Турлибекова, 2011]. По величине коэффициента биологического поглощения к абсолютным концентраторам относятся *Artemisia austriaca* и *Thymus marschallianus*. При сравнении содержания ТМ в растениях за период с 1998 по 2015 г. отмечено, что в зоне воздействия карьера и хвостохранилища постепенно увеличивается концентрация Fe.

Результаты морфологических исследований растений, проведенных на модельных площадях в изученном районе, хорошо демонстрируют неспецифический характер их изменений под влиянием экстремальных геохимических условий как естественного, так

и антропогенного характера. В условиях засушливого климата обогащение почв ТМ и рост их подвижности во влажные периоды способствуют развитию различных биогеохимических эндемий.

Общее угнетение растений отмечено для всей территории в пределах естественных геохимических аномалий и на антропогенно загрязненных участках. Под влиянием высокой концентрации ТМ наблюдаются различные дисфункции развития растений, выражающиеся главным образом в появлении хлороза и некроза, образовании уродливых форм – тератов (см. рис. 2). Тератогенез, как это показано в вегетативных опытах [Скарлыгина-Уфимцева, Опекунова, 1987], обусловлен резким изменением концентрации ТМ, доступных растениям.

По мере приближения к горно-рудным предприятиям наблюдается снижение общей биомассы растений. Наименьший вес укосов установлен на территории вблизи пос. Старый Сибай, где помимо воздействия производственных объектов отмечается перевыпас домашнего скота. Пастбищная дигрессия усугубляет ситуацию и приводит к заметному снижению продуктивности и изменению фракционного состава травостоя. Чуть выше запасы биомассы в степных ПТК вблизи пос. Калининское. Однако здесь выражена тенденция увеличения массы разнотравья и снижения доли злаков. В составе растительного покрова характерно преобладание апохорных и рудеральных видов (общее проективное покрытие – 60 %), которые составляют основной объем биомассы разнотравья. Это согласуется с данными для загрязненных территорий в районе г. Нижний Тагил, где на участках, выведенных из-под пашни 17–20 лет назад, отмечено снижение надземной фитомассы, рост доли разнотравья и сокращение доли злаков при увеличении токсической нагрузки [Безель и др., 2015].

Воздействие горно-рудного производства приводит к существенной трансформации растительных сообществ в различных регионах земного шара [Steinhauser et al., 2009; Struckhoff et al., 2013; Жуйкова и др., 2015; и др.]. Результаты флористических и фитоценологических исследований, проведенных в Башкирском Зауралье в 1978–1980 и 2003–

2015 гг. (рис. 4, 5), указывают на значительное изменение в этот период структуры и состава зональных степных и лесостепных фитоценозов, индицируемое участием видов вторичных сукцессий.

В настоящее время под влиянием антропогенной нагрузки в дендрите корреляционных связей произошел разрыв элементов “плейстоценовой” степи и подчинение их типчаковой формации (см. рис. 4). Центральным звеном структуры, объединяющей все виды вторичных сукцессий, стал типчак, который ранее входил в состав подплеяды петрофитных элементов, осуществляя связь с плеядой лесостепных и умеренно-засушливо-степных видов (см. рис. 5).

По последним данным четыре плеяды (степных и лесостепных видов, настоящих зональных ковыльных степей, остепненно-луговых и петрофитных видов, сухостепных элементов) являются абсолютно самостоятельными. Не вошедшие в них виды растений представляют лесные и луговые сообщества.

В плеяду степных и лесостепных видов входит подплеяда типчаковых степей различного генезиса, характеризующаяся наибольшей видовой насыщенностью. Ядром видов вторичной сукцессии служит *Festuca valesiaca*. Он объединяет реликт “плейстоценовой” степи *Artemisia armeniaca*, южно-сибирский горно-степной реликт *Potentilla sericea*, степные и горно-степные виды *Stipa capillata*, *Eryngium planum*, *Potentilla humifusa*, *Seseli libanotis*, *Gypsophila altissima* L. и др. с представителями луговых степей и остепненных лугов *Bromopsis inermis*, *Vicia cracca*, *Centaurea scabiosa*, *Centaurea ruthenica*, *Astragalus danicus* и др. Через ксеромезофит *Poa pratensis* осуществляется его связь с луговыми видами *Trifolium medium*, *Tanacetum vulgare*, *Phleum pratense*, *Carex vesicaria*, *Agrostis tenuis*, *Artemisia glauca*. Самостоятельные ветви образуют примыкающие к ним растения солончаков, солонцов и солонцеватых степей: *Tanacetum vulgare*, *Saussurea amara*, *Lepidium crasifolium*, *Limonium gmelinii*.

