

Сравнительное изучение содержания микроэлементов в системе почва – растения луговых биоценозов

© 2021. Е. В. Дабах¹, к. б. н., доцент, с. н. с.,

А. П. Кислицына², к. с.-х. н., доцент, с. н. с.,

Е. А. Домнина^{1,3}, к. б. н., доцент, с. н. с.,

¹Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,

610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,

³Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

e-mail: dabakh@mail.ru

Исследовали микроэлементный состав почв и растений двух видов *Dactylis glomerata* L. и *Cirsium arvense* (L.) Scop., доминирующих в луговых фитоценозах на склоне водораздела и в пойме в окрестностях промышленного центра. Дерново-подзолистые почвы водораздела супесчаные, слабокислые. Аллювиальные почвы в пойме р. Вятки среднесуглинистые, сильнокислые, богаче органическим веществом, содержание микроэлементов в них в 3–4 раза выше. Уровень загрязнения почв допустимый. Выявлено, что независимо от места обитания такие элементы, как Cu, Zn, B, Fe, Pb, Cr содержатся в *D. glomerata* и *C. arvense* в соизмеримых количествах. Молибден накапливается в обоих видах на водоразделе, Hg и Mn – в растениях пойменного луга, причём Mn – в токсичных концентрациях. На водоразделе *C. arvense* аккумулирует микроэлементы в последовательности Mo > Cd > Sr > Hg > Cu, *D. glomerata* – Mo > Hg. На пойменных лугах *C. arvense* накапливает Cd, *D. glomerata* – Hg, что представляет интерес для фиторемедиации почв.

Ключевые слова: микроэлементы, почвы, луговые виды, техногенная нагрузка.

Comparative study of the content of trace elements in the system soil – plants of meadow biocenoses

© 2021. E. V. Dabakh¹ ORCID: 0000-0002-6088-4819³

A. P. Kislitsina² ORCID: 0000-0001-7474-7359³

E. A. Domnina^{1,3} ORCID: 0000-0002-5063-8606³

¹Institute of Biology of Komi Scientific Centre

of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²Federal Agricultural Research Center of North-East named N. V. Rudnitsky,

166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

³Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

e-mail: dabakh@mail.ru

We studied the microelement composition of soils and plants of two species dominating in the meadow phytocenoses on the slope of the watershed and on the floodplain in the vicinity of the industrial center. Soddy-podzolic soils of the watershed are sandy loamy, slightly acidic. Alluvial soils are medium loamy, strongly acidic, richer in organic matter, the content of trace elements in them is 3–4 times higher. The level of soil contamination is acceptable. It was revealed that, regardless of the habitat, in *Dactylis glomerata* L. and *Cirsium arvense* (L.) Scop. Cu, Zn, B, Fe, Pb and Cr are present in comparable amounts. Mo accumulates in both species at the watershed, Hg and Mn – in plants of the floodplain meadow, moreover Mn – in toxic concentrations. At the watershed *C. arvense* accumulates trace elements in the sequence Mo > Cd > Sr > Hg > Cu, *D. glomerata* – Mo > Hg. In the floodplain meadows *C. arvense* accumulates Cd, *D. glomerata* – Hg, which is of interest for soil phytoremediation.

Keywords: microelements, soils, meadow species, technogenic load.

Некоторые виды растений способны избирательно и интенсивно поглощать из почвы определённые элементы, включая микроэлементы, которые составляют значительную часть их золы. Имеются сведения о том, что для луговых видов из различных по географическому расположению местообитаний установлены одинаковые значения коэффициентов накопления тяжёлых металлов (ТМ), что подтверждает видовую специфику накопительных возможностей растений [1].

Литературные данные [2–4] указывают на широкий диапазон варьирования концентраций микроэлементов в растениях даже в отсутствии источника загрязнения. Кроме того, отмечается, что чем больше микроэлементов с широким интервалом концентраций сочетается в одном растении, тем больше экологическая амплитуда произрастания данного растения и, как следствие, выше его адаптационные способности в условиях техногенного загрязнения [5].

