

ГЕАХІМІЯ
GEOCHEMISTRY

УДК 631.445.15(476.7)

Поступила в редакцию 27.07.2016

Received 27.07.2016

Н. В. Михальчук

Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси, Брест, Беларусь

**ПОДВИЖНЫЕ ФОРМЫ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ
В ПОЧВАХ КАРБОНАТНОГО РЯДА ЮГО-ЗАПАДА БЕЛАРУСИ**

Аннотация: Комплекс геохимических барьеров в почвах карбонатного ряда существенно влияет на накопление и распределение по профилю большинства изученных тяжелых металлов (ТМ) и микроэлементов. В пределах совмещенного щелочного, карбонатного барьера горизонта BS_{Ca} резко ограничивается подвижность таких опасных ТМ, как Pb, Zn, Cd, Ni. В то же время сохраняется миграционная активность и опасность накопления в растениях Cr и отчасти Mn.

Ключевые слова: тяжелые металлы, микроэлементы, подвижные формы, карбонатные почвы, геохимические барьеры, радиальная контрастность

Для цитирования: Михальчук, Н. В. Подвижные формы тяжелых металлов и микроэлементов в почвах карбонатного ряда юго-запада Беларуси / Н. В. Михальчук // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2017. – № 3. – С. 90–97.

N. V. Mikhalchuk

The Polesie Agrarian Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Brest, Belarus

**MOBILE FORMS OF HEAVY METALS AND TRACE ELEMENTS IN CARBONATE RANGE SOILS
OF THE SOUTHWEST PART OF BELARUS**

Abstract: The complex of geochemical barriers in soils of a carbonate range significantly affects accumulation and profile distribution of the majority of the studied heavy metals and minerals. Within combined alkaline-carbonate barrier of the BS_{Ca} horizon, the migratory mobility of such dangerous heavy metals as Pb, Zn, Cd, Ni is sharply limited. At the same time, migratory activity and danger of accumulation in plants of Cr and partly Mn remains.

Keywords: heavy metals, minerals, mobile forms, carbonate soils, geochemical barriers, radial contrast

For citation: Mikhalchuk N. V. Mobile forms of heavy metals and trace elements in carbonate range soils of the southwest part of Belarus. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk.* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, chemical series], 2017, no. 3, pp. 90–97 (In Russian).

Введение. В настоящее время тяжелые металлы (ТМ) общепризнанно рассматриваются в качестве приоритетных загрязнителей почв [1, 2]. При этом наиболее активными агентами загрязнения являются их подвижные формы, способные переходить из твердых фаз в почвенные растворы и поглощаться растениями. В этой связи увеличивается интерес к почвенным компонентам и субстратам, которые прочно закрепляют подобные поллютанты, затрудняя их поступление в растения, препятствуя попаданию в грунтовые воды [3]. В почвах широко распространены такие активные компоненты-носители ТМ, как глины, органическое и карбонатное вещества, оксиды и (гидр)оксиды железа и марганца, сульфиды [4]. Указывается [5], что эффективность носителей в большой степени зависит от кислотно-основных и редокс-условий в почвах: прочность закрепления многих катионогенных ТМ возрастает в нейтральной и слабощелочной среде по сравнению с кислой. Учет перечисленных особенностей крайне важен при разработке приемов снижения миграционной активности ТМ в загрязненных почвах. Среди этих приемов к числу

приоритетных ряд исследователей относит применение карбонатосодержащих мелиорантов [6, 7]. Поэтому важно выяснить особенности накопления и перераспределения ТМ в природных (фоновых) почвах, имеющих в своем составе карбонатные образования в виде четко оформленных генетических горизонтов или проявляющих характерную приуроченность к определенным частям профиля. К числу таких почв в условиях Белорусского Полесья относятся прежде всего почвы карбонатного ряда. Исследование накопления и перераспределения ТМ в подобных почвах актуально еще и потому, что они в известной степени могут выступать в качестве естественного природного аналога почвенно-геохимических ситуаций, складывающихся при использовании карбонатосодержащих мелиорантов как почвоулучшающих субстратов на почвах иных категорий.

Объекты и методы исследований. Исследования проведены в природных ландшафтах юго-запада Беларуси, преимущественно в границах физико-географического округа Брестское Полесье. Образцы почв отбирали из поверхностного горизонта почв до глубины 10 см, а также из почвенного разреза по генетическим горизонтам. Почвенные разрезы закладывали в центре ключевой площадки до глубины 1,3–1,5 м, т.е. до уровня почвообразующей породы (горизонт С). Исследованию подвергались дерновые заболоченные карбонатные (ДЗК) песчаные и супесчаные почвы, усредненное содержание CaCO_3 в карбонатном горизонте которых составляло 38,6 %, и некоторые категории почв на известковых пресноводных отложениях (ИПО).

