

УДК 632.122.1:631.559:-631.81.033

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В УРОЖАЕ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

© 2022 г. Д. Н. Курбаков^{1,*}, В. К. Кузнецов¹, М. С. Хлопук², Е. В. Сидорова¹¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
249032 Обнинск, Калужская обл., Киевское шоссе 109 км, Россия*² *Тульский научно-исследовательский институт сельского хозяйства—филиал ФИЦ “Немчиновка”
301493 пос. Молочные Дворы, Тульская обл., Плавский р-н, ул. Садовая, 7, Россия*

*E-mail: kurbakov007@gmail.com

Поступила в редакцию 19.05.2020 г.

После доработки 25.05.2021 г.

Принята к публикации 15.12.2021 г.

В многолетнем исследовании изучено влияние длительного применения различных доз минеральных удобрений на накопление тяжелых металлов в урожае зерновых культур, агрохимические свойства почв и урожайность зерновых культур. Наибольший отрицательный баланс элементов питания в почве отмечен в контрольных вариантах без внесения удобрений и при применении несбалансированных по количеству элементов питания минеральных удобрений, что приводило к ухудшению свойств почв, снижению в 1.3–1.7 раза урожайности зерновых культур и превышению предельно допустимых показателей содержания Cd в зерне яровой пшеницы. При этом фосфорные удобрения и известкование снижали содержание Cu и Pb зерне в 1.2–1.7, Pb – в 1.5 раза. Максимальным накоплением в урожае зерновых культур характеризовался кадмий, наименьшим – свинец.

Ключевые слова: аграрные экосистемы, тяжелые металлы, минеральные удобрения, зерновые культуры.

DOI: 10.31857/S000218812203005X

ВВЕДЕНИЕ

Получение высоких урожаев качественной продукции растениеводства является неотъемлемой частью безопасности страны и стабильности экономики. В настоящее время без применения удобрений получение высоких урожаев растительной продукции практически невозможно [1]. В состав минеральных удобрений могут входить соединения тяжелых металлов (ТМ), которые проявляют себя двояко по отношению к живым организмам. С одной стороны, они являются микроэлементами, необходимыми для нормального функционирования растений, а с другой, накапливаясь, могут вызывать токсические эффекты. Основным источником поступления ТМ в почвы и сельхозпродукцию являются фосфорные удобрения, при интенсивном использовании которых возможно опасное накопление токсичных элементов в почвах. Однако азотные и калийные удобрения также могут быть причиной накопления ТМ [2]. Увеличение содержания ТМ в почве ведет к возрастанию их концентрации в растениях.

Накопление ТМ в организме человека осуществляется в основном с пищей и меньше – за

счет воды и воздуха, причем с растительными продуктами их поступает с рационом в 2–7 раз больше по сравнению с продуктами животного происхождения [3]. При этом аккумуляция ТМ растениями, произрастающими на загрязненных почвах, в значительной степени зависит от содержания валовых и подвижных форм ТМ и биологических особенностей сельскохозяйственных культур [4]. Среди растений наибольшим накоплением ТМ характеризуются свекла, морковь, лук, кукуруза, наименьшим – капуста [5, 6].

Содержание ТМ в минеральных удобрениях определяется технологией производства и их концентрацией в исходном сырье. В зависимости от качества минерального сырья содержание ТМ в минеральных удобрениях может различаться в 10–1000 раз [3].

Наиболее загрязненными ТМ являются фосфорные удобрения. В состав фосфорных удобрений входят кадмий, медь, цинк, свинец, никель, хром, фтор. Содержание кадмия в австралийском суперфосфате составляет 38–42 мг/кг, в американских гравийных фосфатах – ≈13 мг/кг, в алжирских, марокканских и израильских – ≈25 мг/кг, в тунис-

ских и западноафриканских – до 50 мг/кг, в сенегальских – ≈70 мг/кг. Количество ТМ в фосфорных удобрениях, выпускаемых в нашей стране, меняется в широких пределах, составляя в среднем 3 мг/кг [7].

Исследователи разных стран установили, что в азотных удобрениях количество марганца не превышает 2, меди – 14, цинка – 50, свинца – 7, никеля – 8, кадмия – <0.25, железа – 25 мг/кг. В фосфорных удобрениях концентрация ТМ может достигать следующих уровней: марганца – 2940, меди – 1000, цинка – 3000, свинца – 92, никеля – 32, кадмия – 170, железа – 1650 мг/кг. Калийные удобрения в наибольшем количестве содержат марганец – 1440, медь – 300, цинк – 10, свинец – 90, никель – 19, кадмий – 4 и железо – 403 мг/кг [4, 5, 8–11].