В связи с этим цель настоящей работы – оценка поглощения микроэлементов растениями двух видов в зависимости от экотопа и установление количественных взаимосвязей между концентрациями микроэлементов в почвах и растениях.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования были растения и почвы, образцы которых отбирали в окрестностях г. Кирово-Чепецка Кировской области на сенокосном лугу на склоне водораздела и на заброшенном лугу в пойме р. Вятки. Техногенное воздействие на данную территорию происходит за счёт аэрогенных выбросов предприятий и влияния на пойменные почвы загрязнённых подземных вод [6].

Участок на водоразделе расположен на прямом пологом склоне средней длины юго-юго-восточной экспозиции. Почвы – дерново-подзолистые супесчаные на водноледниковых супесях, подстилаемых на глубине менее 60 см карбонатным элювием глин. Участок представляет собой разнотравно-злаковый луг, в травостое преобладают злаки. Их проективное покрытие (ПП) составляет 60%, покрытие разнотравья – 25%.

Второй участок расположен на повышенной части центральной гривисто-равнинной поймы. Вероятность затопления во время паводка составляет 5%, в течение длительного времени отмечается близкое залегание к поверхности грунтовых вод. В пойме распространены аллювиальные дерновые зерни-

стые среднесуглинистые почвы на аллювии. Участок представляет собой крупнозлаковый луг. Из хозяйственных групп на участке преобладают злаки с ПП 79%, ПП разнотравья составляет 11%. На обоих участках преобладают ксерофиты: среди злаков доминирует ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), среди сорного разнотравья – бодяк полевой (*Cirsium arvense* (L.) Scop.).

Смешанные образцы почв составляли из индивидуальных проб, отобранных методом конверта.

Растения были собраны на пробных площадках размером 0,5 м × 0,5 м в конце вегетационного сезона (начало сентября) методом квадрата: отбирали пять образцов, состоящих из вегетативной части вторично-отрастающих побегов ежи сборной и генеративных особей бодяка полевого.

В растительных пробах определяли массовую долю сухого вещества, общего азота и нитратов, в почвах – рН в водной и солевой вытяжках, обменный аммоний, нитратный азот, органическое вещество, подвижные соединения фосфора и калия. Элементный состав растений и почв определяли методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (PQ-2, Elemental, Англия) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICAP-61, Thermo Jarrell Ash, США). Все химические анализы выполняли по аттестованным методикам в аккредитованных лабораториях.

Результаты и обсуждение

Состав и свойства исследуемых почв представлены в таблицах 1–3. Различия в валовом химическом составе почв на двух участках обусловлены их разным генезисом и гранулометрическим составом, что, прежде всего, отражается на содержании таких элементов, как Al и Fe, накапливающихся в составе глинистой фракции (табл. 1, 2). Поёмный водный режим с контрастным увлажнением способствует аккумуляции Fe и Mn в составе новообразований.

Валовой химический состав почв на водоразделе весьма характерен для почв подзолистого типа лёгкого (супесчаного) гранулометрического состава [7]. Можно лишь отметить обеднённость почв калием и магнием. Валовой состав пойменной почвы также весьма типичен для аллювиальных почв суглинистого гранулометрического состава поймы р. Вятки [8] и в целом рек Русской равнины [9].

Таблица 1 / Table 1

Валовой химический состав почв на обследуемых участках
Total chemical composition of soils in the surveyed areas

Участки Sites	Содержание, % / Content, %									
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	S _{общ.} / S _{total}
В пойме On floodplain	11,7	6,6	1,1	2,0	0,91	1,3	0,26	0,62	0,21	0,062
На водоразделе On watershed	4,2	1,6	0,87	0,43	0,70	0,72	0,069	0,24	0,11	0,029

Почвы пойм, несомненно, богаче микроэлементами – содержание Cu, Zn, Co, Mn, Mo, Cr в 3–4 раза выше, чем в дерново-подзолистой почве. Отмечены превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) S и As. Сера – элемент, связанный с органическим веществом. Приведённая в ГН 2.1.7.2041-06 ПДК S в почвах (160 мг/кг) противоречит литературным данным. Согласно [7], интервал концентраций S в незагрязнённых минеральных почвах – от 0,02 до 0,2% (от 200 до 2000 мг/кг), и превышение ПДК не является доказательством техногенного загрязнения почв соединениями серы.