В работе рассматривали восемь элементов, которые всегда включаются в группу ТМ: цинк, медь, марганец, свинец, кадмий, никель, кобальт, хром (часть исследуемых элементов – Zn, Cu, Mn, Co входят в группу почвенных микроэлементов). В необходимых случаях исследовали ландшафтно-геохимическое поведение железа. При изучении особенностей вертикальной дифференциации элементов за основу был взят коэффициент радиальной контрастности. Он определялся по формуле $K_k = Z/Z_1$, где Z – содержание элемента в генетическом горизонте почвы, Z_1 – средневзвешенное содержание элемента в почвенной толще [8].

Почву сушили до воздушно-сухого состояния, измельчали до частиц менее 1 мм. Содержание подвижных форм ТМ в воздушно-сухих образцах почв определяли с помощью вытяжек 1 N HCl (отношение почвы к экстрагенту 1:10, для торфяных почв с ИПО – 1:20) атомно-абсорбционным методом на приборе SOLAAR MkII M6 Double Beam AAS.

Результаты исследований и их обсуждение. Согласно [9], при распределении ТМ в почвенном профиле горизонты выступают в качестве многослойного фильтра, а почва рассматривается как система геохимических барьеров.

В табл. 1 приведены усредненные данные, отражающие особенности распределения подвижных форм ТМ и микроэлементов в поверхностном (0–10 см) слое гумусового горизонта A_1 (биогеохимический барьер), в карбонатном горизонте BS_{Ca} (совмещенный испарительный, карбонатный, щелочной барьер), а также в почвообразующей породе С фоновых ДЗК почв.

Таблица 1. Содержание и коэффициенты вариации подвижных форм тяжелых металлов в основных горизонтах фоновых дерновых заболоченных карбонатных почв

Table 1. Content and variation coefficients for mobile forms of heavy metals in main horizons of background soddy swampy carbonate soils

Горизонт		Zn*	Fe	Cu	Mn	Pb	Cd	Ni	Co	Cr
A_1	1	4,77± 0,34	1581,00± 187,82	1,82± 0,26	269,17± 23,61	5,59± 0,43	0,18± 0,02	2,13± 0,22	1,12± 0,11	1,83± 0,38
	2	38,89	65,07	78,87	48,05	35,05	52,02	47,50	43,69	95,29
BS_{Ca}	1	1,12± 0,17	1442,38± 173,73	0,45± 0,07	456,42± 53,24	0,12± 0,08	0,03± 0,02	0,95± 0,25	0,42± 0,08	8,85± 2,31
	2	59,78	48,18	59,22	46,66	180,18	154,93	75,24	53,00	73,79
С	1	0,84± 0,11	96,29± 10,06	0,27± 0,04	3,83± 1,15	0,39± 0,09	0,02± 0,02	0,05± 0,01	0,23± 0,16	0,35± 0,18
	2	55,83	43,08	64,89	123,64	63,22	185,51	66,14	188,15	150,07

Примечание. 1 – среднее арифметическое и стандартная ошибка среднего; 2 – коэффициент вариации (V), %.

* Количество проанализированных проб: Zn, Fe, Cu, Mn – 30, Pb, Cd, Ni, Co, Cr – 21.

Распределение некоторых химических элементов в пределах почвенного профиля косвенно указывает на их биологическую значимость [1]. В этой связи вполне закономерно, что элементы, которые характеризуются выраженной биофильностью, более интенсивно накапливаются в поверхностных гумусовых горизонтах почвенного профиля. Поэтому содержание Zn и Cu в горизонте A_1 ожидаемо оказалось соответственно в 5,7 и 6,7 раза больше, чем в материнской породе С. Биогенную обусловленность в значительной степени имеет и накопление Mn, достигающее значений 270 мг/кг. Аккумуляция Pb, Cd, Ni, Co также оказалась максимальной в данном слое. При этом накопление Pb и Cd носит, по-видимому, техногенный характер, так как не установлено значение данных элементов в жизнедеятельности биологических систем. Содержание таких рассеянных элементов, как Co и Ni весьма низкое (соответственно 1,12 и 2,13 мг/кг), что в первую очередь определяется крайне низким их содержанием в почвообразующей породе (0,23 и 0,05 мг/кг соответственно). В то же время в литературе имеются указания на известную биофильность данных элементов, что может свидетельствовать об их частичном поступлении в горизонт A_1 биогенным путем [10, 11].

