ЭКОЛОГИЯ, 2015, № 3, с. 163–172

УДК 574.4:574.472+631.4:[631.442+631.423]

ОСОБЕННОСТИ ПОЧВ И ТРАВЯНИСТЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА НА СРЕДНЕМ УРАЛЕ

© 2015 г. Т. В. Жуйкова*,, Э. В. Мелинг*, С. Ю. Кайгородова**, В. С. Безель**, В. А. Гордеева***

**Нижнетагильская государственная социально-педагогическая академия*
622031 Нижний Тагил, ул. Красногвардейская, 57
***Институт экологии растений и животных УрО РАН*
620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202
e-mail: hbfnt@rambler.ru

Поступила в редакцию 26.03.2014 г.

Изучена антропогенная трансформация почв и особенности травянистых растительных сообществ в условиях химического загрязнения тяжелыми металлами. По ландшафтным и почвенным условиям изученные участки разделены на две группы – агроземы и техноземы. Фитоценозы участков фоновой и буферной зон относятся к гликофитному варианту лугового типа растительности, импактной – к предшествующей лугам стадии восстановительной сукцессии. Химическое загрязнение приводит к снижению коэффициентов сходства между сообществами и повышению таксономического разнообразия за счет снижения видовой насыщенности родов и семейств и повышения доли монотипных таксонов. Химическое загрязнение в большей степени, чем тип сообщества и группа почв, влияет на видовую насыщенность и проективное покрытие видов.

Ключевые слова: тяжелые металлы, агроземы, техноземы, травянистые фитоценозы, синтаксономическая характеристика, таксономическое богатство и разнообразие, видовая насыщенность, проективное покрытие видов.

DOI: 10.7868/S0367059715030130

Антропогенное воздействие может изменять сложившееся стабильное состояние природных экосистем, вплоть до полного уничтожения почвенного покрова и растительности. Это в полной мере относится к деградации земель в районах предприятий металлургической и горнодобывающей промышленности (Козлов, Воробейчик, 2012; Пуртова и др., 2013; Rosenberg et al., 1979; Folkson, 1984; De Vries, 1988; Sienhiegwieg, 1989).

Крупнейший источник аэрогенных выбросов на Среднем Урале – Нижнетагильский металлургический комбинат (ОАО "Евраз НТМК"), функционирующий с 1938 г. Загрязняющие вещества – тонкодисперсные пылевые частицы с содержанием ионов Cu, Ni, Pb, Cd, Zn, Cr, As, Hg, SO_2, NO_2, CO_2 и дигидросульфид.

Цель работы – изучение в градиенте химического загрязнения антропогенно-деградированных почв и особенностей сформировавшихся в этих условиях травянистых сообществ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В 2009–2012 гг. изучали биотопы в агрогенных и техногенных ландшафтах, на которых сформировались травянистые сообщества.

Описание и диагностика агрогенно-преобразованных естественных почв выполнены в июле 2012 г. на основе изучения их морфологического строения и в соответствии с методическими рекомендациями (Шишов и др., 2014). Диагностика молодых почв отвалов выполнена с учетом результатов исследований почв и грунтов отвалов горнодобывающей промышленности Урала (Махонина, 2003; Забалуев и др., 2007).

Химический состав почв изучали в соответствии с аттестованными методами анализа в аккредитованной лаборатории ИЭРиЖ УрО РАН (Аттестат аккредитации № РОСС RU. 0001.515630). В почвенных образцах определяли кислотность водной и солевой вытяжек ($pH_{вод}$, $pH_{сол}$), гидролитическую кислотность, обменные кальций и магний, степень насыщенности основаниями, подвижные калий и фосфор, легкогидролизуемый азот,

общий углерод, нитраты (Теория и практика..., 2006). Анализ почвы на содержание тяжелых металлов выполнен по РД 52.18.191-89. В кислотных вытяжках измеряли содержание Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии на спектрометре AAS Vario 6 фирмы Analytik Jena AG.

На основе концентраций тяжелых металлов в почвах и расчетного индекса загрязнения (суммарного коэффициента концентрации *Z*, выраженного в относительных к фоновым значениям единицах) были выделены зоны техногенной нагрузки – фоновая, буферная и импактная. Названия зон даны в соответствии с номенклатурой ЮНЕП (Global..., 1973). Фоновые участки были заложены в агрогенных ландшафтах (на заброшенных пашнях); импактные размещены в сугубо техногенных ландшафтах – на отвалах предприятий железорудной горнодобывающей промышленности и черной металлургии. В буферной зоне один из участков заложен в агроландшафте, второй – на отвале магнезитовых пород, относящемся к агломерации горнодобывающих предприятий г. Н. Тагила, для объединения контрастных почвенно-экологических условий фоновой и импактной зон.

Описание видового состава и проективного покрытия видов травянистых сообществ выполнено в период максимального развития травостоя (июль). Для исследований подбирали типичные по составу и структуре для данных районов участки и выявляли полный список видов растений (Понятовская, 1964). Названия растений даны по сводке С.К. Черепанова (1995). В качестве показателей таксономического разнообразия использованы коэффициенты насыщенности надвидовых таксонов (Второв, Второва, 1983).

