

УДК 504.05

**Николай Васильевич Михальчук¹, Андрей Николаевич Ажгиревич²,
Елена Александровна Брыль³**

¹канд. биол. наук, доц., директор Полесского аграрно-экологического института
Национальной академии наук Беларуси

²канд. биол. наук, зав. лабораторией Полесского аграрно-экологического института
Национальной академии наук Беларуси

³науч. сотрудник Полесского аграрно-экологического института
Национальной академии наук Беларуси

Nikolai Mikhalkchuk¹, Andrej Ashgirevich², Alena Bryl³

¹Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Director of the Agrarian and Ecological Institute
of the National Academy of Sciences of Belarus

²Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory
of the Agrarian and Ecological Institute
of the National Academy of Sciences of Belarus

³Researcher of the Agrarian and Ecological Institute
of the National Academy of Sciences of Belarus
[e-mail: info@paei.by](mailto:info@paei.by)

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РАСТЕНИЯХ ЗОНЫ ХРАНЕНИЯ ЗОЛЫ СВИНЦОВОЙ (ОКРЕСТНОСТИ ПОС. ЗЕЛЕНЬ БОР ИВАЦЕВИЧСКОГО РАЙОНА)*

Установлено, что уровни накопления тяжелых металлов в тканях растений определяются удаленностью от источника эмиссий и фактором видоспецифичности. Усредненное содержание свинца в сухой массе растений на удалении 10 м достигает 27,41 мг/кг, снижаясь более чем в 4 раза в 35-метровой полосе. Среди исследованных растений максимальное концентрирование свинца отмечено в фитомассе кислицы обыкновенной и костяники. Ранжированный ряд накопления элементов в зоне наиболее сильного загрязнения имеет следующий вид (мг/кг): Fe 280,49 > Mn 213,62 > Zn 30,34 > Pb 27,41 > Cu 5,89 > Cr 0,86 > Cd 0,64 > Ni 0,46. Кардинальное изменение соотношений Fe/Mn и Pb/Mn в растительности зоны загрязнения свидетельствует о серьезном нарушении сбалансированности микроэлементного обеспечения процессов метаболизма в растениях.

Ключевые слова: тяжелые металлы, свинецсодержащие отходы, дикорастущие растения.

Accumulation of Heavy Metals in Plants of the Lead Ash Storage Area (Environment of Zeleny Bor, Ivatsevichy District)

The article contains information indicating that the levels of heavy metals accumulation in plant tissues are determined by the distance from the emission source and the species-specificity factor. The average lead content in the dry mass of plants at a distance of 10 m reaches 27.41 mg/kg, decreasing by more than 4 times in the 35 m. Among the studied plants, the maximum concentration of lead was noted in *Oxalis acetosella* and *Rubus saxatilis*. The ranked series of accumulation elements in the zone with the most contamination has the following form (mg/kg): Fe 280,49 > Mn 213,62 > Zn 30,34 > Pb 27,41 > Cu 5,89 > Cr 0,86 > Cd 0,64 > Ni 0,46. The ratio of Fe/Mn and Pb/Mn of the polluted zone indicates a serious violation of the metabolic processes in plants.

Key words: heavy metals, lead-containing waste, wild plants.

Введение

Изучение поступления и накопления тяжелых металлов (ТМ) в растениях имеет важное практическое значение. Прежде всего растения являются промежуточным звеном,

*Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ Х19Б-004 «Особенности распределения и миграции тяжелых металлов в почвах и растительных объектах экосистем в ареале площадки складирования свинецсодержащих отходов (пос. Зеленый Бор Ивацевичского района) с разработкой рекомендации по минимизации экологических рисков».

через которое металлы попадают из воздуха, почвы и воды в организмы человека и животных, в связи с чем необходима разработка методов защиты пищевых цепей от негативного влияния ТМ [1]. Кроме того, очень актуальной проблемой является выяснение возможностей использования растений в качестве объектов для целей биоиндикации и фиторемедиации загрязненной ТМ среды.