Определяющее влияние на поведение рассматриваемых элементов в профиле почв оказывает карбонатное вещество. Карбонатизация почв прежде всего сильно влияет на состояние высокодисперсных компонентов почвы, с которыми связана значительная часть находящихся в почве рассеянных ТМ. К примеру, в лесных почвах Pb мигрирует в основном в форме, сорбированной дисперсным взвешенным веществом (лессиваж) [12]. Однако под влиянием карбонатообразования создается прочная сильнопористая организация высокодисперсного вещества почвы, а глинистые минералы предохраняются от деструкции, что затрудняет формирование взвесей, переносящих ТМ [13]. Карбонатность рассматриваемых почв начинает возрастать уже в переходном к карбонатному слою BS_{Ca} горизонте $A_1B_{1(Ca)}$, где содержание $CaCO_3 + CaMg(CO_3)_2$ достигает значений 15–20%, и более, что существенно ограничивает нисходящую миграцию по почвенному профилю большинства изученных ТМ, за исключением Cr и Mn. Поэтому в карбонатном горизонте BS_{Ca} отмечаются достаточно низкие уровни содержания большинства ТМ. Особенно резко (более чем в 46 раз) уменьшается здесь содержание Pb. В меньшей степени снижается концентрирование Cd (в 6 раз), Cu и Zn (в 4,0–4,3 раза), а также Ni и Co (в 2,2–2,7 раза). При этом большинство из перечисленных элементов находятся в карбонатном веществе в прочно сорбированном состоянии. Так, Zn в щелочной среде образует преимущественно малорастворимый цинкат кальция $CaZnO_2$ [14]. Согласно [12], при росте pH прочность соединений ТМ с почвенными компонентами возрастает и в целом выдерживается ряд адсорбции $Pb > Cu > Zn > Cd$.

В повышенном количестве на карбонатных носителях накапливаются Cr и Mn: усредненное содержание первого элемента в горизонте BS_{Ca} в 4,8 раза выше, чем в горизонте A_1 , и в 25,3 раза больше, чем в почвообразующей породе; аккумуляция Mn выглядит еще более асимметричной – в 1,7 и 119,2 раза соответственно.

Минимальные уровни аккумуляции подвижных форм микроэлементов и ТМ отмечаются в почвообразующих породах – специфическая особенность ландшафтов Полесья как результат неоднократной перемытости и переотложенности водно-ледниковых песков. При этом выносились и выщелачивались все подвижные соединения щелочных и щелочноземельных элементов и связанных с ними макро- и микроэлементов, которые в дальнейшем участвовали в формировании химического состава природных вод и осадков. Дефициту элементов способствует также химическая инертность основного почвообразующего минерала – кварца. В результате почвообразующие породы не оказывают заметного влияния на концентрирование и характер распределения элементов в горизонтах BS_{Ca} и A_1 .

В отношении варьирования значений содержания ТМ в почвах подтверждается закономерность, отмеченная в [15], когда изменчивость содержания какого-либо компонента почвы возрастает по мере уменьшения количества этого компонента. Особенно это проявляется в группе рассеянных элементов; коэффициент V большинства ТМ и микроэлементов ожидаемо достигает максимальных значений в почвообразующей породе.

Среди почв карбонатного ряда в нашем исследовании рассмотрены также почвы, развивающиеся на ИПО или содержащие данные отложения в качестве горизонта-включения. В их числе особую актуальность имеет исследование условий и особенностей накопления и перераспределения ТМ в отложениях лагунообразных фаций, как правило, в соответствующих почвенных разрезах представлены различные типы отложений, в том числе карбонатных. Находясь в подчиненном положении по отношению к сопряженным с ними фациям повышенных участков, они выступают в качестве природного депонента ТМ. Уникальным в этом отношении является разрез Уг6, заложенный в лагунообразном понижении на ключевом участке (КУ) «Уголаз» (модельный полигон (МП) «Днепробуг», Кобринский район). Здесь под торфяной залежью в 0,4 м залегает слой ИПО толщиной 0,1 м, ниже которого располагается органогенно-минеральный горизонт $A_{(Ca)lf}$ мощностью до 0,13 м. Содержание $CaCO_3$ в слое ИПО составляет 71,6 %; значения pH в KCl изменяются от 6,26 в горизонте Ат до 7,23 в ИПО и 6,95 в горизонте ВС.

Строение разреза и особенности распределения микроэлементов представлены на рис. 1 и 2, фактические данные приведены в табл. 2.

Таблица 2. Содержание подвижных форм химических элементов (1) и коэффициенты их радиальной контрастности K_k (2) в торфяно-глеевой карбонатной почве (разрез Уг6)

Table 2. The content of chemical elements' mobile forms (1) and coefficients of their radial contrast K_k (2) in peat-gley carbonate soil (section Ug6)

Горизонт	Содержание химического элемента, мг/кг																	
	Zn		Cu		Mn		Pb		Cd		Ni		Co		Cr		Fe	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Ат	3,26	0,9	2,16	0,8	77,9	0,4	7,67	3,3	0,27	1,3	0,61	0,5	1,02	1,4	2,46	0,8	3700	1,6
Ат _z	9,64	2,7	4,87	1,7	119,9	0,6	5,22	2,2	0,14	0,7	2,84	2,4	1,71	2,3	2,77	0,9	4779	2,1
В _{1Ca} (верхняя часть горизонта)	3,82	1,1	2,45	0,9	468,8	2,1	1,38	0,6	0,09	0,5	0,12	0,1	0,24	0,3	4,98	1,5	1197	0,5
В _{1Ca} (нижняя часть горизонта)	1,63	0,4	0,91	0,3	545,4	2,5	–	0	0,25	1,1	0,11	0,1	0,32	0,4	4,04	1,3	816	0,4
$A_{(Ca)lf}$	6,35	1,8	6,44	2,3	294,7	1,3	0,26	0,1	0,51	2,3	4,02	3,3	1,42	2,0	5,67	1,8	4133	1,8
В _{2g}	0,59	0,2	2,97	1,0	24,5	0,1	1,55	0,7	0,04	0,2	0,70	0,6	0,21	0,3	2,64	0,8	1037	0,5
В _{3C}	0,15	0,04	0,17	0,1	1,1	0,01	0,21	0,1	0,22	–	0,07	0,1	0,19	0,3	0,03	0,01	57	0,03
Средневзвешенное содержание в почве, мг/кг																		
	3,63		2,85		218,9		2,33		0,19		1,21		0,73		3,23		2245,6	