Повышенное относительно ПДК и ОДК содержание As в пойменных почвах также, вероятно, не связано с загрязнением, поскольку такие значения встречаются в незагрязнённых почвах, а проблемы нормирования As в почвах обсуждаются в литературе [10, 11].

Превышены показатели регионального фона в целом для Кировской области по содержанию V, но они значительно ниже ПДК и фоновых содержаний элемента в почвах сельхозугодий.

Содержание Co в дерново-подзолистых почвах ниже фоновых значений для почв Кировской области, в аллювиальных – значительно выше.

Показатели по Sr соответствуют фоновым значениям в почвах водораздела, но значительно выше фоновых в аллювиальных почвах. При наличии источника поступления Sr в окружающую среду (хвостохранилище мела), можно рассматривать его повышенное содержание как результат техногенного воздействия.

Агрохимические свойства почв и содержание в них главных элементов питания представлено в таблице 3. По степени кислотности почвы на водоразделе относятся к категории «близкие к нейтральным», в пойме почвы «очень кислые». Высокие значения pH в дерново-подзолистой почве обусловлены близким к поверхности залеганием карбонатных глин, которые, местами выходят на поверхность, формируют почвенные комбинации.

Содержание органического вещества в почве на водоразделе соответствует типичным для дерново-подзолистых почв значениям, аллювиальные почвы богаты органическим веществом. Содержание минеральных форм N от очень низкого в почвах на водоразделе до низкого – в пойме. При хорошей (от средней до повышенной) обеспеченности обеих почв обменным K, аллювиальные почвы очень бедны, а дерново-подзолистые богаты подвижным P. Слабая доступность P для растений в аллювиальных почвах может быть обусловлена их высокой кислотностью и ожелезненностью.

Таким образом, несмотря на расположение исследуемых участков в зоне влияния химических предприятий г. Кирово-Чепецка, макроэлементный состав и агрохимические свойства почв соответствуют генетически обоснованным характеристикам соответствующих типов почв. Содержание всех рассмотренных микроэлементов в дерново-подзолистых почвах не превышает нормативных значений. В пойменных почвах концентрации Ni, As, Co, Mn, Sr в 1,3–2,2 раза выше нормативных значений, однако суммарный коэффициент техногенного загрязнения (Z_c) составляет 9 единиц, что, согласно СанПиН 2.1.7.1287-03, позволяет оценить уровень загрязнения как допустимый, не предполагающий каких-либо ограничений на использование почв в сельскохозяйственном производстве.

Содержание элементов в растениях и коэффициенты биологического поглощения (КБП) представлены в таблице 4.

Согласно полученным данным, концентрации Cu, Zn, B, Fe в растениях *C. arvense* и *D. glomerata* существенно различаются в пределах одного экотопа. Однако, несмотря на то, что в почвах пойменного луга валовые количества этих элементов больше почти в 4 раза, одинаковые виды растений, произрастающие в разных условиях, характеризуются соизмеримыми их содержаниями. В целом концентрации этих элементов в золе растений соответствовали диапазону нормального их содержания в луговых травах. *D. glomerata*

Таблица 2 / Table 2

Содержание нормируемых в почвах элементов в гумусовом горизонте почв
Content of elements standardized in the humus horizon of soils

Участки отбора проб Sites of sampling	pH _{ксл}	Содержание элементов в почвах, мг/кг / Content of elements, mg/kg															
		Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	As	Hg	Co	Mn	V	Sb	S	Cr	Mo	Sr	Sn
В пойме On floodplain	4,0	43,0	98,9	16,6	0,43	84,2	10,0	0,064	19,9	2012,4	147	0,93	620	100	0,75	272	0,70
На водоразделе On watershed	5,9	10,9	33,7	11,4	0,11	14,2	1,8	0,019	4,4	534,06	41,6	0,51	290	35,2	0,25	112	0,44
ПДК (ГН 2.1.7.2041-06) МРС (Maximum permissible concentration)		-	-	32	-	-	2	2,1	-	1500	150	4,5	160	-	-	-	-
ОДК (ГН 2.1.7.2511-09)** АРС (Approximate permissible concentration)		33-66-132	55-110-220	32-65-130	0,5-1,0-2,0	20-40-80	2-5-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Региональный фон (Эколого-геохимическая карта почв Кировской области. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ. 1996) Regional background		28/37*	58/71	12/14	-	33/47	-	-	5,4/9	825/1043	15/70	-	-	84/111	1,4/1,6	118/141	2,5/2,9