В пределах пробных площадей на учетных площадках определены проективное покрытие (ПП) и видовая насыщенность сообществ стандартными методами (Миркин, Розенберг, 1978; Махнев и др., 1990): 20 (0.25 м^2) и 5 (1.0 м^2) учетных площадок для оценки проективного покрытия и видовой насыщенности соответственно. Ежегодное описание данных показателей выполняли на постоянных площадях в пределах исследуемых сообществ. Представлены обобщенные данные за четыре года (2009–2012 гг.).

Статистический анализ проводили с вычислением среднего арифметического (*M*), ошибки (*m*) и среднего квадратического отклонения (*S*). Сравнение видового состава сообществ основано на коэффициенте Чекановского-Съеренсена (I_{SC}) Множественные сравнения проведены *S*-методом Шеффе. Влияние исследуемых факторов на проективное покрытие и видовую насыщенность сообществ оценено однофакторным дисперсионным анализом. Анализ выполнен с помощью ПСП Statistica v. 10.0 (StatSoft, Inc., 2012).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика химического загрязнения почв. Почвенно-растительный покров исследуемой территории сформировался в условиях таежной географической зоны, подзоне южной тайги. В процессе длительного антропогенного освоения и техногенеза формируются почвы, отличные от исходных дерново-подзолистых, характерных для данной территории. В агроландшафтах сформировались агродерново-подзолистые почвы, которые после прекращения использования сельхозугодий под пашню превратились в залежи с начальными стадиями дернового процесса. На отвалах медно- и железорудных промышленных производств формируются инициальные почвы со специфическими свойствами.

Подробное описание уровней загрязнения почв на исследуемых территориях приведено ранее (Ivshina et al., 2014). Максимальное содержание подвижных форм тяжелых металлов в почве достигает для меди – 288, свинца – 23, кадмия – 2, цинка – 343, железа – 16185 мкг/г. Значительные превышения фоновых концентраций отмечены по Cd – в 78 раз, Cu – в 10 раз, Zn – в 29 раз. Токсическая нагрузка (*Z*) на техногенно нарушенных участках возрастала в 30 раз по сравнению с фоновым (табл. 1).

Характеристика почв и ландшафтов на пробных площадях. **Участки фоновой зоны** (57°57′50″ с.ш., 60°15′11″ в.д.) представлены залежными землями, выведенными из-под пашни 17–20 лет назад (см. табл. 1). В течение этого времени в агрогенных почвах в разной степени развивался дерновый процесс. В морфологическом облике почв отмечены четкие признаки пахотного горизонта P, под которым сохраняются элювиальный EL или субэлювиальный BEL горизонты. На участке Фон-1 имеются слабые признаки сезонного переувлажнения, почва глееватая. Морфологические признаки позволяют диагностировать данные почвы как агродерново-подзолистые, возникшие при освоении дерново-подзолистых тяжелосуглинисто-глинистых почв, развитых на известковистых глинах. Данные почвы проградированы дерновым процессом: почва участка Фон-1 – глееватая, на участке Фон-2 – типичная.

Почвы фоновых участков характеризуются слабокислой и близкой к нейтральной средой (pH$_{вод}$ 5.8–6.6), невысокими значениями гидролитической кислотности (табл. 2). Обменный комплекс этих почв насыщен основаниями до 57–95%, в основном кальцием. Наблюдаются признаки элювиального выноса кальция и маг-

Таблица 1. Характеристика ландшафтов и почв исследованных участков

Зона нагрузки	Площадка/Z, отн. ед.	Участок	Элемент рельефа	Ландшафт		Почва		
				географический	геохимический	тип	подтип	род/вид
Фоновая	Фон-1/1.0	Агроландшафт, залежь более 20 лет	Очень пологий склон невысокого увала	Агрогенный	Трансэлювиальный, переходный к трансаккумулятивному	Агродерново-подзолистая	Глееватая	Проградированная дерновым процессом тяжелосуглинистая-глинистая, на делювии известковистых глин
	Фон-2/1.44	Агроландшафт, залежь менее 20 лет	Очень пологий склон невысокого увала	Агрогенный	Трансэлювиальный	Агродерново-подзолистая	Языковатая	Проградированная дерновым процессом тяжелосуглинистая-глинистая, каменистая, на делювии известковистых глин
Буферная	Буфер-1/3.53	Залежь около 20 лет	Нижняя часть пологого придолинного склона увала, возможно, речная терраса	Естественный, агрогенно-преобразованный	Трансаккумулятивный	Агродерново-подзолистая	Глееватая	Проградированная дерновым процессом пылевато-суглинистая, дресвянистая, на делювии талькового сланца
	Буфер-2/9.03	Верхняя терраса старого отвала. Рядом карьер старше 25–35 лет, старая шахта	Техногенно-преобразованный, выровненная верхняя терраса отвала	Техногенный	Элювиальный	Молодая почва, формирующаяся на отвале магнезиальных пород и талькового сланца (литострат)	Задернованный	Пылеватый суглинок на тальковом сланце с техногенными включениями
Импактная	Импакт-1/21.58	Терраса отвала ВГОК в средней части склона	Техногенно-преобразованный, средняя часть крутого склона отвала, терраса	Техногенный	Трансэлювиальный	Молодая почва, формирующаяся на отвале рудника ВЖР ВГОК (артииндустрат)	Задернованный	Суглинисто-глинистый, каменистый с включениями железорудного агломерата, концентрата, шлака, известняка, талька и т.п.
	Импакт-2/29.53	Шлаковый отвал НТМК, старый участок. Верхняя терраса отвала, технически рекультивирована	Техногенно-преобразованный, верхняя терраса отвала	Техногенный	Элювиальный	Молодая почва, формирующаяся на насыпном рекультивированном субстрате, подстилаемом грунтом отвала шлаков и т.п. (артииндустрат-реплантозем)	Задернованный	Тяжелый суглинок, каменистый, с включениями шлака, руды, щебня кварца и талька