Эдафические варианты представлены генетически различными элементами петрофитной флоры: кальцефитом *Echinops meyeri*, уральским эндемиком *Dianthus acicularis* и

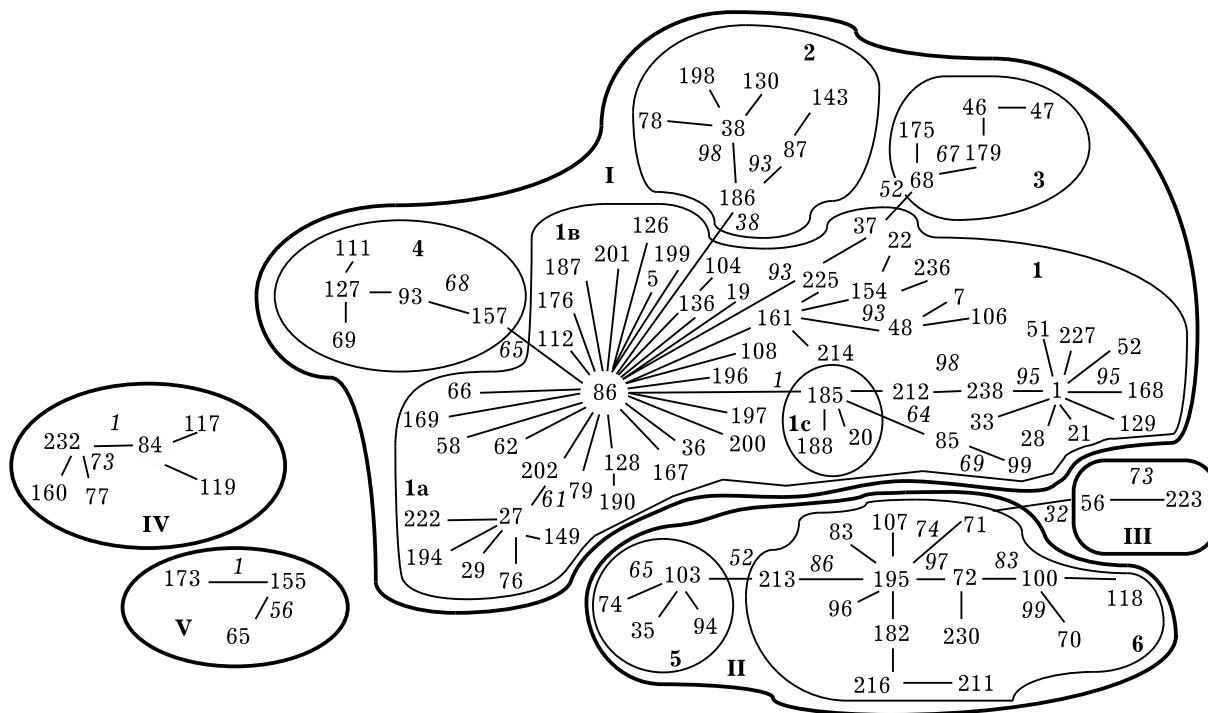


Рис. 4. Дендрит корреляционных связей между видами в фитоценозах Южного Урала (2003–2015 гг.).