Примечание: * - 28/37 - фоновое содержание в почвах области в целом/в почвах сельскохозяйственных угодий; ** - на основании pH и гранулометрического состава для оценки пойменных почв следует ориентироваться на среднее значение ОДК, для почв водораздела - на минимальное значение ОДК; прочерк обозначает, что норматив не установлен.

Note: * - 28/37 - background content in the soils of the region as a whole / in the soils of agricultural land; ** - on the basis of pH and particle size distribution for the assessment of floodplain soils, one should focus on the average APC, for watershed soils - on the minimum APC; a dash indicates that the standard has not been established.

Таблица 3 / Table 3

Агрохимические свойства почв / Agrochemical properties of soils

Участки Sites	рН _{H₂O}	рН _{KCl}	С, %	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₃ ⁻ + N-NH ₄ ⁺	K ₂ O _{подв.} K ₂ O _{моб.}	P ₂ O _{5подв.} P ₂ O _{5моб.}
В пойме On floodplain	5,0	4,0	7,58	7,9	4,5	12,4	130	32
На водоразделе On watershed	6,6	5,9	2,84	6,7	< 2,8	< 9,5	123	253

отличалась более низкими концентрациями по сравнению с *C. arvense* как на водоразделе, так и в пойме. Подобные закономерности характерны для барьерного типа поглощения элементов. В частности, функцию физиологического барьера для Си выполняют корневая система и листья растений [12].

Содержание Со в *D. glomerata*, независимо от почвенных условий, невысокое и соответствует его содержанию в злаковых травах. В *C. arvense* оно гораздо выше, особенно на склоне водораздела, где превышает средние содержания для большинства растений. Коэффициенты биологического поглощения Со на порядок различаются у разных видов растений на водоразделе при низкой концентрации элемента в почвах, в меньшей степени – на пойме, при более высоком валовом содержании Со в почвах. Подобная тенденция проявляется и для Fe. В образцах растений из рассматриваемых экотопов концентрация Fe соответствует оптимальному его содержанию в злаковых травах (табл. 4). В *C. arvense* содержание Fe гораздо выше, но также не превышает допустимых концентраций.

Таким образом, Си, Zn, Fe, Со, как на водоразделе, так и в пойме в большей степени накапливаются в растениях *C. arvense*, причём в дерново-подзолистых почвах водораздела с неглубоким подстиланием карбонатной породы и, соответственно, при близкой к нейтральной реакции среды отмечается накопление Zn и Си в бодяке даже относительно их содержания в почве (КБП > 1).

Количество Мо в растениях может колебаться в пределах 0,1–300 мг/кг сухой массы, чаще всего повышенное содержание бывает при несбалансированном питании. Бор и молибден относятся к микроэлементам с безбарьерным типом поглощения и в зависимости от содержания в почвах могут накапливаться в растениях в очень высоких концентрациях [12]. При низком валовом содержании Мо в изученных почвах содержание его в растениях высокое, особенно на склоне водораздела.

Различия в концентрации микроэлемента с растениями поймы составляют 4,1–4,3 раза. При этом межвидовые отличия в одном биотопе незначительны. Небольшие различия в поглощении Мо растениями разных видов при низкой концентрации его в почвах (менее 0,003%) отмечены в [13]. Наиболее высокие КБП Мо выявлены у обоих видов растений, произрастающих на почвах водораздела. Возможно, это обусловлено отсутствием физиологического барьера в отношении Мо, его возрастающей подвижностью в почве при более высоких значениях рН, а также связанным с рН антагонизмом Мо и Mn [2], содержание которого в пойменной почве значительно выше.