Несмотря на то что ТМ относятся к группе приоритетных антропогенных загрязнителей, их биологическое значение различно. Zn, Cu, Mn, Co, Ni являются микроэлементами-биофилами, поскольку входят в состав активных центров многих ферментов, ответственных, в частности, за процесс формирования генеративных органов, в то время как Pb и Cd не являются жизненно необходимыми для растений. Однако следует иметь в виду, что такое деление достаточно условно, т. к. токсичность элемента в избыточных количествах не противоречит его биологической необходимости; практически любой химический элемент имеет довольно узкий диапазон оптимальных для жизнедеятельности концентраций. Такая ситуация возможна даже при чрезвычайно малых концентрациях металла [2]. При этом существенную опасность представляет отсутствие каких-либо визуальных признаков поражения растений при опасных для человека и животных содержаниях химических поллютантов.

Среди наиболее опасных поллютантов с точки зрения воздействия на человека и окружающую среду являются свинецсодержащие отходы, которые в Беларуси составляют около половины всех отходов цветных металлов – 13–15 тыс. т. Отходы свинца относятся к весьма токсичным веществам; свинец способен вызывать в организме человека мутагенные, канцерогенные, тератогенные и иные неблагоприятные эффекты. Основным источником таких отходов являются отработавшие свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. В среднем автомобильный аккумулятор содержит 20–25 % электролита, 60–65 % свинца в виде оксидно-сульфатной пасты и металлических частей (решетки, клеммы, перемычки), 12–15 % органических материалов (корпус, крышка, сепараторы) [3]. Помимо аккумуляторного лома важным источником свинца являются отходы, образующиеся в процессе его производства: аспирационные пыли, шламы и шлаки. При производстве свинца из вторсырья эти отходы составляют до 40–50 % от объема получаемых марочных сплавов. Некоторые из перечисленных отходов (пыль ротационных печей и рафинировочных котлов, черные съемы (изгарь) и желтые съемы) по содержанию свинца (60–72 %) подлежат возврату в производство для более глубокой переработки. Другие отходы, например, шлак ротационных печей, содержащие не более 3–5 % свинца, после соответствующей подготовки и обезвреживания могут быть направлены для захоронения на промышленных полигонах [4].

Одним из предприятий Брестской области, где образуются большие объемы свинецсодержащих отходов, является ООО «Белинвестторг-Сплав» (г. Белоозерск). Завод начал функционировать в 2013 г.; он осуществляет рециклинг отработанных аккумуляторных батарей и производство марочного свинца и сплавов (порядка 10 тыс. т в год).

Предположительно в 2015 г. (факт нарушения природоохранного законодательства был выявлен в 2016 г.) было осуществлено несанкционированное складирование и хранение отходов производства ООО «Белинвестторг-Сплав» вблизи пос. Зеленый Бор Ивацевичского района (около 600 метров от окраины поселка в северо-восточном направлении). Объем складированных отходов ориентировочно оценивался в 8–10 тыс. т. За время хранения отходов (около трех лет) произошло существенное загрязнение ТМ как почвогрунтов, так и растительности лесопокрытой территории, прилегающей к площадке хранения отходов.

Цель работы – оценка накопления Pb, Cd, Cu, Zn, Mn, Ni, Co, Cr древесной и травянистой растительностью лесных биогеоценозов импактной зоны хранения золы свинцовой в окрестностях пос. Зеленый Бор Ивацевичского района.

Объекты и методы проведения исследований

Для оценки накопления ТМ растениями в зоне хранения свинецсодержащих отходов (пос. Зеленый Бор) были отобраны листья древесных пород на расстоянии около 50 м от источника загрязнения, а также образцы травянистой растительности на расстоянии от 10 м до 145 м. Кроме того, для проведения сравнительных оценок была отобрана листва древесных растений, произрастающих в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) ООО «Белинвестторг-Сплав» (г. Белоозерск).

Растительные образцы анализировали на содержание ТМ методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе SOLAAR MkII M6 Double Beam AAS с пламенным атолизатором в условиях аккредитованных лабораторий Полесского аграрно-экологического института НАН Беларуси.

Статистическая обработка экспериментальных данных была выполнена с использованием пакета прикладных программ Microsoft Excel 2013 и Statistica 10.0.

Согласно В. Б. Ильину [5], по градиенту содержания в растениях элементы можно расположить в следующем порядке: $Mn > Fe > Zn > Cu > Ni > Pb > Cd$, из которого видно, что в растениях наиболее интенсивно накапливается Mn, Fe, Zn, что согласуется с физиологическим значением этих элементов.