— — границы плеяд: I – плеяда типчаковых степей различного генезиса, II – плеяда настоящих зональных ковыльных степей, III – плеяда рудеральной растительности, IV – плеяда остепненно-луговых и петрофитных склонов, V – плеяда сухостепных элементов; — — границы подплеяд: Ia – эдафические варианты петрофитной флоры, Ib – виды вторичной сукцессии, Ic – виды естественных геохимических аномалий, 2 – подплеяда богатого-разнотравных степных видов, 3 – подплеяда березовых колков западин, 4 – подплеяда рудеральных видов, 5 – подплеяда видов более влажных местообитаний, 6 – подплеяда видов более сухих местообитаний. Курсивом выделены значения коэффициентов межвидовой сопряженности, умноженные на 100; полужирным шрифтом – виды растений, вошедшие в плеяды: 1 – *Achillea millefolium* L., 5 – *Agropyron pectinatum* (Bieb.) Beauv., 7 – *Agrostis tenuis* Sibth., 19 – *Artemisia armeniaca* Lam., 20 – *A. austriaca* Jacq., 21 – *A. dracunculus* L., 22 – *A. glauca* Pall. ex Willd., 27 – *Aster alpinus* L., 28 – *Astragalus danicus* Retz., 29 – *A. macropus* Bunge, 33 – *Betula pendula* Roth, 35 – *Brachyactis ciliata* (Ledeb.) Ledeb., 36 – *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub, 37 – *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, 38 – *Calamagrostis epigeios* L., 46 – *Carex acuta* L., 47 – *C. supina* Willd. ex Wahlenb., 48 – *C. vesicaria* L., 51 – *Centaurea ruthenica* Lam., 52 – *C. scabiosa* L., 56 – *Cichorium intybus* L., 58 – *Clausia aprica* (Steph.) Korn.-Tr., 62 – *Dianthus acicularis* Fisch. ex Ledeb., 65 – *Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. & Gray, 66 – *Echinops ritro* Auct., 68 – *Eleocharis palustris* (L.) Roem. & Schult., 69 – *Elymus akmolinsensis* Nevski, 70 – *E. uralensis* (Nevski) Tzvel., 71 – *Elytrigia pruinifera* Nevski, 72 – *E. repens* (L.) Nevski, 74 – *Equisetum pratense* Ehrh., 76 – *Eremogone longifolia* (Bieb.) Fenzl, 77 – *Eremogone koriniana* (Fisch. ex Fenzl) Ikon., 78 – *Erigeron podolicus* Bess., 79 – *Eryngium planum* L., 83 – *Fallopia convolvulus* L., 84 – *Festuca pratensis* Huds., 85 – *F. pseudovina* Hack. ex Wiesb., 86 – *F. valesiaca* Gaudin, 87 – *Filipendula vulgaris* Moench, 93 – *Galeopsis ladanum* L., 94 – *Galium album* Mill., 96 – *G. mollugo* L., 99 – *G. septentrionale* Senu Pobod., 100 – *G. verum* L., 103 – *Geranium pratense* L., 104 – *Cerastium arvense* L., 106 – *Glechoma hederacea* L., 107 – *Glycyrrhiza korshinskyi* Grig., 108 – *Gypsophila altissima* L., 111 – *Hieracium cymosum* L., 112 – *H. echinoides* Lumn., 117 – *Hypericum perforatum* L., 118 – *Inula britannica* L., 119 – *Juncus ambiguus* Guss., 126 – *Lepidium crassifolium* Waldst. & Kit., 127 – *L. ruderale* L., 128 – *Limonium gmelinii* (Willd.) O. Kuntze, 129 – *Linaria altaica* Fisch. ex Kuprian., 130 – *L. vulgaris* L., 136 – *Medicago lupulina* L., 140 – *Melilotus albus* Medik., 143 – *Myosotis palustris* (L.) L., 149 – *Orostachys spinosa* (L.) C. A. Mey., 154 – *Phleum pratense* L., 155 – *Phlomis tuberosa* L., 157 – *Picris hieracioides* L., 160 – *Plantago media* L., 161 – *Poa pratensis* L., 167 – *Potentilla humifusa* Willd. ex Schlecht., 168 – *P. impolita* Wahlenb., 169 – *P. sericea* L., 173 – *Puccinellia tenuissima* Litv. ex V. Krecz., 175 – *Ranunculus polyphyllus* Waldst. & Kit. ex Willd., 176 – *R. repens* L., 179 – *Rosa acicularis* Lindl., 182 – *Rubus idaeus* L., 185 – *Salvia stepposa* Schost., 186 – *Sanguisorba officinalis* L., 187 – *Saussurea amara* (L.) DC., 188 – *Scabiosa ochroleuca* L., 190 – *Scorzonera austriaca* Willd., 194 – *Sedum stepposum* Boriss., 195 – *Silene chlorantha* (Willd.) Ehrh., 196 – *Senecio erucifolius* L., 197 – *Serratula coronata* L., 198 – *Seseli ledebourii* G. Don fil., 199 – *S. libanotis* (L.) Koch, 200 – *Silene multiflora* (Ehrh.) Pers., 201 – *S. nutans* L., 202 – *S. repens* Patrin, 211 – *Stellaria graminea* L., 212 – *Stipa capillata* L., 213 – *S. pennata* L., 214 – *Tanacetum vulgare* L., 216 – *Thalictrum flavum* L., 222 – *Trifolium montanum* L., 223 – *T. fragiferum* L., 225 – *T. medium* L., 227 – *Turritis glabra* L., 230 – *Valeriana dubia* Bunge, 232 – *Veronica incana* L., 233 – *Veronica longifolia* L., 236 – *Vicia cracca* L., 238 – *Viola tricolor* L.