Установленные величины средних концентраций ТМ в минеральных удобрениях, используемых в сельском хозяйстве РФ, составляют: в двойном суперфосфате Cu – 21.5, Pb – 15.2, Cd – 1.3 мг/кг; в карбамиде Cu – 14.6 мг/кг; в известняковой муке Cu – 6.3, Pb – 28.0, Cd – 0.18 мг/кг; в хлористом калии Cu – 12.7, Pb – 13.3, мг/кг [12]. В настоящее время приток кадмия и свинца в почву с удобрениями превышает их отток и наблюдают их дальнейшую аккумуляцию в пахотном горизонте сельскохозяйственных угодий западных стран [13].

Длительное применение удобрений в Российской Федерации вызывает достоверное накопление многих ТМ в почвах сельскохозяйственных угодий, степень их воздействия зависит от применяемых видов и форм удобрений [14]. Для некоторых культур применение удобрений на дерново-подзолистых почвах может приводить к возрастанию концентрации Ni, Cr и Cd до уровня выше ВМДУ даже в почвах с относительно низким и средним содержанием подвижных соединений, что обуславливает необходимость постоянного мониторинга безопасности продукции зерновых культур, особенно – при их несбалансированном питании.

Цель работы – изучение особенностей длительного накопления ТМ в почве и растениях при применении различных систем удобрения и их влияние на свойства почв, урожайность и качество продукции зерновых культур.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние различных агрохимических мероприятий на накопление ТМ в урожае зерновых культур изучили в условиях длительного полевого опыта в Тульской обл., который был заложен в

1983 г. на типичном для данной зоны глубоководном среднекультурном среднесуглинистом черноземе. Длительность опыта – 20 лет, севооборот – зерновой четырехпольный (яровая пшеница (*Triticum vulgare*)–овес (*Avena sativa*)–озимая пшеница (*Triticum aestivum*)–однолетние травы (овес + вика посевная), последовательно развернут во всех полях.

Влияние различных систем минерального удобрения на накопление ТМ в почве и растениях изучали в 5-ти блоках: 1 – контроль (без удобрений), 2 – варианты доз азотных удобрений от 0 до 150 кг/га на фоне внесения P60K60, 3 – варианты доз фосфорных удобрений от 0 до 120 кг/га на фоне внесения N90K60, 4 – варианты доз калийных удобрений от 0 до 150 кг/га на фоне внесения N90P60, 5 – применение минеральных удобрений и извести N90P60K60 + CaCO₃.

Агрохимические свойства почвы перед закладкой эксперимента характеризовались следующими показателями: гумус – 6.5%, содержание P₂O₅ (по Чирикову) – 131, K₂O (по Масловой) – 153 мг/кг, рН_{KCl} 5.3, H_r – 6.9, S – 32 мг-экв/100 г почвы.

Фосфорные и калийные удобрения вносили осенью под вспашку, азотные – перед посевом яровых и в весеннюю подкормку озимых культур в виде P_{сд}, K_x и N_{аа}. Известкование проводили в отдельных вариантах в начале каждой ротации из расчета 1 H_r. За период проведения эксперимента на 1 га посевной площади было внесено от 0 до 2900 кг NPK.

Отбор проб почв и растений на определение ТМ осуществляли согласно общепринятым методикам [15, 16]. Количественный анализ содержания ТМ в почвенных и растительных образцах проводили на двухканальном атомно-абсорбционном спектрометре “Hitachi-308” в пламенном варианте.

Общее количество вариантов в опыте – 17, повторность четырехкратная. Размер делянок составлял 240 м².

Обработку полученной информации и дисперсионный однофакторный анализ проводили с использованием методов математической статистики и компьютерных программных средств (STATISTICA 10.0).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования влияния минеральных удобрений и средств химизации на плодородие почв, продуктивность и качество урожая сельскохозяйственных культур, несмотря на мно-

голетнее изучение, являются неоднозначными. С одной стороны, наличие в удобрениях ТМ представляет собой потенциальную опасность загрязнения почв, растений и подземных вод, с другой, оптимизируя агрохимические свойства (поглотительную способность почв, содержание гумуса и элементов питания, а также их соотношение в почвенном растворе), они могут являться фактором детоксикации загрязненных ТМ почв. Вместе с тем ухудшение агрохимических свойств почв во всех случаях способствует существенному возрастанию подвижности ТМ в системе почва–растение и опасному их накоплению в сельскохозяйственной продукции. В связи с этим для комплексной оценки поведения ТМ в системе почва–растение необходим всесторонний учет всех факторов, оказывающих модифицирующее влияние на их накопление в урожае культур.