Подобный ряд характерен и для растительности Березинского биосферного заповедника. Так, в среднем в фитомассе хвойных и лиственных деревьев региона заповедника концентрации элементов образуют следующий ряд по убыванию (мг/кг): $Mn\ 162 > Fe\ 112 > Zn\ 51 > Cu\ 3,3 > Cr\ 2,8 > Ni\ 2,0 > Pb\ 0,6 > Cd\ 0,3 > Co\ 0,2$ [6].

Ранее проведенными исследованиями нами установлены уровни накопления ТМ в листьях древесных и травянистых растений, произрастающих на фоновых территориях. Ранжированный биогеохимический ряд для древесных и кустарниковых форм имеет следующий вид: $Mn\ 333,04 > Zn\ 93,94 > Fe\ 66,16 > Cu\ 4,52 > Ni\ 0,88 > Cd\ 0,21 > Pb\ 0,09$.

Аналогичный ряд, установленный для травянистых дикорастущих растений: $Mn\ 161,87 > Fe\ 102,65 > Zn\ 48,01 > Cu\ 6,60 > Cr\ 1,07 > Ni\ 0,54 > Cd\ 0,20 > Pb\ 0,16$. Соответствующие данные использовались для расчета коэффициента концентрации (Кк), который представляет собой отношение содержания ТМ в листьях растительности зоны загрязнения к соответствующему показателю, полученному на фоновых территориях.

Результаты и их обсуждение

Для выяснения специфики загрязнения территории и разработки научно обоснованных реабилитационных мероприятий чрезвычайно важно иметь точное представление о вещественном составе загрязнителя и, в частности о содержании в нем ТМ. Соответствующая информация приведена в таблице 1.

Таблица 1. – Содержание ТМ в составе свинецсодержащих отходов ООО «Белинвестторг-Сплав»

Образец	Содержание элемента, мг/кг воздушно-сухого вещества								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Co	Cr
№ 1	78900,5	237,2	2007,2	2833,4	324,2	1072,6	149712,9	12,7	59,2
№ 2	57612,4	638,2	1471,2	1805,4	119,6	2225,3	189431,3	21,9	49,1
№ 3	27905,7	174,8	988,1	882,5	59,4	1340,7	163814,1	9,1	46,9

Примечание – № 1 – шлак ротационной печи (октябрь 2019 г.); № 2 – зола свинцовая (февраль 2020 г.); № 3 – зола свинцовая лежащая с пробных площадок «Зеленый Бор» (2018 г.).

Результаты аналитических исследований показывают, что в вещественном составе всех трех образцов отходов абсолютно доминируют соединения железа, содержание которого составляет 15–19 %. Количество свинца изменяется от 2,8 до 7,8 %, что хорошо коррелирует с данными, приведенными С. Л. Ровиным [4]. В структуре исследуемых отходов ООО «Белинвестторг-Сплав» лишь один отличается высоким содержанием свинца – шлак ротационной печи, образующийся при проведении восстановительной плавки аккумуляторной пасты. Этот отход, трансформированный в золу свинцовую, и составил подавляющую по массе и объему часть свинецсодержащих отходов, складировавшихся на промплощадке.

Для определения особенностей пространственного распределения загрязняющих веществ и их влияния на растительность принципиально важным является исследование вещественного состава переносимой пыли. В момент активной фазы механизированной погрузки золы свинцовой насыпью в большегрузный автомобильный транспорт, сопровождавшейся интенсивным пылением в условиях сухой и жаркой погоды, 07.07.2018 г. в радиусе около 50 м от пункта погрузки были отобраны образцы листьев различных древесных пород. Проведенный анализ показал, что в вещественном составе пыли также абсолютно преобладали соединения железа (таблица 2).