В рассматриваемом разрезе ни по одному из элементов не обнаружено равномерно убывающего с глубиной распределения; отчетливо выделяются три геохимических барьера: биогеохимические – верхний $A_T + A_{Tz}$ и нижний $A_{(Ca)lf}$ и разделяющий их совмещенный (карбонатный, щелочной) барьер горизонта $V_{1Ca(f)}$.

К числу элементов, наиболее заметно накапливающихся и активно мигрирующих в пределах торфяного горизонта, относятся прежде всего интенсивно вовлекаемые в биологический круговорот Zn, Cu, Mn. Так, аккумуляция Cu и Zn в самом верхнем слое приближается к средневзвешенному их содержанию в почве, увеличиваясь у основания торфяного горизонта в 2,3 и 3,0 раза соответственно; коэффициент контрастности K_k возрастает при этом до значений 1,7 и 2,7. Сходную динамику демонстрируют также такие рассеянные элементы, как Ni и Co, в отношении которых существуют разные оценки их биофильности. Помимо явлений выщелачивания, нарастание концентрации данных элементов, а также Cu и Zn к нижней части торфяного горизонта может быть связано с увеличением pH среды, а также со специфической сорбцией соединениями железа, содержание которых здесь максимально. О справедливости подобного утверждения свидетельствует аналогичный характер распределения указанных элементов (особенно Cu и Ni) в профиле почвы лагунообразного понижения КУ «Высокое» (МП «Луково», Малоритский район) (табл. 3).

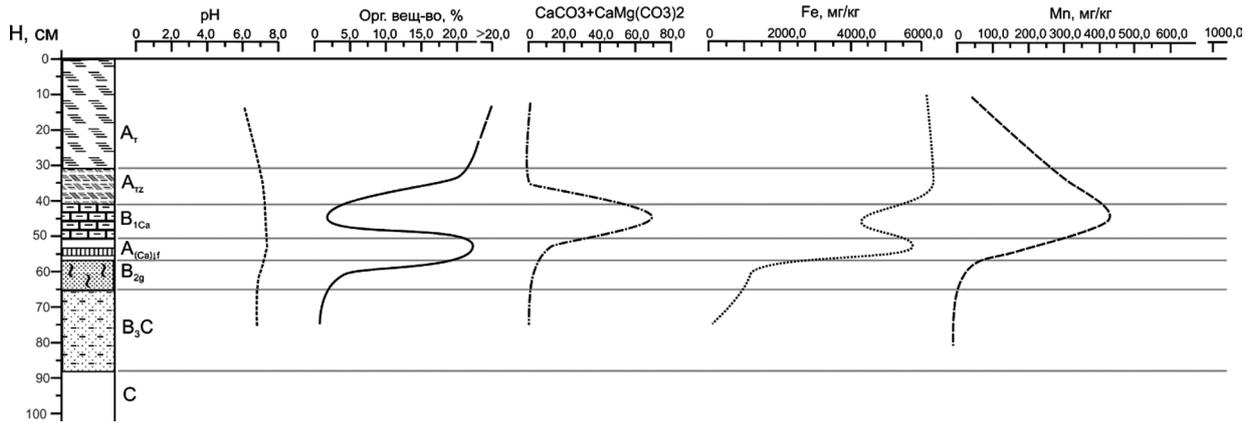


Рис. 1. Радиальное распределение карбонатов и некоторых агро- и геохимических показателей в торфяно-глеевой карбонатной почве (разрез Уг6)

Fig. 1. Radial distribution of carbonates and some agro- and geochemical indicators in peat-gley carbonate soil (section Ug6)