Таблица 2. Агрохимические свойства почв и грунтов исследованных участков

Площадка	Горизонт	Глубина, см	$pH_{вод}$	$pH_{сол}$	$H_{гидр}$	Ca + + Mg	Ca	Mg	V, %	$N_{легк}$	P_2O_5	K_2O	$C_{общ}$, %	NO_3, мг/кг
					мг-экв/100 г					мг/100 г				
Фон-1	AY	0–2	6.55	6.58	1.49	26.00	20.00	6.00	94.59	7.36	48.67	71.06	6.26	1.63
	P	2–37	6.55	6.48	2.10	20.00	16.00	4.00	90.50	5.10	19.31	22.05	3.59	0.57
	(EL)	37–42	6.59	6.28	2.01	15.00	13.33	1.67	88.17	6.17	14.40	13.65	1.60	0.29
	BELg	42–...	6.29	5.81	4.55	14.67	9.33	5.33	76.32	3.86	3.91	11.55	0.52	1.29
Фон-2	P	0–19	6.32	6.19	3.15	17.33	16.00	1.33	84.62	5.61	3.67	22.39	4.48	1.07
	(EL)	19–32	6.28	4.02	6.04	8.00	5.33	2.67	56.99	2.60	0.88	12.45	0.46	1.27
	BEL	32–42	5.90	3.75	8.58	13.33	9.33	4.00	60.86	2.75	1.01	15.41	0.46	1.04
	BT	42–…	5.77	3.78	10.76	21.33	13.33	8.00	66.47	2.95	1.08	27.49	0.45	0.80
Буфер-1	O	0–1	5.66	6.31	21.00	51.00	45.00	6.00	70.83	61.38	49.70	418.00	29.14	0.91
	AY	1–4	6.34	6.05	3.85	30.00	20.00	10.00	88.63	6.75	3.41	34.62	6.59	0.86
	P	4–25	6.48	6.09	2.80	21.67	16.67	5.00	88.56	4.50	1.66	11.96	2.30	0.90
	(EL)	25–29	6.16	4.55	2.63	14.67	13.33	1.33	84.82	2.27	1.03	11.57	0.38	0.00
	BEL	30–44	6.24	4.09	2.63	25.33	13.33	12.00	90.61	1.60	6.61	11.31	0.21	0.55
	BT	44–59	6.08	4.01	8.40	32.00	22.67	9.33	79.21	1.57	30.05	12.98	0.13	0.11
Буфер-2	O	0–1	6.05	6.40	14.88	65.00	55.00	10.00	81.38	57.90	91.68	544.25	32.65	0.61
	AY	1–6	6.76	7.06	1.23	24.00	20.00	4.00	95.14	4.76	34.34	38.97	6.69	1.46
	Cur	6–15	5.89	4.67	2.80	6.67	5.33	1.33	70.42	2.86	11.28	11.31	0.52	0.00
Импакт-1	O	0–1	5.28	6.51	11.38	37.50	30.00	7.50	76.73	29.13	82.60	230.95	20.53	0.53
	AY	1–5	7.63	7.48	0.70	38.00	30.00	8.00	98.19	4.14	69.59	57.79	3.57	1.58
	C1 tech	5–20	7.76	6.96	0.88	29.33	24.00	5.33	97.10	1.25	158.05	27.11	0.30	0.41
	C2 tech	20–37	6.61	6.30	0.96	40.00	30.67	9.33	97.65	1.17	117.90	26.12	0.17	0.15
Импакт-2	AY	0–6	7.35	7.74	0.79	38.00	22.00	16.00	97.97	5.12	4.25	55.69	5.22	1.56
	C rr	6–27	8.57	7.68	0.09	35.00	21.00	14.00	99.75	4.47	10.77	26.47	1.59	0.68
	C2 tech	27–40	8.13	7.74	0.79	30.00	18.33	11.67	97.44	1.15	51.20	5.62	0.16	0.00

ния из элювиальной части профиля. Обеспеченность элементами питания растений (легкогидролизуемым азотом и подвижными фосфатами) почв низкая и очень низкая. Это связано с тем, что исходно бедные дерново-подзолистые почвы были выработаны пашней и сельхозкультурами. Более полно данные почвы обеспечены подвижными формами калия. Содержание общего углерода в почвах низкое, нитратов практически нет (0.3–1.6 мг/кг).

Участки буферной зоны представлены очень контрастными почвами (см. табл. 1). Участок Буфер-1 (57°52′18″ с.ш., 59°59′39″ в.д.) заложен на 20-летней залежи. Естественный ландшафт слабо преобразован сельскохозяйственным воздействием. Угодье используется как сенокос, в почве под ветошью трав сформирована связная дернина, хорошо выражен пахотный горизонт, под которым наблюдаются признаки подзолистого процесса и оглеения. Почва диагностирована как агродерново-подзолистая, глееватая, проградированная дерновым процессом на делювии талькового сланца, слабокислая, в нижней части профиля проявляется обменная и гидролитическая кислотность. Обменный комплекс почвы насыщен обменными основаниями до 70–90% с преобладанием кальция, также высокое содержание магния, поскольку тальковый сланец является магнезиальной породой. Высокое содержание элементов питания растений приурочено только к верхнему органическому горизонту. Вниз по профилю обеспеченность азотом и фосфором резко падает до очень низкой, а калием постепенно снижается до средних и низких значений (см. табл. 2).

