

Аккумуляция тяжёлых металлов чернозёмами самарского Заволжья

В.Б. Троц, д.с.-х.н., профессор, Н.М. Троц, к.б.н., Самарская ГСХА

В условиях возрастающего антропогенного воздействия человека на биосферу особую опасность для агробиоценозов представляют тяжёлые металлы (ТМ) [1]. Попадая в систему почва – растение – животное – человек, они включаются в биологический кругооборот и пищевые цепочки, сохраняя в течение длительного времени – 500–1500 и более лет – токсические и мутагенные свойства [2, 3]. Это требует мониторинга проблемы и разработки адекватных технологических приёмов, минимизирующих негативные последствия привнесения токсикантов.

Цель исследования – выявление особенностей аккумуляции ТМ (Cd, Pb, Zn, Cu, Co, Mn) в основных подтипах чернозёма самарского Заволжья и характера их локализации в пахотном горизонте.

Условия, материалы и методы. Для решения поставленной цели нами в северной зоне самарского Заволжья исследовались чернозёмы выщелоченные, в центральной – чернозёмы типичные и в южной – чернозёмы южные. Отбор почвенных образцов и их подготовку к анализам проводили общепринятыми методами [4, 5]. Анализы выполняли в лаборатории ФГУ «Самарская» на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Спектр 5-4». Помимо ТМ, в почвах определяли рН водной вытяжки, концентрацию гумуса, подвижного фосфора и обменного калия, сумму обменных оснований. Экспериментальный материал статистически обрабатывали в ВЦ Самарской ГСХА [6].

Результаты и обсуждения. Анализ почвенных образцов показал, что чернозём выщелоченный имеет

сравнительно большой удельный вес в структуре агрегатов мелкодисперсных глинистых (<0,01 м) – 57% и илистых частиц (<0,001 мм) – 44%, обуславливающих высокую сорбционную ёмкость. В типичном чернозёме их количество не превышало в среднем 53 и 35%, а в южном – 47 и 31%. Прослеживались различия и по содержанию гумуса. В верхнем горизонте чернозёма выщелоченного (0–10 см) его концентрация равнялась 6,3%, а в среднем по пахотному профилю (0–30 см) – 6,2%, что на 18,8–19,6% больше показателей чернозёма типичного и на 61,5–63,1% южного. С продвижением на юг менялась реакция почвенной среды и сумма обменных оснований. У чернозёма выщелоченного рН водной вытяжки варьировала в пределах 6,0–6,2 при сумме обменных оснований 370–460 мг/экв на 1 кг почвы. При этом на долю Са приходилось 78,0–87,0% общего объёма. Реакция почвенного раствора чернозёма типичного была несколько сдвинута в щелочную сторону – рН – 6,6–6,9, а сумма обменных оснований составляла 373–410 мг/экв/кг. К тому же в нижнем горизонте (20–30 см) прослеживалось наличие Na, возрастал и удельный вес Mg – до 16,6–22,1%. Чернозём южный имел щелочную реакцию почвенной среды с рН в горизонте 0–20 см 7,2–7,3, а в слое 20–30 см – 7,5. Сумма обменных оснований уменьшалась до 380, а в нижнем горизонте до 300 мг/экв/кг. По всему почвенному профилю отмечалось присутствие ионов Na⁺. На долю Ca²⁺ приходилось 71,7–82,4% общей суммы поглощённых оснований.

Анализ наличия подвижных форм P₂O₅ и K₂O показал, что наиболее хорошо этими биогенными элементами обеспечен чернозём выщелоченный, в среднем – 211 и 213 мг/кг почвы. Их запасы в

чернозёме типичном снижались в среднем до 191 и 201 мг/кг, или на 10,5 и 6,0%, а в чернозёме южном до 180 и 197 мг/кг, или на 17,2 и 8,1%.