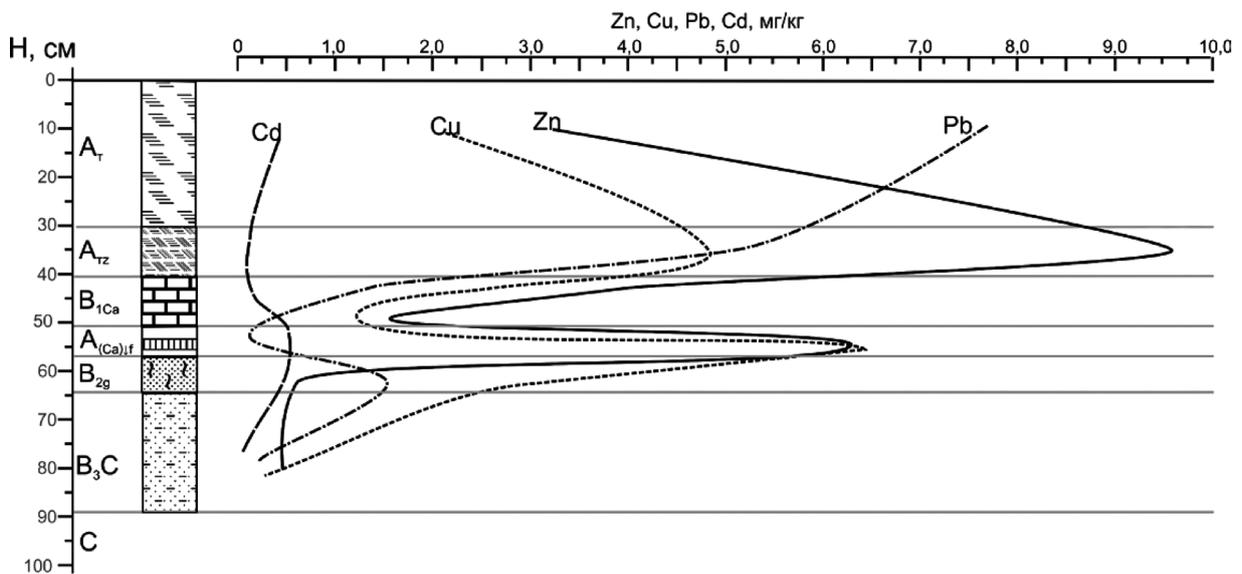
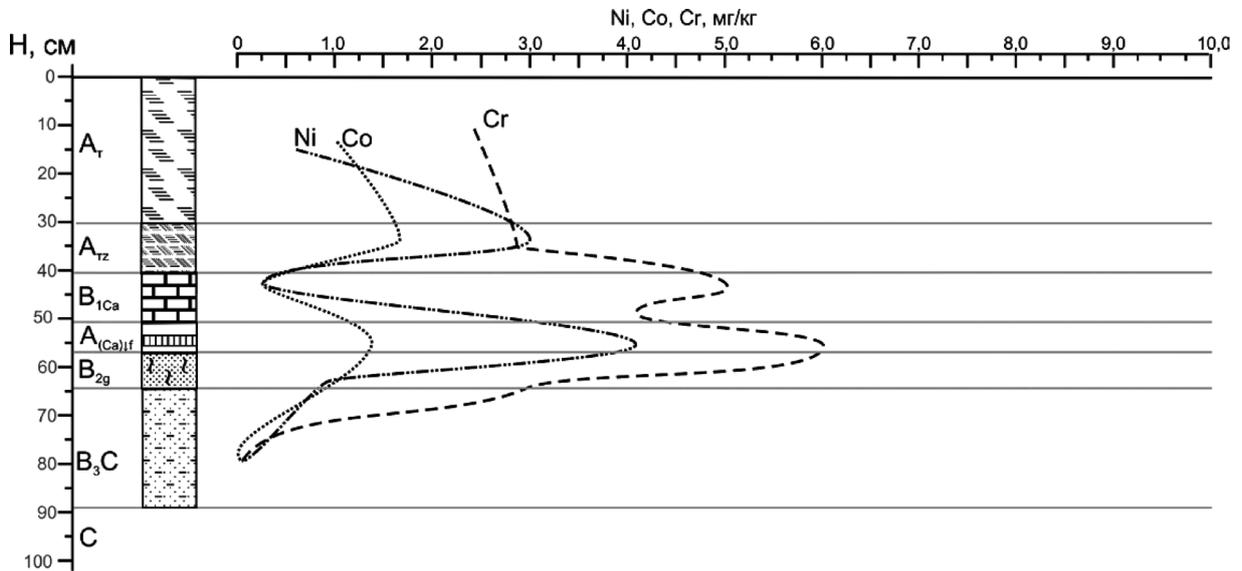


Рис. 2. Радиальное распределение ТМ и микроэлементов в торфяно-глеевой карбонатной почве (разрез Уг6)

Fig. 2. Radial distribution of heavy metals and trace elements in peat-gley carbonate soil (section Ug6)

Таблица 3. Содержание подвижных форм химических элементов (1) и коэффициенты их радиальной контрастности K_k (2) в торфяно-глеевой низинного типа на известковых пресноводных отложениях почве (разрез Выс Лаг)

Table 3. The content of chemical elements' mobile forms (1) and coefficients of their radial contrast K_k (2) in peat-gley low-lying type on calcareous freshwater sediment soil (Vys Lag section)