Участок Буфер-2 (57°58′13″ с.ш., 59°58′35″ в.д.) заложен на верхней террасе отвала, в элювиаль-

ной позиции техногенного ландшафта. Отвал представлен мелкоземом, дресвой и щебнем талькового сланца и техногенных включений. Почва молодая, формируется благодаря развитию дернового процесса на тальковом щебне и мелкоземе. Морфологически выражены горизонты О (ветошь луговых трав и начальный этап формирования лесной подстилки на опушке леса) и AY (задернованный серогумусовый горизонт); ниже находится пестрая, охристая, плотная, бесструктурная, мелкоземисто-дресвянистая суглинистая масса со щебнем талька, слабо переработанная процессами почвообразования. В систематическом плане субстрат представляет собой переходный этап от техногенных поверхностных образований (литостратов и артииндустратов) к молодым почвам, формирующимся по буроземному типу (см. табл. 1). Почва слабокислая, насыщена основаниями на 70–95%, в обменном комплексе преобладает кальций, но концентрации магния также высокие, характеризуется высокой обеспеченностью элементами питания растений, особенно фосфором и калием, содержание легкогидролизуемого азота очень высокое, нитратов не обнаружено.

В импактной зоне исследованы почвы, формирующиеся в элювиальной и трансэлювиальной позициях техногенных ландшафтов (см. табл. 1). Отвалы представляют собой террасированные насыпи вскрышных и вмещающих пород, агломерата, шлаков и других техногенных включений. На них проведена техническая рекультивация: сделаны террасы, на поверхность которых местами нанесен мелкозем. Молодые почвы проходят стадию развития, переходную от техногенных поверхностных образований (артииндустратов, реплантоземов) к задернованным каменистым почвам литоземного или буроземного типов.

Почва участка Импакт-1 (57°54′14″ с.ш., 59°54′41″ в.д.) молодая, представлена слабовыраженной подстилкой, состоящей в основном из ветоши трав, и слабозадернованным гумусовым горизонтом AY мощностью 4.5–5.0 см. Ниже залегает субстрат отвала: пестроокрашенный, серо-бурый с оранжевыми и малиновыми пятнами суглинок с включениями шлака, руды, талька, известняка, агломерата, концентрата, окалины, шлама, кокса и т.д. Кислотность изменяется от слабокислой в подстилке до слабощелочной в минеральной толще. Насыщенность основаниями до 98%, в обменном комплексе преобладает кальций. Обеспеченность фосфором и калием почвы очень высокая, азотом очень высокая только в органическом горизонте, вниз по профилю резко падает. Нитратов практически не обнаружено. Повышенное содержание общего углерода в подстилке обусловлено неразложившейся органикой, в минеральных горизонтах его содержание резко падает (см. табл. 2).

Участок Импакт-2 (57°58′12″ с.ш., 59°57′21″в.д.) характеризуется молодой почвой (см. табл. 1). Лесная подстилка не сформирована, серогумусовый горизонт AY мощностью 6.0 см слабо задернован, но хорошо гумусирован, имеет комковато-пылеватую структуру. Под ним залегает рекультивированный субстрат отвала мощностью 25 см, имеющий белесовато-серо-бурый цвет и комковато-пылеватую структуру суглинистого мелкозема, включает щебень ультраосновных пород, шлак, оплавленную руду. Далее ровная граница отделяет рекультивированный субстрат от грунта шлакового отвала, который представлен ярко-желто-бурой бесструктурной массой тяжелого суглинка с включениями кварца, мрамора, известняка, шлака, железорудного концентрата и т.п. Вероятно, верхняя толща рекультивированного субстрата (25–30 см) отсыпана здесь на этапе технической планировки террасы. Почва характеризуется слабощелочной средой. Обменный комплекс насыщен основаниями до 97–99%, преобладает кальций. Обеспеченность азотом низкая, с глубиной – до очень низкой, фосфором – в верхней части (рекультивированный субстрат) низкая, в грунте – высокая. Содержание калия в гумусовом горизонте высокое, вниз по профилю снижается до очень низкого (см. табл. 2).

Таким образом, по ландшафтным и почвенным условиям выбранные участки можно разделить на две группы. В I группу (далее агроземы) вошли участки Фон-1, Фон-2, Буфер-1, расположенные в агрогенных ландшафтах с агрогенно-преобразованными дерново-подзолистыми почвами. Эти почвы развивались под таежной растительностью и были дифференцированы элювиальными процессами. Около 100 лет назад они были разработаны под пашню, и их свойства и состав определялись агротехникой. Процессы элювиального выноса и неполное возмещение выноса сельхозкультурами существенно обеднили их макро- и микроэлементный состав. Участки группы II (далее техноземы: Буфер-2, Импакт-1, Импакт-2) заложены в техногенных ландшафтах (на промышленных отвалах, возраст которых более 45 лет) с молодыми почвами, формирующимися по буроземному и литоземному типам на техногенной почвообразующей породе, богатой обменными основаниями и элементами питания растений. В настоящее время и те, и другие почвы находятся на разных стадиях развития дернового процесса, который ведет к обогащению верхних почвенных горизонтов обменными основаниями и элементами питания растений.