Исследованиями выявлено, что во всех изучаемых подтипах чернозёмов присутствуют Cd, Pb, Zn, Cu, Co, Mn. Однако их валовые объёмы не превышают ПДК. При этом наибольшее количество ТМ аккумулирует чернозём выщелоченный. Так, уровень накопления в нём Cd (0,44 мг/кг) в 1,2 раза превышал показатели типичного (0,36 мг/кг) и в 1,7 раза (0,26 мг/кг) чернозёма южного (табл. 1). Аналогичные закономерности прослеживаются и по Pb – соответственно 18,7 против 11,1 мг/кг и 7,86 мг/кг, или в 1,7 и 2,4 раза. Объёмы аккумуляции Zn были примерно равными и составляли в южной зоне около 40,0 мг/кг, а в северной – 44,0 мг/кг. Концентрация Cu в чернозёме выщелоченном на 24,8 и 89,0% превышала индексы чернозёма типичного и южного и равнялась в среднем 19,9 мг/кг. Содержание Co в почвах северной и центральной зоны было примерно равным и варьировало от 9,17 до 9,92 мг/кг. В южной зоне концентрация данного элемента в пахотном горизонте не превышала в среднем 6,31–6,56 мг/кг, или была на 45,3–51,2% ниже. Зональные особенности наблюдаются и в отношении Mn. На севере области в чернозёме выщелоченном его количество в пахотном горизонте составляло в среднем 707 мг/кг, в центре – в типичном – 612 мг/кг и на юге – в чернозёме южном – 464 мг/кг.

Таким образом, по количественному содержанию валовых форм Cd, Pb, Zn, Cu, Co, Mn почвы самарского Заволжья образуют убывающий ряд: чернозём выщелоченный > чернозём типичный > чернозём южный.

Повышенный уровень металлоаккумуляции чернозёмом северной лесостепи, наряду с физико-химическими свойствами почвы и комплексом природно-климатических условий, очевидно, обусловлен и техногенным воздействием на агробиоценозы.

Определённые закономерности прослеживались и при распределении химических элементов по

профилю пахотного горизонта. Во всех подтипах чернозёмов наибольшее их количество концентрировалось в верхнем гумусовом горизонте (0–10 см), что обусловлено большой поглотительной ёмкостью органо-минеральной части этого слоя почвы. На глубине 10–20 см их содержание уменьшалось в среднем на 1,5–5,6%. В нижнем горизонте (20–30 см) вновь возрастало до средних значений. Очевидно, это вызвано вымыванием ТМ атмосферными осадками из верхнего и среднего слоёв почвы и перемещением в иллювиальный горизонт, где происходит их абсорбция глинистыми и илистыми частицами почвы.

Анализ количественного состава аккумулянтов показал, что во всех изучаемых подтипах чернозёмов наибольшую долю в общем объёме занимает Mn – в среднем 87,6–88,7%, далее в порядке убывания следует Zn – 5,5–7,6%, Cu – 2,1–2,6%, Pb – 1,5–2,3%, Co – 1,2–1,4% и Cd – 0,04–0,05%.

Важным критерием, характеризующим степень накопления ТМ в агроценозах, является их запас в корнеобитаемом слое (0–30 см) в кг на 1 га. Установлено, что количество валовых форм элементов в чернозёме выщелоченном может варьировать от 1,32 – у Ca до 2121 – у Mn кг/га. Пахотный горизонт северной зоны относительно много содержал Zn, Cu и Pb, соответственно 132,0; 59,7; 56,1 кг/га (табл. 2).

Объём аккумуляции Co равнялся 28,2 кг/га. При этом общий вес изучаемых металлотоксикантов на 1 га достигал 2398 кг. В соответствии с выявленными ранее закономерностями чернозём типичный на 1 га содержал на 0,24 кг меньше Cd, 22,8 кг – Pb, 10,8 кг – Zn, 10,2 кг – Cu и 285 кг – Mn, а Co – наоборот, на 0,9 кг/га больше. Их общий вес на 1 га составлял 2070 кг. Уровень накопления Cd, Zn, Cu, Co в чернозёме южном был в 1,1–1,8 раза, а Pb – в 2,4 раза меньше, чем в почвенном покрове северной зоны, и в 1,0–1,5 раза меньше, чем в центральной. Общий вес ТМ на 1 га равнялся 1589 кг, что на 809 кг меньше северной зоны и на 481 кг – южной.

1. Содержание ТМ в различных типах почв, мг/кг, 2008–2010 гг.