Горизонт	Содержание химического элемента, мг/кг																	
	Zn		Cu		Mn		Pb		Cd		Ni		Co		Cr		Fe	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
АТ ₁	43,77	4,6	4,33	0,7	170	0,8	35,75	4,4	1,32	4,6	2,44	0,6	4,29	2,2	9,38	0,6	6804	1,1
АТ ₂	4,04	0,4	24,77	4,1	108	0,5	10,07	1,2	0,17	0,6	19,05	4,5	3,65	1,9	16,83	1,0	14872	2,3
АТ _{z(Ca)}	4,05	0,4	2,64	0,4	403	1,9	0,07	0,01	0,13	0,5	1,19	0,3	1,05	0,5	30,13	1,8	5615	0,9
V _{1Ca} (верхняя часть горизонта)	2,16	0,2	2,44	0,4	403	1,9	0,94	0,1	0,10	0,3	1,19	0,3	0,8	0,4	30,89	1,8	6554	1,0
V _{1Ca} (нижняя часть горизонта)	1,86	0,2	1,92	0,3	205	1,0	1,50	0,2	0,0	–	1,25	0,3	1,72	0,9	15,23	0,9	4446	0,7
V _{3C(f)}	0,95	0,1	0,31	0,1	5,0	0,02	0,39	0,05	0,0	–	0,06	0,01	0,23	0,1	0,35	0,02	106	0,02
Средневзвешенное содержание в почве, мг/кг																		
	9,47		6,07		215,7		8,12		0,29		4,20		1,96		17,14		6399,5	

На совмещенном геохимическом барьере в карбонатном горизонте BS_{Ca} наиболее интенсивно происходит накопление Cr и особенно Mn . По сравнению с торфяным горизонтом содержание Cr в среднем здесь увеличивается в 1,7 раза и колеблется в абсолютных значениях от 4,04 до 4,98 мг/кг (K_k – от 1,3 до 1,5). Еще более значительным является накопление данного элемента в карбонатном горизонте почв КУ «Высокое»: в почвах ступени А – до 23,0 мг/кг, ступени D (лагуна) – около 31,0 мг/кг при K_k – 1,3–1,4 и 1,8 соответственно. Повышенное накопление Cr в карбонатном горизонте почв отмечается многими исследователями [8, 16] и, судя по константности этого явления во всех изученных нами почвах карбонатного ряда, выступает в качестве общей закономерности. По-видимому, в карбонатной среде сохраняется не только радиальная, но и латеральная подвижность Cr : в отношении данного элемента почвы супераквальных ландшафтов лагунообразных понижений в своем естественном состоянии выступали аккумуляторами данного элемента, поступающего в том числе из сопряженных с ними ландшафтов повышений.

Еще более контрастным является накопление на совмещенном геохимическом барьере Mn : в профиле разреза Угб его K_k достигает значений 2,5; в остальных рассматриваемых случаях, включая почвы КУ «Высокое», колеблется в пределах 1,9–2,0. Однако, несмотря на определенную схожесть поведения Cr и Mn на карбонатных носителях, их способность к транслокациям в растения несколько различается: как показали наши исследования, она сохраняется у Cr и является ограниченной у Mn . По-видимому, в щелочной среде на фоне высокого содержания подвижного Mn снижается доступность растениям его обменных форм.

Миграционная активность всех остальных элементов в пределах карбонатного горизонта резко ограничена; здесь они находятся в прочно сорбированной форме – Pb , Cd и Ni фиксируются или в следовых количествах, их K_k составляет 0,1–0,5. Примерно такие же особенности характерны в поведении на данном барьере таких биофильных элементов, как Cu и Zn : в верхней части карбонатного горизонта их K_k составляет 0,9 и 1,1 соответственно, резко снижаясь в основании слоя до 0,3–0,4. Все эти данные позволяют утверждать, что в отношении Cu и Zn также осуществляется эффективная сорбция карбонатами.

Особый интерес в разрезе Угб представляет поведение рассматриваемых элементов на втором биогеохимическом барьере, расположенном под карбонатными отложениями. При этом необходимо специально отметить, что рассматриваемый тип карбонатных отложений по своему генезису не относится к числу эпигенетических (вторичных или наложенных) образований по отношению к почвенной толще. Это сингенетические карбонаты седиментационного генезиса, отложение которых на поверхности ранее сформировавшейся почвы не оказало деформирующего воздействия на ее геохимический режим (или подобное влияние было минимальным). В силу

высокой сорбционной способности в отношении большинства элементов карбонатный горизонт ограничивал их нисходящее перемещение и дополнительное поступление к рассматриваемому барьеру (за исключением, по-видимому, Mn и Cr). Следовательно, содержание большинства химических элементов в горизонте $A_{(Ca)lf}$ можно в известной степени рассматривать в качестве пассивных величин, отражающих геохимическую палеообстановку, сложившуюся в период формирования соответствующего горизонта (по результатам спорово-пыльцевого анализа, выполненного Е. Н. Дрозд, он маркирует SA_1 этап голоцена).