Таблица 2. – Содержание ТМ в листьях деревьев, произрастающих в импактной зоне «Зеленый Бор» и в СЗЗ ООО «Белинвестторг-Сплав» (Белоозерск)

Образец	Место отбора	Содержание элемента, мг/кг воздушно-сухого вещества								
		Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Co	Cr
Береза бородавчатая <i>Betula verrucosa</i>	1	704,0*	5,0	26,3	352,7	1,3	341,8	2578,7	0,22	0,9
		7040,0	25,0	5,8	3,8	1,4	1,0	39,6		
	2	11,8	0,5	35,4	182,6	0,9	156,2	68,7	н.п.о.	0,4
		118,0	2,5	7,9	1,9	1,0	0,5	1,1		
Сосна обыкновенная <i>Pinus sylvestris</i>	1	692,6	3,1	23,6	42,3	1,0	70,4	2533,9	0,12	0,6
		6926,0	15,5	5,2	0,5	1,1	0,2	38,9		
	2	17,5	0,2	33,2	25,8	1,4	55,3	48,7	н.п.о.	0,2
		175,0	1,0	7,4	0,3	1,6	0,2	0,8		
Граб обыкновенный <i>Carpinus betulus</i>	1	966,8	6,2	40,4	48,6	2,0	424,0	4298,2	0,25	1,2
		9668,0	31,0	9,0	0,5	2,2	1,3	65,9		
Дуб черешчатый <i>Quercus robur</i>	1	484,0	2,6	22,1	36,2	1,8	372,4	2056,1	0,11	1,2
		4840,0	13,0	4,9	0,4	2,0	1,1	31,5		
Фон для деревьев, мг/кг		0,1	0,2	4,5	93,9	0,9	333,0	65,2	—	—
Среднее для растительности мира, мг/кг (Добровольский В. В., 1998)		1,25	0,04	8,0	30,0					

Примечание – * – в числителе – мг/кг, в знаменателе – Кк., н.п.о. – ниже предела обнаружения, 1 – «Зеленый Бор», 2 – «Белинвестторг-Сплав».

Так, содержание железа в образцах дуба черешчатого, сосны обыкновенной и березы бородавчатой в импактной зоне «Зеленый Бор» составляло от 2056,1 мг/кг до 2578,7 мг/кг, а в образцах листьев граба обыкновенного достигало 4298,2 мг/кг, что в последнем случае обусловлено морфологическими особенностями листа – прежде всего его шероховатостью и ребристостью поверхности. При этом Кк у первых трех видов не превышал значения 40,0, а у граба достигал 65,9. Вместе с тем в образцах листьев сосны и березы из СЗЗ ООО «Белинвестторг-Сплав» содержание железа оказалось сопоставимым с фоновыми значениями – 48,7 и 68,7 мг/кг соответственно (Кк –

0,8 и 1,1). В то же время в данной локации листья отмеченных пород были существенно загрязнены свинцом – 11,8 и 17,5 мг/кг сухого вещества (Кк – 118,0 и 175,0); это явное свидетельство аэрогенного поступления аспирационной пыли ротационной печи и рафинировочных котлов вследствие изъёмов в существующих системах очистки.

В районе площадки хранения отходов также очень высоким оказалось накопление в листьях свинца: от 484,0 мг/кг у дуба, до 966,8 мг/кг – у граба; Кк при этом составил соответственно 4840,0 и 9668,0.

Обращает на себя внимание весьма высокое содержание кадмия – одного из наиболее токсичных металлов – в листьях деревьев в районе площадки хранения отходов. Его накопление в листьях березы достигало 5,0 мг/кг, а в листьях граба – 6,2 мг/кг при Кк соответственно 25,0 и 31,0. Содержание данного элемента в листьях дуба составило 2,6 мг/кг, сосны – 3,1 мг/кг, что соответствует значениям Кк 13,0 и 15,5. В то же время уровень накопления кадмия листьями березы и сосны в районе СЗЗ ООО «Белинвестторг-Сплав» составил соответственно 0,5 мг/кг (Кк 2,5) и 0,2 мг/кг (Кк 1,0).

Анализ данных по содержанию меди в растительных образцах показал, что накопление элемента листьями березы, сосны и дуба в районе площадки хранения отходов было сходным и в среднем составило 24 мг/кг с Кк 5,3. Содержание меди в сухой массе листьев граба того же места отбора составило 40,4 мг/кг (Кк 9,0) и было максимальным среди исследуемых образцов. Следует отметить, что растительные образцы района СЗЗ ООО «Белинвестторг-Сплав» были практически идентичны по анализируемому показателю, который составил в среднем 34,3 мг/кг (Кк 7,6).

Содержание остальных элементов в сухом веществе растительных образцов было сопоставимо со значениями, свойственными для фоновых территорий.