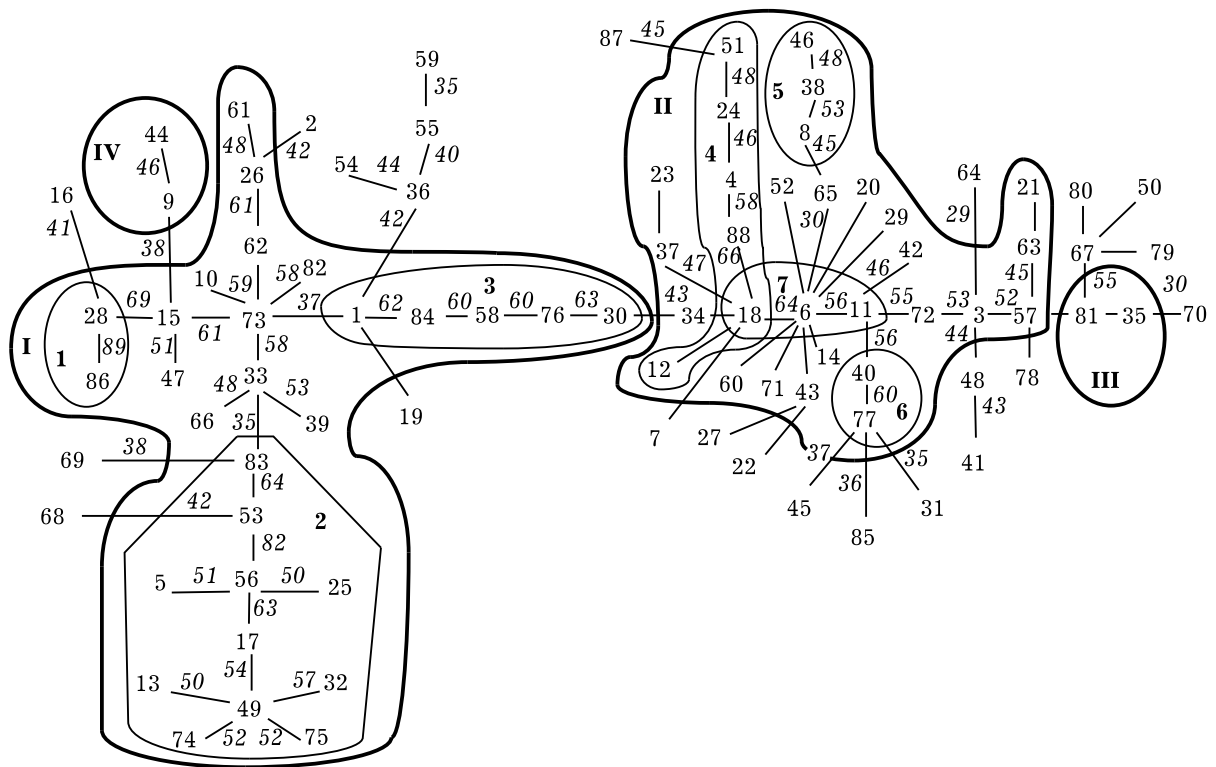


Рис. 5. Дендрит корреляционных связей между видами в фитомассе Южного Урала (1978–1980 гг.).