При сравнительно невысоком содержании Mn в растениях на водоразделе его концентрации существенно различаются в зависимости от вида, напротив, при высоких концентрациях Mn в пойме различия между видами – незначительные. В большей мере различия в содержании микроэлементов между *C. arvense* и *D. glomerata* при невысоком уровне элементов в почве обусловлены фазой онтогенеза и физиологической потребностью растения. Например, более высокое содержание Mn в *D. glomerata* на склоне водораздела объясняется повышенной потребностью злаковых трав в этом элементе. Содержание Mn, превышающее верхний предел средних значений в два раза (444 и 411 мг/кг), отмечено в растениях пойменного луга, что обусловлено высоким содержанием элемента в кислой почве. Выявлено, что при высоких концентрациях Mn в почве различия в содержании его между видами нивелируются и КБП близкие. Подобные значения КБП Mn получены для биоценозов Алтая, в которых на интразональных почвах КБП элемента составлял 0,21, а на зональных почвах он варьировал от 0,04 до 0,16 [14]. Полученные результаты согласуются с представлением об активном и пассивном механизме поглощения ТМ в зависимости от концентрации их в почве. При содержании металла в микроколичествах (в пределах фонового

Таблица 4 / Table 4

Содержание микроэлементов в растениях и коэффициенты биологического поглощения (КБП)
The content of trace elements in plants and the biological absorption coefficients (BAC)

Элемент Elements	Склон водораздела / On watershed		Пойменный луг / On floodplain		Среднее содержание в травах, мг/кг [2, 4] Average content in herbs, mg/kg [2, 4]	Избыточная или токсичная концентрация, мг/кг [2] Excessive or toxic concentration, mg/kg [2]		
	<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.		<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.					
	КБП BAC	мг/кг mg/kg	КБП BAC	мг/кг mg/kg				
Cu	13,2	1,21	8,2	0,19	6,4	0,15	4,8–25 (1–33)	20–100
	69,8	2,07	50,2	0,51	26,3	0,27		
Zn	43,5	н. о. n. d.	4,3	н. о. n. d.	4,6	н. о. n. d.	1,0–10 для злаков 1,0–10 for cereals, 12–40 для разнотравья 12–40 for herbs	50–200
	2,7	10,8	3,1	12,4	0,77	1,03		
Mo	19,3	0,04	68,9	0,13	411,0	0,20	50–200	300–500
Mn	121,0	0,01	59,6	0,005	88,4	0,002	50–150	–
Fe	0,40	0,1	0,05	0,011	0,075	0,004	0,03–0,28 (0,02–1)	15–50
Co	< ПО < DL	н. о. n. d.	0,64	0,004	1,4	0,02	0,4–3	10–100
Ni	0,6	0,02	< ПО < DL	н. о. n. d.	< ПО < DL	н. о. n. d.	0,2–2	5–30
Cr	328,0	2,93	33,1	0,29	161,4	0,59	10–1500	–
Sr	0,4	3,64	0,02	0,18	0,06	0,14	0,005–0,35	5–30
Cd	0,35	0,03	0,28	0,025	0,25	0,015	0,1–5	30–300
Pb	0,027	1,42	0,033	1,74	0,097	1,52	0,005–0,05	1–3
Hg								

Примечание: н. о. – не определялось, < ПО – значение ниже предела обнаружения метода.
Note: n. d. – not determined, < DL – value below the detection limit of the method.

уровня) основной вклад в поступление элемента в растение вносит активное метаболическое поглощение, при высоких концентрациях металла поглощение преимущественно неметаболическое, механизм процесса – диффузия в свободное пространство корня [15].

Накопление Ni в растениях также зависит от содержания его в почве и от видовых особенностей растений. При высокой концентрации элемента в почве пойменного луга (в 2 раза выше ОДК и фоновых значений) в растениях *C. arvense* накапливается до 5,1 мг/кг Ni. При низком содержании элемента в почве водораздела концентрация его в *C. arvense* меньше предела обнаружения метода. Коэффициент биологического поглощения для злаковых трав очень низкий, что противоречит некоторым литературным данным [16], согласно которым многолетние злаки относят к растениям, интенсивно аккумулирующим ТМ – КБП никеля составляет 0,24–0,42. При более высокой концентрации Ni в почве поймы в злаковой растительности с пойменного луга содержание его также выше по сравнению с водоразделом.