Результаты определения содержания ТМ в тканях различных видов растений, произрастающих в импактной зоне «Зеленый Бор», приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Содержание тяжелых металлов в сухой массе растений северо-восточного сектора импактной зоны «Зеленый Бор», мг/кг

Расстояние от торца площадки, м	Вид	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Co	Cr
10	Сныть обыкновенная	18,12	0,25	7,78	39,33	0,56	308,38	193,95	0	0,99
	Кислица обыкновенная	53,6	0,65	6,55	31,4	0,46	279,06	432,48	0	0,87
	Костяника	40,39	1,05	5,34	46,17	0,64	233,23	328,42	0	0,8
	Земляника лесная	14,43	0,93	5,28	20,32	0,45	187,23	282,58	0	0,77
	Хвощ лесной	10,52	0,34	4,51	14,46	0,19	60,22	165,04	0	0,87
	Среднее значение	27,41	0,64	5,89	30,34	0,46	213,62	280,49	0	0,86
20	Сныть обыкновенная	9,13	0,19	7,06	35,15	0,43	223,91	146,38	0	0,92
	Кислица обыкновенная	68,64	0,8	8,05	37,73	0,5	331,35	501,13	0	0,85
	Орляк обыкновенный	3,79	0,27	4,41	18,5	0,12	69,96	93,49	0	0,43
	Хвощ лесной	4,07	0,27	4,42	16,67	0,13	82,01	89,12	0,00	1,19
	Среднее значение	21,41	0,38	5,99	27,01	0,30	176,81	207,53	0,00	0,85

Окончание таблицы 3

35	Крапива двудомная	7,76	0,1	8,7	30,17	0,2	184,1	137,06	0	1,45
	Хвощ лесной	7,03	0,32	3,94	24,56	0,21	107,99	107,02	0	0,95
	Сныть обыкновенная	9,47	0,3	6,03	44,52	0,34	213,91	129,29	0	0,97
	Орляк обыкновенный	1,16	0,22	4,85	17,61	0,41	112,83	71,70	0,00	0,64
	Среднее значение	6,35	0,23	5,88	29,21	0,29	154,71	111,27	0,00	1,00
50	Малина	3,43	0,29	6,12	35,56	0,41	191,44	91,48	0	0,57
	Сныть обыкновенная	6,1	0,3	5,11	47,24	0,35	275,21	101,58	0	1,15
50	Крапива двудомная	3,29	0,06	5,83	29,79	0	152,06	106,46	0	1,73
	Хвощ лесной	1,73	0,22	3,46	20,43	0,00	104,81	57,08	0,10	1,11
	Среднее значение	3,64	0,22	5,13	33,25	0,19	180,88	89,15	0,02	1,14
≈115	Костяника	10,99	0,36	4,87	46,69	0,37	265,84	181,85	0	0,85
	Кислица обыкновенная	10,31	0,23	5,74	38,89	0,3	378,71	189,36	0,29	0,86
	Малина	5,53	0,47	6,53	47,86	0,46	463,64	120,25	0	0,79
	Крапива двудомная	2,68	0,05	7,27	32,92	0	225,4	101,69	0	1,86
	Черника обыкновенная	2,06	0,29	4,34	18,01	0,28	362,03	63,31	0	0,41
	Среднее значение	6,31	0,25	5,01	32,6	0,27	294,08	113,9	0,07	0,86
≈145	Кислица обыкновенная	6,86	0,14	3,98	27,57	0,29	314,69	128,92	0,24	0,81
	Земляника лесная	1,89	0,33	4,1	22,34	0	270,89	127,26	0	0,89
	Малина	3,4	0,37	5,52	39,22	0,51	304,06	107,94	0	0,78
	Крапива двудомная	1,24	0,02	6,65	30,91	0	192,13	90,47	0	1,79
	Среднее значение	3,35	0,22	5,06	30,01	0,2	270,44	113,65	0,06	1,07
Дикорастущие травянистые растения	Среднее значение	0,16	0,20	6,6	48,01	0,54	161,87	102,65	0	1,07

Установлено, что содержание элементов в растениях в первую очередь определяется расстоянием от площадки складирования отходов. Так, максимальные уровни накопления наиболее токсичных элементов – свинца и кадмия, а также железа – отмечаются в тканях растений, произрастающих в непосредственной близости от промплощадки: усредненное содержание свинца достигает 27,41 мг/кг (в 171,3 раза выше фоновых значений), кадмия – 0,64 (3,2 фоновой величины); по железу фон превышен в 2,7 раза (280,49 мг/кг против 102,62 мг/кг).