Синтаксономическая характеристика фитоценозов. **Фон-1.** Безранговое сообщество Pimpinella

saxifraga-Poa angustifolia [Arrhenatheretalia]. Доминанты: *Poa angustifolia*, *Lathyrus pratensis*. Синтаксономическое положение: сообщество отнесено к порядку Arrhenatheretalia R.Tx. 1931 класса Molinio-Arrhenatheretea R.Tx. 1937 em. R.Tx. 1970. В составе сообщества присутствуют виды как союза Festucion pratensis Sipajlova et al. 1985 (настоящие луга европейской части России и Сибири – *Trifolium pratense*, *Phleum pratense*), так и союза Cynosurion R.Tx. 1947 (рекреационные и экстенсивно выпасаемые луга – *Taraxacum officinale* s. l., *Trifolium repens*).

Фон-2. Безранговое сообщество Deschampsia caespitosa-Festuca pratensis [Arrhenatheretalia]. Доминируют *Festuca pratensis*, *Poa angustifolia*, *Deschampsia caespitosa*, *Trifolium pratense*. Присутствуют диагностические виды класса Molinio-Arrhenatheretea и порядка Arrhenatheretalia: *Achillea millefolium*, *Phleum pratense*, *Taraxacum officinale* s. l., *Leucanthemum vulgare*. Как реликты предшествующих сукцессионных стадий отмечены *Cirsium setosum*, *Vicia hirsuta*, *Artemisia vulgaris*, *Linaria vulgaris*.

Буфер-1. Безранговое сообщество Alchemilla vulgaris-Festuca pratensis [Arrhenatheretalia/Carici macrourae-Crepidetalia sibiricae]. В составе преобладают виды порядка гликофитных лугов Arrhenatheretalia: *Festuca pratensis*, *Poa angustifolia*, *Galium mollugo*, *Lathyrus pratensis*, *Carum carvi* и др. Присутствуют виды порядка лесных полян и лугов Carici macrourae-Crepidetalia sibiricae Ermakov et al. 1999: *Alchemilla vulgaris*, *Polygonum bistorta*.

Буфер-2. Безранговое сообщество Carum carvi-Festuca pratensis [Arrhenatheretalia]. Состав видов типичен для сообществ порядка Arrhenatheretalia: *Festuca pratensis*, *Poa angustifolia*, *Carum carvi*, *Trifolium pratense* и др. Синантропных видов в сообществе мало, практически все они характерны и для луговых сообществ (*Cirsium setosum*, *Melilotus albus*, *Linaria vulgaris*).

Импакт-1. Безранговое сообщество Tussilago farfara-Calamagrostis arundinacea [Dauco-Melilotion/Agropyrion repentis]. Сообщество является переходным между союзом Dauco-Melilotion Görs 1966 (ксеротермные рудеральные сообщества двумноголетников; диагностические виды в сообществе: *Melilotus officinalis*, *Melilotus albus*, *Linaria vulgaris*) класса Artemisietea vulgaris Lohm. et al. in Tx. 1950 (диагностический вид в сообществе: *Artemisia vulgaris* L.) и союзом Agropyrion repentis класса Agropyretea repentis Oberd. et al. 1967 (диагностические виды: *Calamagrostis epigeios*, *Picris hieracioides*, *Seseli libanotis*). Сукцессия на отвалах достигла злаковой стадии с доминированием вейника наземного с сохранением видов бурьянистой стадии. В сообществе присутствует вид класса вырубок и гарей Epilobietea angustifolii R.Tx. et Prsg 1950 – *Chamaenerion angustifolium*. Синтаксономический статус за время наблюдений не изменился.

Импакт-2. Безранговое сообщество Latyrus pratensis-Calamagrostis arundinacea [Dauco-Melilotion/Agropyrion repentis]. Сообщество является переходным между союзом Dauco-Melilotion (диагностические виды в сообществе: *Melilotus albus*, *Berteroa incana*, *Linaria vulgaris*) класса Artemisietea vulgaris (диагностический вид в сообществе: *Artemisia vulgaris*) и союзом Agropyrion repentis (злаковая стадия восстановительной сукцессии; диагностические виды: *Calamagrostis epigeios*, *Convolvulus arvensis*). Присутствует в сообществе вид класса Epilobietea angustifolii – *Chamaenerion angustifolium*. Сукцессия идет в направлении развития сообщества класса Molinio-Arrhenatheretea (диагностические виды в сообществе: *Poa angustifolia*, *Trifolium pratense*, *Lathyrus pratensis*, *Vicia cracca*, *Stellaria graminea* и др.). Синтаксономический статус за время наблюдений не изменился.

Как видно из описания, сообщества участков фоновой и буферной зон относятся к классу Molinio-Arrhenatheretea и соответствуют гликофитному варианту лугового типа растительности, импактной – являются переходными между классами Artemisietea vulgaris (рудеральные сообщества дву- многолетников) и Agropyretea repentis (рудеральные сообщества с преобладанием многолетних злаков, представляющие предшествующую лугам стадию восстановительной сукцессии). Далее – это злаковые сообщества. Несмотря на разнообразие данных сообществ по синтаксономическому положению и стадии сукцессионного развития, они характеризуются рядом признаков, отражающих развитие на группах почв, описанных выше в общем градиенте загрязнения (агроземы и техноземы).