Установлено, что многолетнее систематическое применение различных доз минеральных удобрений или их полное отсутствие оказывало существенное влияние как на баланс, так и на основные агрохимические показатели выщелоченного чернозема. Наибольший отрицательный баланс элементов питания в почве отмечен в контрольных вариантах без внесения удобрений и при применении систем удобрения, несбалансированных по элементам питания и дозам минеральных удобрений, что приводило к ухудшению почвенного плодородия, изменению биологической подвижности ТМ и урожайности зерновых культур (табл. 1). При этом в большинстве вариантов отмечено подкисление почвенного раствора, в наибольшей степени – в вариантах с несбалансированным применением азотно-фосфорных и азотно-калийных удобрений (табл. 2). Вместе с тем внесение в почву известняковой муки способствовало нейтрализации кислотности и возрастанию величины pH_{KCl} почвы на 0.4 ед.

За время проведения исследования содержание обменного калия в почве контрольных вариантов без внесения удобрений и в вариантах с применением несбалансированных доз азотно-фосфорных удобрений снизилось соответственно на 20 и 16 мг/кг, в то время как внесение повышенных доз калийных удобрений (N90P60K150), наоборот, способствовало увеличению содержания калия в почве на 22 мг/кг.

Содержание P_2O_5 в пахотном слое почвы в вариантах с внесением возрастающих доз фосфора на НК-фоне различалось и было связано с балансом этих элементов в системе растение–удобрение. Кажущаяся нелогичной динамика повышения содержания подвижного фосфора в почве

Таблица 1. Суммарный баланс элементов питания за 20-летний период в системе растение–удобрение (средние 4-х полей), кг/га

Вариант	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Контроль	–1320	–576	–1310	–450
P60K60	–1390	+612	–131	–503
N60P60K60	–1130	+490	–297	–571
N90P60K60	–796	+418	–412	–607
N120P60K60	–583	+412	–486	–628
N150P60K60	–207	+418	–493	–637
N90K90	–774	–677	–435	–598
N90P30K60	–758	–43	–404	–591
N90P90K60	–829	+964	–467	–622
N90P60	–691	+460	–1446	–576
N90P60K30	–779	+428	–943	–587
N90P60K90	–827	+393	+103	–624
N90P120K60	–771	+269	–462	–598
N90P60K90 + CaCO ₃	–803	+430	–482	+5348
N90P60K150	–830	+365	+626	–631

при длительном отсутствии фосфорных удобрений или применении их незначительных доз, вероятно, была обусловлена повышением обеспеченности пахотного слоя почвы подвижным фосфором за счет трансформации малоподвижных форм органофосфатов гумуса в более подвижные соединения, проявляющееся обычно в почвах при экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур [17].

Изменение агрохимических характеристик почвы при длительном и систематическом внесении одних и тех же доз минеральных удобрений оказывало существенное влияние на урожайность зерновой продукции (табл. 3). В контрольных вариантах ухудшение агрохимических свойств почв привело к снижению в 1.3–1.7 раза урожайности зерна озимой и яровой пшеницы. В то же время для овса эти различия были менее значимыми.

В агроэкологических исследованиях для оценки подвижности ТМ в системе почва–растение используют различные показатели, в том числе коэффициенты накопления, соотносящие их концентрации в почве и урожае сельскохозяйственных культур [18, 19].