— — границы плеяд: I — плеяда сухо-степных видов, II — плеяда лесостепных и умеренно-засушливо-степных видов, III — плеяда лугово-степных видов, IV — плеяда настояще-степных казахстанских элементов флоры, — — границы подплеяд: 1 — подплеяда петрофитных видов сухой степи, 2 — подплеяда видов кустарниковой степи, 3 — подплеяда видов зональных сухих степей, 4 — подплеяда петрофитных видов лесостепи и настоящей степи, 5 — подплеяда видов солонцеватых почв, 6 — подплеяда видов зональных лесостепных и умеренно-засушливо-степных сообществ, 7 — подплеяда видов “плейстоценовой флоры”. Курсивом даны значения коэффициентов межвидовой сопряженности, умноженные на 100; полужирным шрифтом — виды растений, вошедшие в плеяды: 1 — *Achillea nobilis*, 2 — *A. setacea*, 3 — *Achyrophorus maculatus*, 4 — *Alyssum lenense*, 5 — *Amygdalus nana*, 6 — *Artemisia armeniaca*, 7 — *A. austriaca*, 8 — *A. dracuncululus*, 9 — *A. marschalliana*, 10 — *A. pontica*, 11 — *A. sericea*, 12 — *Asperula petraea*, 13 — *Astragalus austriacus*, 14 — *A. danicus*, 15 — *Berteroa incana*, 16 — *Campanula sibirica*, 17 — *Calamagrostis epigeios*, 18 — *Carex praecox*, 19 — *C. supina*, 20 — *Centaurea marschalliana*, 21 — *C. scabiosa*, 22 — *C. ruthenica*, 23 — *Dianthus acicularis*, 24 — *D. borbasii*, 25 — *D. leptopetalus*, 26 — *Eremogone langifolia*, 28 — *Echinops ritro*, 29 — *Elytrigia repens*, 30 — *Erysimum diffusum*, 31 — *E. chierantioides*, 32 — *Euphorbia sequiriana*, 33 — *Falcaria vulgaris*, 34 — *Festuca valesiaca*, 35 — *Filipendula vulgaris*, 36 — *Galium ruthenicum*, 37 — *G. tinctorum*, 38 — *Crinitaria tatarica*, 39 — *C. villosa*, 40 — *Helictotrichon desertorum*, 41 — *Hieracium echiooides*, 42 — *H. virosum*, 43 — *Inula hirta*, 44 — *Jurinea multiflora*, 45 — *Koeleria cristata*, 46 — *Limonium gmelinii*, 47 — *Linaria vulgaris*, 48 — *Madicago falcata*, 49 — *M. romanica*, 50 — *Onosma simplicissima*, 51 — *Orostachys spinosa*, 52 — *Oxytropis songorica*, 53 — *Pedicularis orientalis*, 54 — *Phleum phleoides*, 55 — *Phlomis tuberosa*, 56 — *Plantago lanceolata*, 57 — *P. urvillei*, 58 — *Poa stepposa*, 59 — *Polygala comosa*, 60 — *P. vulgaris*, 61 — *Potentilla arenaria*, 62 — *P. bifurca*, 63 — *P. humifusa*, 64 — *P. impolita*, 65 — *Pulsatilla patens*, 66 — *Caragana frutex*, 67 — *Salvia stepposa*, 68 — *Sanquisorba officinalis*, 69 — *Scorzonera purpurea*, 70 — *Sedum hybridum*, 71 — *S. telephium*, 72 — *Seseli libanotis*, 73 — *Silene wolgensis*, 74 — *Spiraea hypericifolia*, 75 — *Stipa capillata*, 76 — *S. lessingiana*, 77 — *S. zaleskii*, 78 — *Taraxacum officinale*, 79 — *Thalictrum minnus*, 80 — *Thymus marschallianus*, 81 — *Trifolium montanum*, 82 — *Verbascum phoeniceum*, 83 — *Veronica chamaedrys*, 84 — *V. incana*, 85 — *V. spicata*, 86 — *V. spuria*

видами *Silene repens* и *Clausia aprica*. С ними тесно связана одна из ветвей данной плеяды, объединяющая *Aster alpinus* и *Trifolium montanum* с *Sedum stepposum*, *Eremogone longifolia*, *Orostachys spinosa*.

Центральным членом видов естественных геохимических аномалий является шалфей

Salvia stepposa, объединяющий их с *Festuca valesiaca* ($r = 1$). Виды вторичных сукцессий образуют две подплеяды. Одну из них формируют рудеральные виды — *Lepidium ruderales*, *Picris hieracioides*, *Galeopsis ladanum*, *Hieracium cymosum*, *Melilotus albus*, *Elymus aktmolinsis*, а вторую через вейник *Calama-*

Комплекс биоиндикационных показателей изменения состояния ПТК в зоне воздействия горно-рудных предприятий Башкирского Зауралья

Биогеохимические показатели	Морфологические показатели	Флористические показатели	Фитоценологические показатели
<p>Почвы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – валовое содержание ТМ: Cu и Zn – от 2,5 до 10 РГФ, 2–4 ОДК – подвижные формы, превышение над фоном: Fe – от 2 раз; Cu, Pb, Ni – 2,5–5,5 раз, Zn – 13 раз; до 3 ПДК – доля подвижных ТМ от их валового содержания – до 16–24 % – $Z_c > 64$ <p>Накопление в растениях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – ветошь: Zn – 4 РКР, Cu – 2 РКР, Fe – 3 РКР – разнотравье: Zn, Fe – 3 РКР, Cu – 2 РКР – злаки: Zn – 2 РКР, Cu, Fe – 3 РКР <p>Виды-индикаторы ТМ: полынь <i>Artemisia austriaca</i> (Zn, Cu и Pb), чабрец <i>Thymus marschallianus</i> (Fe и Zn), вероника <i>Veronica incana</i> (Cu и Zn), шалфей <i>Salvia stepposa</i> (Cu, Zn и Fe):</p> <ul style="list-style-type: none"> – концентрация Cu, Pb – 2 РКР, Zn, Fe – 3 РКР, Cd – до 26 РКР – превышение локального фона для дикорастущих видов в 6–10 раз – для культурных растений в 10–20 раз 	<p>Хлороз и некроз листьев <i>Salvia stepposa</i></p> <p>Изменение окраски цветков <i>Salvia stepposa</i>, <i>Veronica incana</i>, <i>Verbascum phoeniceum</i>, <i>Limonium gmelinii</i></p> <p>Тератологические формы цветков и соцветий <i>Artemisia austriaca</i>, <i>Veronica incana</i>, <i>V. longifolia</i>, <i>V. spicata</i></p> <p>Срастание листьев <i>Phlomis tuberosa</i></p> <p>Подушкообразная форма роста <i>Potentilla humifusa</i>, <i>Thymus marschallianus</i></p>	<p>Уменьшение запасов биомассы растений на 30–50 % от биомассы растений в фоновых ПТК</p> <p>Уменьшение числа видов коренных зональных ковыль-ных степей на 30 %</p> <p>Увеличение числа видов вторичных сукцессий с доминантами <i>Festuca valesiaca</i> и <i>Artemisia austriaca</i></p> <p>Смена доминантов фитоценозов по схеме <i>Stipa pennata</i> (<i>Stipa zaleskii</i>) → <i>Festuca valesiaca</i> → <i>Artemisia austriaca</i></p>	<p>Снижение обилия и ОПП видов коренных зональных степей <i>Stipa</i> sp.: ОПП – с 70 до 25 % (4 %), видовая насыщенность – 10–15 видов</p> <p>Увеличение обилия <i>Artemisia austriaca</i>, <i>A. marschalliana</i>, <i>A. dracunculus</i>, <i>Veronica incana</i>, <i>Salvia stepposa</i>, <i>Phlomis tuberosa</i> с увеличением их ОПП до 40 %</p> <p>Уменьшение запасов биомассы травостоя на 50 % от фоновой величины</p>