Оценка степени сходства видового состава фитоценозов. Максимальное сходство видового состава обнаруживают сообщества фоновых территорий (Фон-1 и Фон-2: $I_{SC} = 0.85$). С ростом токсической нагрузки различие между фитоценозами увеличивается, что обусловлено сменой видового состава в градиенте загрязнения. Наименьшее сходство обнаруживают сообщества участков Фон-1 и Импакт-1–2 ($I_{SC} = 0.51$). Сходство между сообществами агроземов выше ($I_{SC} = 0.72–0.85$), чем техноземов ($I_{SC} = 0.53–0.62$). При сходной кратности увеличения токсической нагрузки на обоих типах почв (в 3.5 раза – на агроземах и 3.3 – на техноземах) показатель I_{SC} уменьшается в равной степени – в 1.2 раза.

Таксономическое богатство и разнообразие фитоценозов. В исследуемых сообществах выявлены 83 вида, входящие в состав 65 родов, 21 семейства и 2 двух классов отдела Magnoliophyta Cronq.,

Таблица 3. Таксономическое богатство и разнообразие таксономической структуры исследуемых сообществ (2009–2012 гг.)

Участок	Количество таксонов, шт.				Коэффициент насыщенности надвидовых таксонов			Доля монотипных таксонов	
	семейств (с)	родов (р)	видов (в)	общее (об.)	в/р	в/с	р/с	родов	семейств
Агроземы									
Фон-1	11	33	42	86	1.27	3.82	3.00	0.76	0.27
Фон-2	13	40	50	103	1.25	3.85	3.08	0.80	0.31
Буфер-1	15	44	55	114	1.25	3.67	2.93	0.77	0.33
Техноземы									
Буфер-2	13	39	47	99	1.21	3.62	3.00	0.85	0.38
Импакт-1	12	37	42	91	1.14	3.50	3.08	0.86	0.42
Импакт-2	9	28	32	69	1.14	3.56	3.11	0.86	0.44

Takht. & W. Zimm. Таксономическое богатство отдельных сообществ приведено в табл. 3. В градиенте загрязнения общее число видов в сообществах, произрастающих на агрогенных почвах, увеличивается, на техногенных – уменьшается. Наиболее ярко это выражено в условиях высокого уровня загрязнения (Импакт-2).

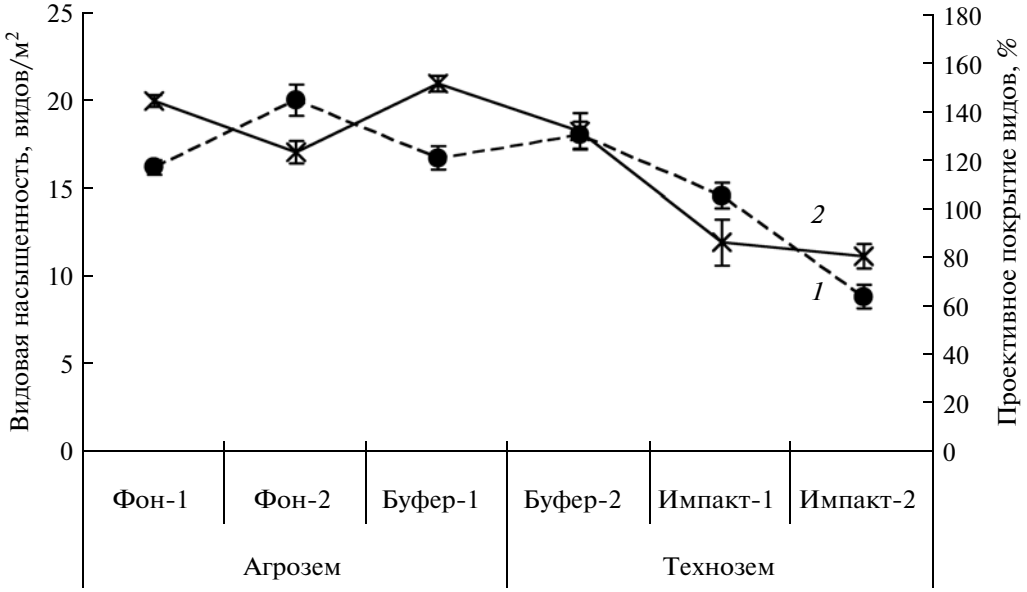
Коэффициент видовой насыщенности рода и семейства в сообществах на агрогенных почвах выше, чем на техногенных, что объясняется высокой долей монотипных родов и семейств в составе сообществ техноземов по сравнению с агроземами (см. табл. 3), и свидетельствует о большем разнообразии таксономической структуры сообществ.

Таким образом, в градиенте загрязнения прослеживается снижение таксономического богатства и увеличение таксономического разнообразия. К подобным заключениям приходят И.Г. Емельянов с соавт. (1999) при изучении сообществ горных ландшафтов. По их мнению, функциональная устойчивость биотических сообществ в экосистемах с небольшой экологической емкостью (например, в горах) поддерживается благодаря существованию полифункциональной системы монотипичных таксонов, что является одной из стратегий адаптации биотических сообществ к специфическим экологическим условиям.