Ранжированный ряд элементов в 10-метровой полосе от промплощадки выглядит следующим образом: Fe 280,49 > Mn 213,62 > Zn 30,34 > Pb 27,41 > Cu 5,89 > Cr 0,86 > Cd 0,64 > Ni 0,46.

С удвоением расстояния (до 20 м) содержание кадмия уменьшается примерно вдвое и составляет 0,38 мг/кг (1,9 фоновой величины). Содержание свинца при этом снижается незначительно и составляет в среднем 21,41 мг/кг (133,8 фоновой величины). При этом расположение элементов по убыванию соответствует вышеприведенному ряду зоны максимального загрязнения.

На расстоянии 35 м от торца промплощадки и далее наблюдается 3,4–6,4-кратное снижение содержания свинца (с 21,41 мг/кг до 6,35 и 3,35 мг/кг), однако оно по-прежнему многократно превышает фоновые значения. Несмотря на то, что 4 элемента (марганец, железо, цинк и медь) в ранжированном ряду начинают занимать взаимное расположение, свойственное фоновым территориям, свинец остается на пятом месте (на фоновых территориях элемент замыкает ряд), что свидетельствует о существенном свинцовом загрязнении растений на пробных площадках максимальной удаленности от источника эмиссий (до 145 м).

Сравнение полученных данных по содержанию ТМ в сухой массе травянистых растений северо-восточного сектора зоны загрязнения показало, что кислица обыкновенная и костяника накапливают свинец больше других анализируемых растений. Так, содержание свинца на расстоянии 10 м от площадки хранения отходов составило в кислице 53,6 мг/кг, в костянике – 40,39 мг/кг, что в среднем в 3 раза выше, чем у остальных исследуемых растений, а в сравнении с фоном – в 294 раза. На расстоянии 20 м от края площадки хранения отходов содержание свинца в кислице в 12 раз превышало усредненный показатель для 3-х других изучаемых травянистых растений и в 429 раз – фоновый уровень. При удалении от источника загрязнения на расстояние до 115 м содержание свинца и в кислице, и в костянике оставалось высоким и составляло соответственно 10,31 и 10,99 мг/кг, что практически в 2 раза выше, чем в малине (5,53 мг/кг), в 4–5 раз выше, чем в крапиве двудомной и чернике обыкновенной, и более чем в 60 раз превышало фоновое значение. На максимальном удалении от источника загрязнения (около 145 м) все еще отмечался достаточно высокий уровень содержания свинца в кислице, в среднем в 3 раза превышавший концентрации элемента у остальных растений, и в 43 раза – фоновый показатель.

Отмечено, что уровни накопления кадмия и железа были сходными у всех анализируемых растений одной локации и в целом находились в прямой зависимости от удаленности от источника загрязнения. Уровни содержания остальных исследуемых элементов в фитомассе на большинстве пробных площадок принципиально не отличались от показателей, свойственных фоновым территориям.

По мнению П. В. Елпатьевского [7], величины соотношений Fe/Mn и Pb/Mn могут свидетельствовать о состоянии растительности. При этом соотношение Fe/Mn представляет собой информативный показатель процессов фотосинтеза, а соотношение Pb/Mn характеризует пропорцию техногенных и биофильных элементов.

В растительной массе с фоновых территорий соотношение Fe/Mn в среднем составляет 0,63, а Pb/Mn – 0,001. В техногенной среде, сформировавшейся в исследуемом ареале загрязнения, соотношение Fe/Mn существенно возрастает и в зависимости от удаленности от промплощадки имеет разброс от 1,31 (10 м) до 0,42 (максимальное удаление). Наибольший показатель характерен для кислицы – 1,55 при сильном загрязнении и до 0,41–0,50 на удалении более 100 м. Значение соотношения Pb/Mn в растительности превышает фоновое от 10 до 120 раз. Существенное изменение показателей Fe/Mn и Pb/Mn в растительности зоны загрязнения свидетельствует о нарушении сбалансированности в микроэлементном обеспечении процессов метаболизма в растениях.