Рис. 6. Комплекс биоиндикационных показателей изменения состояния ПТК в зоне воздействия горно-рудных предприятий в Башкирском Зауралье

grostis canescens виды березовых колков западин, в травянистом покрове которых преобладают лугово-лесные и болотные виды: *Eleocharis palustris*, *Ranunculus polyphyllus*, *Rosa acicularis*, *Carex acuta*, *C. supina*. Данная плеяда положительно связана с плеядой богаторазнотравных степей, центральным звеном которой является *Sanguisorba officinalis*. Ее представляют в основном лугово-лесостепные виды: *Calamagrostis epigeios*, *Filipendula vulgaris*, *Seseli ledebourii*, *Linaria vulgaris*, *Erigeron podolicus* и *Myosotis palustris*.

В плеяду настоящих зональных ковыль-ных степей входят две подплеяды, связанные между собой через *Stipa pennata* и представляющие различные эдафические вари-

анты. К ней примыкает рудеральная растительность, состоящая из *Cichorium intybus* и *Trifolium fragiferum*. Первый вид – сорный поликарпик, обильный в рудеральных и нарушенных растительных сообществах лесостепи, второй – пастбищное кормовое растение, обитающее на влажных солонцеватых лугах. Рудеральные виды широко представлены на начальных этапах восстановительных сукцессий деградированных пастбищ, в которых режим конкуренции ослаблен. В процессе самовосстановления растительного покрова они вытесняются видами вторичного зарастания. Последние образуют плеяду типчаковых степей различного генезиса. Ее центром является “звезда” корреляционных свя-

зей, объединяющая виды вторичной сукцессии, вызванной деградацией растительного покрова при пастбищной нагрузке, эдафические варианты фитоценозов, формирующиеся при близком залегании кристаллических пород и виды-концентраторы ТМ, получающие максимальное развитие в условиях естественных и техногенных геохимических аномалий ($r = 1$).

Необходимо отметить, что сохраняется обнаруженная ранее высокая корреляционная связь петрофита *Echinops meyeri* и петрофитных эндемиков Южного Урала. Однако участие их в составе типчаковой плеяды свидетельствует о дальнейшем распространении растительности нарушенных местообитаний на горные вершины и склоны и постепенной замене коренных сообществ. Особое внимание заслуживает тот факт, что растения-концентраторы ТМ, устойчивые к экстремальным условиям, в настоящее время тесно связаны с апохорными и рудеральными видами. Это, в свою очередь, указывает на увеличение площади техногенного загрязнения и потенциальной устойчивости растительных сообществ к комплексному антропогенному воздействию.

Таким образом, для оценки трансформации ПТК под влиянием горно-рудного производства эффективно использование комплекса биоиндикационных признаков, в основе которого лежит анализ химического состава растений, морфологических, флористических и фитоценологических параметров (рис. 6). Интенсивность антропогенного воздействия оценивается по изменению аккумуляции в биомассе ТМ, типоморфных для медно-колчеданной минерализации, запасов биомассы, увеличению доли разнотравья и главным образом видов рудералов и концентраторов ТМ в составе травостоя. Показательным становится нарушение структуры корреляционных связей между видами в фитоценозах и увеличение роли видов вторичных сукцессий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение подчеркнем, что воздействие Сибайского горно-промышленного комплекса привело к трансформации всех ком-

понентов ПТК района исследования. В природных водах, донных осадках, почвах и растениях отмечается аномальное содержание ТМ, типоморфных для полиметаллического оруденения. Показателем техногенеза служит резкое увеличение подвижности металлов в почвах и донных отложениях.