Наиболее контрастно на данном барьере аккумулируются Ni (K_k 3,3), Cu и Cd (K_k 2,3), Co (K_k 2,0); менее интенсивно накапливаются Zn, Cr и Fe (K_k 1,8), а также Mn (K_k 1,3). При этом ряд элементов содержится в концентрациях, являющихся максимальными в ряду рассматриваемых генетических горизонтов данного разреза: Cu – 6,44 мг/кг, Ni – 4,02, Cd – 0,51, Cr – 5,67 мг/кг. По сравнению с верхним торфяным горизонтом выделяется также своим накоплением Mn – здесь его в 3,0 раза больше по сравнению с усредненным содержанием в A_T и A_{TZ} . Учитывая, что подвижность Mn, а также Cr сохраняется в карбонатных отложениях, можно ожидать привноса этих элементов в слой $A_{(Ca)lf}$ из вышерасположенного карбонатного горизонта. В отношении остальных элементов такое перемещение имело крайне ограниченный характер и уровни их накопления адекватны ландшафтно-геохимической обстановке соответствующих палеопериодов.

Самым низким содержанием на данном барьере отличается свинец – 0,26 мг/кг (K_k 0,1), что в 20–30 раз меньше, чем в двух верхних генетических горизонтах разреза и сопоставимо с содержанием данного элемента в слое BC (0,21 мг/кг) и существенно ниже среднефоновых величин, установленных нами для ДЗК почв ($5,59 \pm 0,43$ мг/кг). Даже если предположить вынос определенного количества свинца в нижележащий горизонт B_g , где его концентрация возрастает до 1,55 мг/кг, это все равно в 4,2 раза ниже, чем усредненное его содержание в верхнем торфяном слое. При этом необходимо отметить, что выщелачивания остальных элементов (за исключением, по-видимому, Cu и Cr) в слой B_g не наблюдалось, а их K_k колеблются здесь от 0,1 до 0,6. Представляется, что миграция свинца в водорастворимой форме в границах слоя $A_{(Ca)lf} + B_{2g}$ и вынос за его пределы также были незначительными. Так, согласно данным [17], даже при высокой степени загрязнения торфяных почв обнаруживалось ничтожно малое количество водорастворимого свинца.

Выводы. Таким образом, комплекс геохимических барьеров в почвах карбонатного ряда довольно существенно влияет на накопление и распределение по профилю большинства изученных ТМ и микроэлементов. В пределах карбонатного геохимического барьера резко ограничивается миграционная подвижность таких опасных ТМ, как Pb, Zn, Cd, Ni. В то же время сохраняется миграционная активность и опасность накопления в растениях Cr и отчасти Mn. Выявленные особенности имеют принципиальное значение для разработки комплекса мероприятий по регулированию миграционной активности ТМ в агроэкосистемах и предотвращению их транслокаций в сельскохозяйственные растения. Установленные уровни содержания ТМ и микроэлементов в природных ДЗК почвах могут использоваться в качестве субрегиональных фоновых значений в процессе проведения оценок степени загрязнения почв в зонах техногенных воздействий.

Список использованных источников

1. Алексеев, Ю. В. Тяжелые металлы в почвах и растениях / Ю. В. Алексеев. – Л.: Агропромиздат, 1987. – 142 с.
2. Ильин, В. Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение / В. Б. Ильин. – Новосибирск: Наука, 1991. – 150 с.
3. Ладонин, Д. В. Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения / Д. В. Ладонин // Почвоведение. – 2002. – № 6. – С. 682–692.
4. Водяницкий, Ю. Н. Сродство тяжелых металлов и металлоидов к фазам-носителям в почвах (литературный обзор) / Ю. Н. Водяницкий // Агрохимия. – 2008. – № 8. – С. 87–94.
5. Водяницкий, Ю. Н. Природные и техногенные соединения тяжелых металлов в почвах / Ю. Н. Водяницкий // Почвоведение. – 2014. – № 4. – С. 1–13.
6. Клебанович, Н. В. Известкование почв Беларуси / Н. В. Клебанович, Г. В. Василюк. – Минск: БГУ, 2003. – 321 с.
7. Лысухо, Н. А. Отходы производства и потребления, их влияние на природную среду / Н. А. Лысухо, Д. М. Ерошина. Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2011. – 210 с.
8. Рябова, Л. Н. Геохимическая характеристика почвенного покрова в долине р. Днепр / Л. Н. Рябова // Вес. Нац. акад. наук НАН Беларуси. Сер. хим. наук. – 2005. – № 4. – С. 69–75.