Почва	Слой почвы, см	Валовая форма						Подвижная форма					
		элемент											
		Cd	Pb	Zn	Cu	Co	Mn	Cd	Pb	Zn	Cu	Co	Mn
Чернозём выщелоченный	0–10	0,44	19,8	44,1	20,8	9,57	701	0,123	0,73	0,35	0,75	0,46	35,4
	10–20	0,43	18,1	43,6	18,2	9,17	698	0,112	0,63	0,35	0,57	0,49	37,9
	20–30	0,45	18,4	44,3	20,6	9,48	722	0,121	0,70	0,31	0,58	0,41	38,6
	среднее	0,44	18,7	44,0	19,9	9,41	707	0,118	0,69	0,34	0,63	0,45	37,3
Чернозём типичный	0–10	0,37	11,1	40,4	17,0	9,92	625	0,080	0,48	0,59	0,16	0,11	54,5
	10–20	0,35	10,8	40,3	16,8	9,48	600	0,071	0,53	0,63	0,13	0,14	51,2
	20–30	0,37	11,3	40,6	15,8	9,69	612	0,073	0,53	0,52	0,12	0,10	54,2
	среднее	0,36	11,1	40,4	16,5	9,70	612	0,074	0,51	0,58	0,14	0,12	53,3
Чернозём южный	0–10	0,28	8,0	40,6	11,0	6,30	486	0,029	0,51	0,33	0,10	0,31	25,3
	10–20	0,24	7,4	40,1	10,7	6,29	449	0,036	0,39	0,53	0,10	0,26	28,2
	20–30	0,27	8,2	40,3	11,1	6,56	456	0,025	0,61	0,40	0,09	0,29	23,3
	среднее	0,26	7,86	40,3	10,9	6,40	464	0,030	0,50	0,42	0,10	0,28	25,6
ПДК		2,0	30,0	100,0	55,0	14,0	1500	0,5	6,0	23,0	3,0	5,0	100,0

2. Содержание валовых и подвижных форм ТМ в почве, 2008–2010 гг.

Почва	Форма металла	Элемент					
		Cd	Pb	Zn	Cu	Co	Mn
Чернозём выщелоченный	валовая, кг/га	1,32	56,1	132,0	59,7	28,2	2121
	подвижная, кг/га	0,35	2,07	1,02	1,89	1,35	111,9
	% подвижности	26,5	3,7	0,8	3,2	4,8	5,2
Чернозём типичный	валовая, кг/га	1,08	33,3	121,2	49,5	29,1	1836
	подвижная, кг/га	0,22	1,53	1,74	0,42	0,36	159,9
	% подвижности	20,4	4,6	1,4	0,8	1,2	8,7
Чернозём южный	валовая, кг/га	0,78	23,6	120,9	32,7	19,2	1392
	подвижная, кг/га	0,09	1,50	1,26	0,30	0,89	76,8
	% подвижности	11,5	6,3	1,0	0,9	4,6	5,5

По мнению многих исследователей, наибольшую опасность для биологических объектов представляют не валовые, а мобильные формы металлов [7, 8]. Проведённые эксперименты показали, что объём вовлечения металлотоксикантов в биологический круговорот и их мобильность в агроландшафтах самарского Заволжья также во многом определяется зональными особенностями. Выявлено, что подвижность Cd с продвижением с севера на юг снижается в среднем с 26,5% у чернозёма выщелоченного до 20,4% у типичного и 11,5% у южного. При этом потенциально опасный объём токсиканта на 1 га уменьшается с 0,35 кг на севере до 0,22 кг в центре и до 0,09 кг на юге. В отношении Pb прослеживалась обратная зависимость. Наибольшая его подвижность 5,2–7,5% отмечалась у чернозёма южного, наименьшая – 3,5–3,8% – у выщелоченного. Мобильность Pb в чернозёме типичном равнялась в среднем 4,6%, а его доступные объёмы в пахотном горизонте 0–30 см составляли в среднем 1,53 кг/га, что на 35,3% меньше значений чернозёма выщелоченного – 2,07 кг/га. Запасы подвижного токсиканта в чернозёме южном равнялись в среднем 1,50 кг/га.

Подвижность Zn больше проявлялась в чернозёме типичном и достигала в среднем 1,4%. В чернозёме выщелоченном она равнялась 0,8%, а в южном – 1,0%. Установлено, что в почвах северной зоны накапливается около 1,02 кг потенциально доступного растениям Zn на 1 га, в центральной – 1,74 кг/га, а в южной – 1,26 кг/га.

Мобильность Cu больше проявлялась в чернозёме выщелоченном и варьировала от 2,8 до 3,6%. При этом количество биологически активного Cu равнялось 1,89 кг/га. В чернозёме типичном и южном его подвижность не превышала 0,8–0,9%, а биодоступность составляла соответственно 0,42 и 0,30 кг/га, что в 4,6 и 6,3 раза меньше, чем в почве северной зоны.

Чернозём выщелоченный обуславливал и относительно высокую мобильность Co – 4,3–5,3%. С переходом значений к чернозёму типичному абсорбция Co повышалась, а мобильность уменьшалась до 1,0–1,5% и вновь возрастала в условиях чернозёма южного – до 4,1–4,8%. Содержание подвижного Co в изучаемых подтипах почв равнялась соответственно 1,35; 0,36 и 0,84 кг/га.