Выделены индикаторные виды растений техногенного загрязнения: *Artemisia austriaca*, *Veronica incana*, *Thymus marschallianus*, которые могут использоваться при экологическом мониторинге.

Морфологические отклонения у растений наблюдаются как в пределах естественных геохимических аномалий, так и в зоне техногенного воздействия. Поэтому оценка степени антропогенной трансформации ПТК по морфологическим показателям возможна только в комплексе с биогеохимическими параметрами, из которых основными являются химический состав почв и растений.

Показателем техногенного загрязнения служит увеличение участия в составе растительных сообществ видов вторичных сукцессий за счет замещения видов настоящих зональных степей. Разрыв элементов "плейстоценовой" степи и подчинение их типчаковой формации указывает на распространение растительности нарушенных местообитаний на горные вершины и склоны.

Под влиянием техногенного загрязнения наряду с общим снижением запасов биомассы растительности отмечается снижение роли злаков и увеличение доли рудералов и растений-концентраторов в составе разнотравья. Обилие и проективное покрытие апохорных и рудеральных видов в коренных зональных растительных сообществах и смена фитоценозов с их участием может использоваться в качестве индикатора степени техногенной трансформации ПТК.

Существование плеяды настоящих зональных ковыльных степей, участие в составе биоценозов эндемичного вида *Dianthus acicularis* и представителей "плейстоценовой" степи *Artemisia armeniaca*, *Orostachys spinosa*, *Sedum hybridum*, которой подчиняется доминанта видов вторичной сукцессии *Festuca valesiaca*, говорит о наличии внутреннего потенциала, определяющего возможность самовосстановления ПТК.