Данные по содержанию Sr в растительности рассматриваемых территорий неоднозначны. Содержание Sr в злаковых травах меньше предела обнаружения, а растения *C. arvense* способны его концентрировать до средних значений (0,5 мг/кг сухой массы). Отмечено одинаковое содержание Sr в растениях одного вида – *C. arvense*, независимо от трёхкратного различия концентраций его в почве разных экотопов.

К числу элементов – загрязнителей относятся Cd, Pb, Hg. Они не только снижают поглощение растениями необходимых элементов, заменяя их, но и резко ухудшают пищевые и кормовые качества растительной продукции [4].

Средние значения содержания Cd для луговых растений незагрязнённых местобитаний в Кировской области составляют 0,22 мг/кг [4]. Концентрация Cd в растениях на участках пойменного луга и водораздела находится в пределах или незначительно выше допустимых параметров (табл. 4). Однако содержание Cd в злаковых растениях как на кислой почве пойменного луга, так и на водоразделе на порядок ниже. В обоих экотопах *C. arvense* накапливает Cd, причём на водоразделе при низких концентрациях элемента в почвах КБП в 3 раза выше.

Содержание Pb в растениях *C. arvense* (0,35 и 0,39 мг/кг) и *D. glomerata* (0,28 и 0,25 мг/кг), произраставших в разных

условиях, почти одинаковы для каждого вида и соизмеримы с их содержанием в почвах.

Превышений нормируемых показателей по содержанию Sr в луговых травах не выявлено. Максимальное содержание его отмечено в *C. arvense* на водоразделе. Независимо от условий произрастания *C. arvense* поглощает и накапливает большее количество стронция, чем *D. glomerata*.

При невысокой концентрации Hg в почвах, содержание её в растениях поймы близко к верхнему пределу нормальных концентраций элемента, а КБП превышают 1. Проявляется тенденция к преимущественному накоплению Hg растениями *D. glomerata* по сравнению с *C. arvense*.

Заключение

Свойства изученных почв и их макроэлементный состав характерны для дерново-подзолистых почв на двучленных отложениях с подстиланием карбонатной породы и для аллювиальных дерновых почв Кировской области. Содержание микроэлементов в аллювиальных почвах пойменного луга в 3–4 раза выше, чем в почвах водораздела, что обусловлено разным гранулометрическим составом и агрохимическими свойствами почв. Технологичный фактор проявляется в накоплении в аллювиальных почвах ряда элементов: Ni, Co, Mn, As, Sr в превышающих допустимые значения концентрациях. Однако превышения незначительны и не накладывают ограничений на сельскохозяйственное использование почв.

В растениях выявлены высокие концентрации таких элементов как Zn, B, Mo, Fe, Co, Cd, Hg, содержания которых близки к верхней границе диапазона нормальных концентраций элементов. Концентрация Mn в растениях на пойменном лугу избыточна.

В распределении микроэлементов в системе почва – растение можно отметить следующие тенденции.

1. Независимо от места обитания в растениях каждого из двух изученных видов Cu, Zn, B, Fe, Pb и Sr содержатся в соизмеримых количествах.

2. В накоплении Mo и Hg проявляется обратная тенденция: межвидовые различия не так существенны, как различия условий обитания: Mo накапливается в обоих растениях на водоразделе, Hg – в пойме.

3. Отмечается преимущественное накопление Mn злаками (*D. glomerata*) при низких

концентрациях элемента в почвах, при высоком его содержании в почвах поймы (выше ПДК) Mn накапливается в *D. glomerata* и в *C. arvense* в соизмеримых и токсичных концентрациях.