Заклучение

Таким образом, уровни накопления ТМ в тканях растений определяются удаленностью от источника эмиссий, содержанием элементов в соответствующих почвах и фактором видоспецифичности.

Так, усредненное содержание свинца в сухой массе растений на удалении 10 м достигает 27,41 мг/кг, снижаясь более чем в 4 раза (до 6,35 мг/кг) в 35-метровой полосе. Среди исследованных растений максимальное концентрирование свинца отмечено в фитомассе кислицы обыкновенной – от 68,64 мг/кг до 6,86 мг/кг и костяники – от 40,39 мг/кг до 10,99 мг/кг по градиенту загрязненности.

Ранжированный ряд накопления элементов в зоне наиболее сильного загрязнения имеет следующий вид (мг/кг): Fe 280,49 > Mn 213,62 > Zn 30,34 > Pb 27,41 > Cu 5,89 > Cr 0,86 > Cd 0,64 > Ni 0,46; т. е. техногенные потоки наиболее токсичных элементов в локации существенно превышают их естественные уровни. Кардинальное изменение соотношений Fe/Mn и Pb/Mn в растительности зоны загрязнения свидетельствует о серьезном нарушении сбалансированности микроэлементного обеспечения процессов метаболизма в растениях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Накопление и распределение тяжелых металлов в растениях зоны техногенеза / Т. М. Минкина [и др.] // *Агрохимия*. – 2013. – № 9. – С. 65–75.
2. Ильин, В. Б. К оценке потока тяжелых металлов в системе «почва – сельскохозяйственная культура» / В. Б. Ильин // *Агрохимия*. – 2006. – № 3. – С. 52–59.
3. Металлургическая переработка вторичного свинцового сырья / А. В. Тарасов [и др.]. – М. : Гинцветмет, 2003. – 224 с.
4. Ровин, С. Л. Исследование отходов, образующихся при производстве свинца / С. Л. Ровин, С. В. Григорьев // *Литье и металлургия*. – 2018. – № 2 (91). – С. 43–49.
5. Ильин, В. Б. Тяжелые металлы в системе «почва – растение» / В. Б. Ильин. – Новосибирск : Наука, 1991. – 151 с.
6. Натаров, В. М. Комплексный геохимический фоновый мониторинг в Березинском биосферном заповеднике / В. М. Натаров, О. В. Лукашев, В. В. Савченко. – Минск : Белорус. дом печати, 2013. – 214 с.
7. Елпатьевский, П. В. Геохимия ландшафта и техногенез / П. В. Елпатьевский, В. С. Аршанова. – М. : Наука, 1990. – 196 с.

REFERENCES

1. Nakoplieniye i raspriedieleniye tiazhelykh mietallov v rastienijakh zony tiekhno-gieneza / T. M. Minkina [i dr.] // *Agrokhimija*. – 2013. – № 9. – S. 65–75.
2. Il'in, V. B. K ocenke potoka tiazhelykh mietallov v sistiemie «pochva – siel'sko-khoziajstviennaja kul'tura» / V. B. Il'in // *Agrokhimija*. – 2006. – № 3. S. 52–59.
3. Mietallurgichieskaja pierierabotka vtorichnogo svincovogo syr'ja / A. V. Tarasov [i dr.]. – M. : Gincvetmet, 2003. – 224 s.
4. Rovin, S. L. Issliedovaniye otkhodov, obrazujushchikhsia pri proizvodstvie svinca / S. L. Rovin, S. V. Grigor'jev // *Lit'jo i mietallurgija*. – 2018. – № 2 (91). – S. 43–49.
5. Il'in, V. B. Tiazhelyje mietally v sistiemie «pochva – rastienije» / V. B. Il'in. M : Nauka, 1991. – 151 s.

6. Natarov, V. M. Kompleksnyj geochimicheskij fonovyj monitoring v Bieriezinskom biosfiernom zapovednikie / V. M. Natarov, O. V. Lukashev, V. V. Savchenko. – Minsk : Bieloruss. Dom Piechati, 2013. – 214 s.

7. Yelpatievskij P. V. Geochimija landshafta i tiekhnogieniez / P. V. Yelpatievskij, V. S. Arshanov. – M. : Nauka, 1990. – 196 s.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 18.02.2021