Интересен факт сходства наблюдаемой тенденции с реакцией суходольных лугов Среднего Урала на сенокошение и выпас. Анализ флористического состава суходольных лугов показал, что для сообществ, находящихся на первой стадии трансформации, коэффициент видовой насыщенности рода колеблется в пределах 1.33–1.28, на второй – 1.32–1.18, на третьей – 1.19–1.14, на четвертой – 1.11 (Горчаковский, 1999). Как в случае трансформации лугов под влиянием сенокошения и выпаса, так и под влиянием химического загрязнения наблюдается повышение таксономического разнообразия. Это позволяет рассматривать данные изменения как неспецифическую реакцию травянистых сообществ на усиление антропогенного воздействия.

Видовая насыщенность и проективное покрытие видов. Средняя видовая насыщенность сообществ агроземов варьирует от 16 до 20 видов/м^2, на техноземах – от 9 до 18 видов/м^2 (см. рисунок). Различия между сообществами, произрастающими на двух группах почв, статистически значимы (S-метод: F (5; 25) = 3.82; $p < 0.05$). Среднее суммарное проективное покрытие (СПП) видов за период наблюдения в фоновой зоне составляет 123–144%, в буферной – 132–151%, в импактной – 81–87%. На агрогенных почвах величина СПП видов на протяжении всего периода наблюдения выше, чем на техногенных (F (5; 25) = 15.72; $p < 0.001$).

Если же рассматривать данные показатели в соответствии со стадией сукцессионного развития сообществ (луговые и злаковые), то в фитоценозах, соответствующих гликофитному варианту лугового типа растительности, видовая насыщенность и проективное покрытие выше, чем в сообществах, представляющих предшествующую лугам стадию восстановительной сукцессии (видовая насыщенность: F (5; 25) = 5.73; проективное покрытие: F (5; 25) = 44.24; $p < 0.001$) (см. рисунок). Подчеркнем, что луговые сообщества отличаются от злаковых направлением изменения СПП и видовой насыщенности в градиенте загрязнения. У луговых сообществ при фоновых и средних уровнях загрязнения эти показатели практи-



Видовая насыщенность (*1*) и суммарное проективное покрытие видов (*2*) исследуемых сообществ.

чески не изменяются, у злаковых при больших токсических нагрузках – снижаются. Снижение видовой насыщенности и СПП видов травянистых сообществ при высоких уровнях химического загрязнения отмечено в ряде исследований (Шилова, Лукьянец, 1989; Махнев и др., 1990).

Обращает на себя внимание факт сходства молодого лугового сообщества агроземов (Фон-2, отсутствие дернового горизонта) с развитым луговым сообществом техноземов (Буфер-2, дерновый горизонт развит). Они характеризуются низким СПП и высокой видовой насыщенностью по сравнению с развитыми луговыми сообществами (Фон-1 и Буфер-1) (см. рисунок). Сходство проявляется также и по видовому составу ($I_{SC} = 0.82$). Можно предположить, что усиление техногенной нагрузки в градиенте “фоновая–буферная” зоны приводит к сохранению черт несформированности структуры сообществ, наблюдающихся на ранней стадии развития луга. Сообщества импактной зоны характеризуются низкими насыщенностью и покрытием по сравнению с фоновой и буферной, что отражает более раннюю стадию сукцессионного развития и влияние повышенной токсической нагрузи.

Видовая насыщенность сообществ и СПП видов различаются не только в градиенте химического загрязнения. Важную роль играет дифференциация на агрогенные и техногенные почвы и стадия сукцессионного развития сообщества. Влияние этих факторов на видовую насыщенность и проективное покрытие сообществ оценено однофакторным дисперсионным анализом (табл. 4). В большей степени оба исследуемых по-

Таблица 4. Результаты однофакторного дисперсионного анализа влияния химического загрязнения, группы почв и стадии сукцессионного развития на видовую насыщенность сообществ и проективное покрытие видов

Фактор	*df*	*F*	*p*	Доля влияния фактора, %
Видовая насыщенность сообщества				
Токсическая нагрузка	5; 79	27.05	≤0.001	64.64
Группа почв	1; 79	23.85	≤0.001	23.41
Тип сообщества	1; 79	51.37	≤0.001	39.71
Проективное покрытие видов				
Токсическая нагрузка	5; 79	22.39	≤0.001	60.21
Группа почв	1; 79	52.34	≤0.001	40.2
Тип сообщества	1; 79	103.93	≤0.001	57.1

казателя зависят от уровня токсической нагрузки и типа сообществ, в меньшей – от группы почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изученные признаки фитоценозов (видовой состав, таксономическое богатство, разнообразие таксономической структуры, видовая насыщенность и ССП) в рассматриваемом градиенте определяются уровнем загрязнения, группой почв и стадией сукцессионного развития сообществ. Ведущим является химическое загрязнение, в градиенте которого происходят смена видового состава и нарастание различий между сообществами. На агроземах эта тенденция выражена в меньшей степени, чем на техноземах.

С ростом токсической нагрузки отмечается повышение таксономического разнообразия сообществ за счет снижения видовой насыщенности родов и семейств и повышения доли монотипных таксонов. Это один из механизмов, обеспечивающий устойчивое функционирование сообществ при высоких уровнях химического загрязнения почвы.