4. Коэффициент биологического поглощения свидетельствует о преимущественном накоплении микроэлементов в *C. arvense*, особенно на водоразделе, в последовательности $Mo > Cd > Sr > Hg > Cu$, что представляет интерес для фиторемедиации. В *D. glomerata* на дерново-подзолистой почве водораздела накапливаются $Mo > Hg$. В пойме на более богатой по составу, но кислой почве в *C. arvense* отмечается незначительное накопление Cd, в *D. glomerata* – Hg.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.

References

1. Bulokhov A.D., Anishchenko L.N., Panasenko N.N., Semenishchenkov Yu.A., Skovorodnikova N.A. Heavy metals of components of meadow cenoses under conditions of technogenic load // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. No. 3. P. 6–12 (in Russian).
2. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Moskva: Mir, 1989. 439 p. (in Russian).
3. Shikhova L.N., Egoshina T.L. Heavy metals in soils and plants of the North-East of the European part of Russia. Kirov: Zonalnyy NIISKh Severo-Vostoka, 2004. 264 p. (in Russian).
4. Tserling V.V. Diagnostics of the mineral nutrition of agricultural crops: a Handbook. Moskva: Agropromizdat, 1990. 235 p. (in Russian).
5. Poznyak S.S. The content of some heavy metals in the vegetation of field and meadow agrophytocenoses under conditions of soil pollution // *Tomsk State University Journal of Biology*. 2011. No. 1 (13). P. 123–136 (in Russian).
6. Ashikhmina T.Ya., Dabakh E.V., Kantor G.Ya., Lemeshko A.P., Skugoreva S.G., Adamovich T.A. Research of the state of the natural complex within the zone of influence of Kirovo-Chepetsk chemical plant // *Theoretical and Applied Ecology*. 2010. No. 3. P. 18–26 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-018-026
7. Orlov D.S. Soil chemistry. Moskva: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1985. 376 p. (in Russian).
8. Gushchina A.M. Soils of the floodplain of the Vyatka River in its middle reaches // *Trudy Kirovskogo selskokhozyaystvennogo instituta. Agronomiya*. 1968. V. 22. No. 44. P. 126–136 (in Russian).
9. Dobrovolskiy G.V. Soils of river floodplains in the center of the Russian Plain. Moskva: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 2005. 293 p. (in Russian).
10. Syso A.I. Russian hygienic standards for environmental assessment of soils, their scientific validity and problems of use // *Biogeochemistry of technogenesis and modern problems of geochemical ecology: Trudy IX Mezhdunarodnoy biogeokhimicheskoy shkoly*. Barnaul, 2015. V. 1. P. 39–42 (in Russian).
11. Dabakh E.V. Rationing of arsenic content in the soils of the Kirov region // *Ecology of the native land: problems and solutions: Materialy XV Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kniga 1*. Kirov: VyatGU, 2020. P. 253–256 (in Russian).
12. Azarenko Yu.A., Ermokhin Yu.I. Evaluation of the potential for absorption of trace elements by plants depending on their concentration in the soil // *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2012. No. 2 (114). P. 151–154 (in Russian).
13. Kovalevskiy A.V. On the biogeochemistry of molybdenum in plants // *Trace elements in plants: Trudy Buryatskogo instituta estestvennykh nauk BF SO AN SSSR. Ser. biogeokhimicheskaya*. V. 5. Ulan-Ude, 1969. P. 46–84 (in Russian).
14. Kuznetsova O.V., Elchinina O.A. Manganese in the soil-plant system in the Teletskoye Lake basin // *Biogeochemistry and biochemistry of trace elements in the conditions of technogenesis of the biosphere: Materialy VIII mezhdunarodnoy Biogeokhimicheskoy shkoly / Ed. V.V. Ermakov*. Moskva: GEOKhI RAN, 2013. P. 364–368 (in Russian).
15. Titov A.F., Talanova V.V., Kaznina N.M., Laydinen G.F. Plant resistance to heavy metals. Petrozavodsk: Institut biologii KarNTs RAN, 2007. P. 12–18 (in Russian).
16. Evdokimova G.A. Accumulation of nitrates in plants on soils with a high content of heavy metals // *Pochvovedenie*. 1993. No. 8. P. 104–108 (in Russian).