Mn, наоборот, большую биологическую активность проявлял в чернозёме типичном, достигая мобильности на уровне 8,5–8,8%. При этом содержание подвижных форм в пахотном горизонте составляло в среднем 159,9 кг/га. В почве северной зоны мобильность Mn варьировала от 5,0 до 5,4%, а его запасы в верхнем слое почвы равнялись 111,9 кг/га. В чернозёме южном объёмы аккумуляции доступного Mn находились в пределах 76,8 кг/га, или 5,5% от валового содержания.

Математический анализ полученных результатов выявил тесную связь содержания валовых форм ТМ с наличием в почве глинистой и илстой фракций. Коэффициенты корреляции равнялись соответственно $r=0,71-0,92$ и $r=0,64-0,92$, а также с содержанием гумуса ($r=0,53-0,98$). Причём концентрация Cd, Pb, Zn и Cu в большей степени определялась наличием органического вещества в почве ($r=0,85-0,98$). Прослеживалась чёткая зависимость присутствия Pb от объёма поглощённых оснований и, в частности, от содержания в почве подвижных форм P_2O_5 ($r=0,72$ и $r=0,88$). Аналогичная зависимость также прослеживалась по Cd, Zn, Mn, и Co ($r=0,62-0,85$). Анализ показал, что уровень концентрации как валовых, так и подвижных металлов в почве в годы исследований практически не зависел от pH почвенной среды. Очевидно, пределы её вариации в агроландшафтах самарского Заволжья относительно невелики и не оказывают существенного влияния на процессы металлонакопления в почве. Расчётами установлена тесная связь подвижных Cd, Pb, Cu и Co с дисперсностью почвы и наличием в ней P_2O_5 ($r=0,58-0,91$). Присутствие подвижного Mn в средней степени коррелировало с наличием гумуса ($r=0,51$), глинистых фракций ($r=0,32$) и насыщенностью поглощёнными основаниями ($r=0,32$), а Zn – в определённой мере реакцией почвенной среды ($r=0,34$).

Таким образом, по степени подвижности ТМ в почвах можно выстроить следующие ряды: чернозём выщелоченный – Cd>Mn>Co>Pb>Cu>Zn; чернозём типичный – Cd>Mn>Pb>Zn>Co>Cu; чернозём южный – Cd>Pb>Mn>Co>Zn>Cu.

Сравнительный анализ полученных результатов с индексами ПДК для подвижных форм выявил, что содержание химических элементов в почвах на-

ходится существенно ниже контрольных значений и не превышает ПДК.

Выводы. По результатам исследований можно сделать заключение, что наибольшее количество валовых форм Cd, Pb, Zn, Mn и Cu в условиях Самарского Заволжья аккумулирует чернозём выщелоченный, а Co – чернозём типичный. Максимальный уровень локализации подвижных форм Cd, Pb, Cu и Co также приходится на чернозём выщелоченный, а Zn и Mn – на чернозём типичный. Содержание валовых форм ТМ в почве во многом определяется наличием глинистой и илистой фракций ($r = 0,71-0,92$ и $r = 0,64-0,92$), а также содержанием гумуса ($r = 0,53-0,98$). Присутствие подвижных Cd, Pb, Cu и Co связано с дисперсностью почвы и наличием в ней P_2O_5 ($r = 0,58-0,91$), а Mn с гумусом ($r = 0,51$). В годы исследований уровень концентрации валовых и подвижных форм

металлотоксикантов во всех изучаемых подтипах чернозёмов был близок к фоновым значениям и не превышал ПДК.

Литература

1. Каплин В.Г. Основы экотоксикологии. М.: Издательство «КолосС», 2006. 231 с.
2. Черных Н.А., Милашенко Н.З., Ладонин В.Ф. Экотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжёлыми металлами. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. 148 с.
3. Степановских А.С. Экология. Курган: Изд. «Зауралье», 2000. 702 с.
4. Методические указания по атомно-абсорбционным методам определения токсичных элементов в пищевых продуктах и пищевом сырье. Государственный комитет санэпиднадзора РФ. М., 1992. 35 с.
5. Алексеев Ю.В. Тяжёлые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. 142 с.
6. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
7. Бузмаков В.В., Москаев Ш.А. Природопользование и сельскохозяйственная экология. М., 2005. 477 с.
8. Переломов Л.В., Пинский Д.П., Виоланте А. Влияние органических кислот на адсорбцию меди, свинца, цинка // Почвоведение. 2011. № 1. С. 26–33.