9. Глазовская, М. А. Методология эколого-геохимической оценки устойчивости почв как компонента ландшафта / М. А. Глазовская // Изв. РАН. Сер. геогр. – 1997. – № 3. – С. 18–30.
10. Кашин, В. К. Никель в почвах Забайкалья / В. К. Кашин, Г. М. Иванов // Почвоведение. – 1995. – № 10. – С. 1291–1298.
11. Сосорова, С. Б. Кобальт в почвах и растениях дельты р. Селенга / С.Б. Сосорова // Почвоведение. – 2009. – № 7. – С. 806–813.
12. Агроэкология техногенно-загрязненных ландшафтов / Ю. А. Мажайский [и др.]. – Смоленск : Маджента, 2003. – 384 с.
13. Добровольский, В. В. Внутрипочвенное карбонатообразование, высокодисперсное вещество почв и геохимия тяжелых металлов / В. В. Добровольский // Почвоведение. – 2001. – № 12. – С. 1434–1442.
14. Мокриевич, Г. Л. Цинковые удобрения / Г. Л. Мокриевич, З. И. Шлавицкая. Алма-Ата : Кайнар, 1972. – 140 с.
15. Вальков, В. Ф. Оценка и некоторые особенности варьирования генетических характеристик почв / В. Ф. Вальков, Г. Г. Клименко, В. И. Продан // Почвоведение. – 1975. – № 11. – С. 5–13.
16. Кашин, В.К. Хром в почвах Забайкалья / В.К. Кашин, Г.М. Иванов // Почвоведение. – 2002. – № 3. – С. 311–318.
17. Головатый, С. Е. Содержание миграционно-активных форм свинца в дерново-подзолистых и торфяных почвах / С. Е. Головатый, Н. К. Лукашенко, З. С. Ковалевич // Экологический вестник. – 2010. – № 3 (13). – С. 15–22.

References

1. Alekseev Iu. V., Tiazhelye metally v pochvakh i rasteniiakh [Heavy metals in soils and plants], Agropromizdat, Leningrad, RU, 1987.
2. Il'in V. B., Tiazhelye metally v sisteme pochva-rastenie [Heavy metals in soil-plant system], Nauka. Sibirskoe otdelenie, Novosibirsk, RU, 1991.
3. Ladonin D. V., “Compounds of heavy metals in soils – problems and methods of study”, Pochvovedenie [Soil Science], 2002, no. 6, pp. 682–692.
4. Vodianskii Iu. N., “Affinity of heavy metals and metaloids for carrier phases in soils (a review)”, Agrokimiia [Agricultural Chemistry], 2008, no. 8, pp. 87–94.
5. Vodianskii Iu. N., “Natural and man-caused heavy metal compounds in soils”, Pochvovedenie [Soil Science], 2014, no. 4, pp. 1–13.
6. Klebanovich N. V., Vasiliuk G. V., Izvestkovaniye pochv Belarusi [Ziming of soils of Belarus], BSU, Minsk, 2003.
7. Lysukho N. A., Eroshina D. M., Otkhody proizvodstva i potrebleniia, ikh vliianie na prirodnuuiu srediu [Production and consumption waste; its effect upon the environment], MGEU im. A. D. Sakharova, Minsk, BY, 2011.
8. Riabova L. N., “Geochemical characteristics of soils in Dnepr valley”, Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry Series], 2005, no. 4, pp. 69–75.
9. Glazovskaia M. A., “Methodology of environmental and geochemical evaluation of the sustainability of soils as landscape component”, Izvestiia RAN. Seriya geograficheskaya [Proceedings of Russian Academy of Sciences. Geography Series], 1997, no. 3, pp. 18–30.
10. Kashin V. K., Ivanov G. M., “Nickel in Transbaikalian soils”, Pochvovedenie [Soil Science], 1995, no. 10, pp. 1291–1298.
11. Sosorova S. B., “Cobalt in soils and plants of Selenga river delta”, Pochvovedenie [Soil Science], 2009, no. 7, pp. 806–813.
12. Mazhaiskii Iu. A., Tobratov S. A., Dubenok N. N., Pozhogin Iu. P., Agroekologiya tekhnogenno zagriaznennykh landshaftov [Agroecology of man-polluted landscapes], Madzhenta, Smolensk, RU, 2003.
13. Dobvol'skii V. V., “Intrasoil carbonate formation, highly disperse soil substance and geochemistry of heavy metals”, Pochvovedenie [Soil Science], 2001, no. 12, pp. 1434–1442.
14. Mokrievich G. L., Shlavitskaia Z. I., Tsinkovye udobreniia [Zinc fertilizers], Kainar, Alma-Ata, KZ, 1972.
15. Val'kov V. F., Klimenko G. G., Prodan V. I., “Evaluation and some features of genetic soil characteristic variation”, Pochvovedenie [Soil Science], 1975, no. 11, pp. 5–13.
16. Kashin V. K., Ivanov G. M., “Chromium in Transbaikalian soils”, Pochvovedenie [Soil Science], 2002, no. 3, pp. 311–318.
17. Golovaty S. E., Lukashenko N. K., Kovalevich Z. S., “Content of migratory-active forms of lead in sod-podzolic and peat soils”, Ekologicheskii vestnik [Environmental Bulletin], 2010, no. 3 (13), pp. 15–22.

Информация об авторах

Михальчук Николай Васильевич – канд. биол. наук, доцент, директор, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Московская, 204/1-1, 224020, Брест, Республика Беларусь). E-mail: dpp@tut.by.

Information about the authors

Mikalai V. Mikhalchuk – Ph. D. (Biology) Associate Professor, Director, Polesie Agrarian Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (204/1-1, Moskovskaya Str., 224020, Brest, Republic of Belarus). E-mail: dpp@tut.by.