ЛИТЕРАТУРА

- Бактыбаева З. Б. Влияние объектов горно-рудной промышленности на содержание цинка и меди в компонентах речных экосистем (Зауралье Республики Башкортостан) // Экология и безопасность жизнедеятельности. 2014. № 1. С. 83–90.
- Безель В. С., Жуйкова Т. В., Гордеева В. А. Геохимия травянистых биогеоценозов: биогенные циклы химических элементов при загрязнении природной среды тяжелыми металлами // Геохимия. 2015. № 3. С. 252–263. [Bezel' V. S., Zhuikova T. V., Gordeeva V. A. Geochemistry of grass biocenoses: Biogenic cycles of chemical elements at contamination of the environment with heavy metals // Geochemistry. 2015. Vol. 53, N 3. P. 241–252].
- Вельц Н. Ю., Турлибекова Д. М. Аккумуляция тяжелых металлов в надземной части высших растений, произрастающих в г. Орске и его окрестностях // Вестн. ОГУ. 2011. № 12 (131). С. 378–379.
- Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Добровольский В. В. Основы биогеохимии. М.: Высш. шк., 1998. 413 с.
- Жуйкова Т. В., Мелинг Э. В., Кайгородова С. Ю., Безель В. С., Гордеева В. А. Особенности почв и травянистых растительных сообществ в условиях техногенеза на Среднем Урале // Экология. 2015. № 3. С. 163–172 [Zhuikova T. V., Meling E. V., Kaigorodova S. Y., Bezel' V. S., Gordeeva V. A. Specific features of soils and herbaceous plant communities in industrially polluted areas of the Middle Urals // Rus. Journ. Ecol. 2015. Vol. 46, N 3. P. 213–221].
- Касимов Н. С. Геохимия степных и пустынных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1988. 254 с.
- Ковальский В. В., Кривицкий В. А., Алексеева С. А., Летунова С. В., Опекунова М. Г., Скарлыгина-Уфимцева М. Д., Берман Ш., Илзинь А., Петерсон Н., Жогова Е. П., Рублик Р. Я. Южно-Уральский субрегион биосферы // Тр. биогеохим. лаборатории. 1981. Т. 19. С. 3–64.
- Кужина Г. Ш., Ягафарова Г. А., Янтурин С. И. Исследование содержания тяжелых металлов в почвах и растительности в окрестностях недействующих и отработанных карьеров Башкирского Зауралья. Науч.-метод. электрон. журн. Концепт. 2014. Т. 20. С. 2426–2430.
- Манджиева С. С., Минкина Т. М., Мотузова Г. В. Головатый С. Е., Мирошниченко Н. Н., Фатеев А. И., Лукашенко Н. К. Фракционно-групповой состав соединений цинка и свинца как показатель экологического состава почв // Почвоведение. 2014. № 5. С. 632–640 [Mandzhieva S. S., Minkina T. M., Motuzova G. V., Golovatyi S. E., Miroshnichenko N. N., Fateev A. I., Lukashenko N. K. Fractional and group composition of zinc and lead compounds as an indicator of the environmental status of soils // Eurasian Soil Sci. 2014. Vol. 47, N 5. P. 511–518.]
- Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почв химическими веществами. Нормативные материалы. 1993.
- Минкина Т. М., Мотузова Г. В., Назаренко О. Г., Крыщенко В. С., Манджиева С. С. и др. Формы соединений тяжелых металлов в почвах степной зоны // Почвоведение. 2008. № 7. С. 810–818 [Minkina T. M., Kryshchenko V. S., Mandzhieva S. S., Motuzova G. V., Nazarenko O. G. Forms of heavy metal compounds in soils of the steppe zone // Eurasian Soil Science. 2008. Vol. 41, N 7. P. 708–716].
- Нешатаев Ю. Н. Методы анализа геоботанических материалов. М.: ЛГУ, 1987. 192 с.
- Обзор о состоянии окружающей среды на территории городского округа г. Сибай Республики Башкортостан. 2015.
- Опекунов А. Ю., Опекунова М. Г. Геохимия техногенеза в районе разработки Сибайского медно-колчеданного месторождения // Зап. Горного ин-та. 2013. Т. 203. С. 196–204.
- 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. Сер. 7. Вып. 4, № 31. С. 45–53.
- Опекунова М. Г., Муратова Э. Э. Применение метода корреляционных плеяд для оценки трансформации природных комплексов в зоне воздействия Башкирского медно-серного комбината // Там же. Сер. 7. Геология. География. 2005. №2. С. 51–66.
- Опекунова М. Г., Сомов В. В., Сокульская Ю. С., Кукушкин С. Ю., Цапарина Л. Ю., Папаян Э. Э. Воздействие природных и антропогенных факторов на элементный состав растений Башкирского Зауралья // Биосфера. 2015. Т. 7, № 2. С. 181–198.
- Семенова И. Н., Ильбулова Г. Р., Суюндуков Я. Т. Изучение эколого-трофических групп почвенных микроорганизмов в зоне влияния горно-рудного производства // Фундаментальные исследования. 2011. № 11-2. С. 410–414.
- Скарлыгина-Уфимцева М. Д., Опекунова М. Г. Биологические реакции *Salvia stepposa* Schost. на высокое содержание Cu и Zn в среде обитания // Вестн. Ленингр. ун-та. 1987. № 2. С. 77–84.
- Терентьев П. В. Метод корреляционных плеяд // Там же. Сер. биол. 1959. № 9, вып. 2. С. 137–141.
- Overesch M., Rinklebe J., Broll G., Neue H.-U. Metals and arsenic in soils and corresponding vegetation at Central Elbe river floodplains (Germany) // Environ. Pollution. 2007. Vol. 145, N 3. P. 800–812.
- Steinhaus G., Adlassnig W., Lendl T., Peroutka M., Weidinger M., Lichtscheidl I. K., Bichler M. Metalloid contaminated microhabitats and their biodiversity at a former antimony mining site in schlaing, Austria // Open Environ. Sci. 2009. Vol. 3. P. 26–41.

Phytoindication in Landscape Transformation Studies on Sibay Chalcopyrite Deposits (Southern Urals)

M. G. OPEKUNOVA, A. Yu. OPEKUNOV, E. E. PAPYAN, V. V. SOMOV

St. Petersburg State University
199178, St. Petersburg, V. O. 10-th Line, 33/35
E-mail: m.opekunova@mail.ru

Changes of vegetation properties (biogeochemical, morphological, floristic, phytocenotic) around Sibay chalcopyrite deposits were studied. Areas at different distances from mining facilities were investigated. Heavy metal (HM) content was measured in geographical components: soils, waters, bottom sediments, above-ground vegetation and several plant species (*Artemisia austriaca*, *Salvia stepposa*, *Thymus marschallianus*, *Veronica incana*, *Caragana frutex*, *Phlomis tuberosa*, *Achilea setacea*, *Galium verum*, *Phragmites australis*). Groups (pleiads) of species based on interspecific contingency coefficient were identified. The clusters represented ecological conditions and level of anthropogenic stress. The set of features for evaluation of transformation of natural territorial complexes by means of phytoindication was proposed.

Key words: plants, mining industry, environment, heavy metals, pollution, bioindication.