Рассматриваемые сообщества характеризуются различными видовой насыщенностью и СПП видов. На агрогенных почвах эти показатели выше, чем на техногенных. Кроме того, они больше в луговых фитоценозах, чем в сообществах, которые представляют собой предшествующую лугам стадию восстановительной сукцессии. В целом в градиенте загрязнения отмечено снижение видовой насыщенности и проективного покрытия видов.

Независимо от группы почв показана возможность формирования луговых сообществ. Луговой фитоценоз техноземов, несмотря на длительность его существования и наличие развитой дернины, имеет черты молодых луговых сообществ агроземов. Следовательно, изменение техногенной нагрузки в градиенте “фоновая – буферная” зоны приводит к сохранению черт несформированности структуры, характерных для ранней стадии развития луга. Сообщества импактной зоны характеризуются низким уровнем рассматриваемых параметров. Это отражает раннюю стадию их сукцессионного развития и влияние повышенной токсической нагрузки.

Установленные изменения показателей фитоценозов характерны для серийных травянистых сообществ восстановительной сукцессии на залежах и отвалах, почвы которых загрязнены тяжелыми металлами. Полученные данные относятся к конкретным условиям таежной зоны Урала, уровням и виду загрязнения, что не исключает некоторые общие закономерности, справедливые для иных ситуаций при химическом загрязнении среды.

Авторы благодарны проф. А.Р. Ишбирдину за помощь в составлении синтаксономических характеристик и ценные замечания к работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Свердловской области и РФФИ (проект № 13-04-96056-р_урал_а), Программы развития ведущих научных школ (НШ-2840.2014.4), Программ Президиума УрО РАН (№ 12-И-4-2051 и № 12-И-4-2057).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Второв П.П., Второва В.Н. Эталоны природы (проблемы выбора и охраны). М.: Мысль, 1983. 205 с.

Горчаковский П.Л. Антропогенная трансформация и восстановление продуктивности луговых фитоценозов. Екатеринбург : “Екатеринбург”, 1999. 156 с.

Емельянов И.Г., Загороднюк И.В., Хоменко В.Н. Таксономическая структура и сложность биотических сообществ // Екологія та ноосферологія. 1999. Вып. 8. № 4. С. 6–7.

Забалуев В.А., Бабенко М.Г., Тарика А.Г. и др. Исследование начальных процессов гумусонакопления и почвообразования в техноземах // Биологическая рекультивация нарушенных земель. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. С. 261–285.

Козлов М.В., Воробейчик Е.Л. Воздействие точечных источников эмиссии поллютантов на наземные экосистемы: представление результатов в публикациях // Экология. 2012. № 4. С. 243–251.

Махнев А.К., Трубина М.Р., Прямоносова С.А. Лесная растительность в окрестностях предприятий цветной металлургии // Естественная растительность промышленных и урбанизированных территорий Урала / Отв. ред. Шиятов С.Г. и др. Свердловск, 1990. С. 3–40.

Махонина Г.И. Экологические аспекты почвообразования в техногенных экосистемах Урала. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. ун-та, 2003. 356 с.

Миркин Б.М., Розенберг Г.С. Фитоценология: принципы и методы. М. : Наука, 1978. 211 с.

Понятовская В.М. Учет обилия и характера размещения растений в сообществах // Полевая геоботаника / Ред. Корчагин А.А. и др. М. ; Л., 1964. Т. 3. С. 209–299.

Пуртова Л.Н., Костенков Н.М., Верхолат В.П. Почвенно-растительный мониторинг на техногенных ландшафтах Приморья (на примере рекультивируемых участков угольных шахт) // Фундаментальные исследования. 2013. № 11. Ч. 1. С. 108–114.

Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Воробьевой Л.А. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.

Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб. : Мир и семья, 1995. 992 с.

Шилова И.И., Лукьянец А.И. Сукцессии степной растительности на территориях, подверженных аэротехногенному воздействию предприятий цветной металлургии // Растительность в условиях техногенных ланд-

шафтов Урала / Отв. ред. Махнев А.К. и др. Свердловск, 1989. С. 56–79.

Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И. и др. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена. 2004. 342 с.

De Vries W. Critical deposition levels for nitrogen and sulfurs on dutch forest ecosystems // Water, Air and Soil Pollut. 1988. V. 42. № 1–2. P. 221–239.

Ivshina I.B., Kostina L.V., Kamenskikh T.N. et al. Soil Microbiocenosis as an Indicator of Stability of Meadow Communities in the Environment Polluted with Heavy Metals // Rus. J. of Ecology. 2014. V. 45. № 2. P. 83–89.

Folkson L. Deterioration of the Moss and Lichen vegetation in a forest Polluted by Heavy Metals // Ambio. 1984. V. 13. № 1. P. 3–45.

Global Environmental Monitoring System (GEMS): Action Plan for Phase I. SCOPE Rep. 3, Toronto, Canada, 1973. 132 p.

Rosenberg C.R., Hatnik D.D., Davis D.D. Forest composition at varying distances from a coal-burning power plant // Environ. Pollut. 1979. V. 19. P. 307.

Sienhiegwieg J. Forest community changes as bioindicators of contaminations // Air Pollut. and forest Decline: Proc. 14 th Int. Meet. Birmensdorf, 1989. V. 1. P. 245–248.