Согласно результатам исследования, наибольший коэффициент накопления (K_n) свинца отмечен в зерне пшеницы в вариантах с внесением удобрений в дозе N120P60K60, что составило 0.06, наименьший – при применении фосфорно-калийных удобрений (P60K60) – 0.04. Содержание Pb в зерне яровой пшеницы в большинстве

Таблица 2. Влияние систематического длительного применения удобрений на свойства почвы в разные годы исследования (средние в севообороте)

Вариант	pH _{KCl}			P ₂ O ₅ , мг/кг			K ₂ O, мг/кг		
	Годы исследования								
	1986	1998	2006	1986	1998	2006	1986	1998	2006
Контроль	5.2	5.0	4.9	119	93	132	151	142	131
P60K60	5.1	4.9	4.8	103	130	145	151	180	188
N60P60K60	5.1	4.9	4.8	124	131	144	147	182	185
N90P60K60	5.1	4.8	4.8	119	145	161	155	170	173
N120P60K60	5.0	4.9	4.7	112	143	156	152	165	161
N150P60K60	5.0	4.9	4.6	118	138	142	160	157	150
N90K90	5.1	4.9	4.6	93	82	120	155	182	188
N90P30K60	5.2	4.9	4.8	101	118	121	150	180	185
N90P90K60	5.0	4.9	4.8	146	163	168	150	180	185
N90P60	5.1	4.9	4.7	119	149	158	136	128	120
N90P60K30	5.1	4.9	4.8	124	144	147	146	149	141
N90P60K90	5.0	4.9	4.8	117	146	157	165	245	253
N90P120K60	—	4.9	4.8	—	126	140	—	163	168
N90P60K90 + CaCO ₃	—	5.4	5.6	—	136	152	—	190	194
N90P60K150	—	4.9	4.8	—	140	158	—	287	309

случаев не выходило за пределы допустимых норм, установленных СанПиН 2.3.2.1078-01 [20]. Однако в вариантах с внесением несбалансированно высоких доз азотных удобрений (N90K60, N150P60K60) накопление свинца в зерне достигало максимума (табл. 4).

Для кадмия наибольший K_n был характерен для вариантов с дозой удобрений N90K60 – 1.80. Наименьший K_n отмечен при внесении полного минерального удобрения N90P60K60 и извести – 0.90. При этом, несмотря на относительно небольшие концентрации Cd в почве, накопление его в зерне яровой пшеницы в большинстве случаев превышало нормы СанПиН 2.3.2.1078-01 в 1.2–1.8 раза.

Значительное накопление Cd в зерне яровой пшеницы по сравнению с Pb, вероятно, было связано с высокой подвижностью этого элемента в кислых почвах, в результате чего он легко транслировался в растения и накапливался в них в большом количестве. При этом длительное применение повышенных доз азотных и калийных удобрений (N90K60, N90P60, N150P60K60, N90P60K150) обусловило увеличение его накопления в зерне яровой пшеницы в 1.5–2.0 раза по сравнению с контролем. В то же время в вариантах с известкованием содержание Cd в зерне су-

щественно не отличалось от контрольных вариантов.

Повышенные дозы азотных и калийных удобрений не оказывали значимого влияния на накопление меди в зерне яровой пшеницы. Применение фосфорных удобрений в возрастающих дозах и известкование снижало содержание меди в растениях в 1.2–1.7 раза.

Выявленные закономерности поведения ТМ в полевых исследованиях, вероятно, определялись тем фактом, что длительное применение физиологически кислых азотных и калийных удобрений способствовало подкислению почвенного раствора, что приводило к изменению химизма поведения ТМ в почве, их мобилизации и увеличению размеров накопления в растениях. Тем не менее, известь и фосфорные удобрения обогащали почву кальцием и фосфором, что способствовало образованию труднорастворимых соединений ТМ в почве, снижению их миграционной подвижности и уменьшению накопления в урожае зерновых культур.

Установлено, что применение минеральных удобрений за 20-летний период полевых исследований с учетом среднего содержания в них ТМ способствовало дополнительному внесению As, Pb и Cu соответственно в количестве 24.1–199, 5.7–22.8 и 104–457 г/га. Однако, принимая во

Таблица 3. Динамика урожайности зерновых культур в разные годы исследования, т/га

Вариант	Озимая пшеница			Овес			Яровая пшеница		
	Годы исследования								
	1986	1998	2006	1986	1998	2006	1986	1998	2006
Контроль	4.26	2.80	2.52	2.64	3.49	2.73	2.90	2.36	2.23
P60K60	4.21	2.80	2.90	2.74	3.52	3.03	3.16	2.70	2.37
N60P60K60	5.24	4.35	3.77	3.08	4.77	3.13	3.72	4.37	3.23
N90P60K60	5.89	4.89	4.20	3.40	4.61	3.35	4.14	5.06	3.64
N120P60K60	5.89	4.75	4.95	3.49	4.42	4.53	4.48	5.28	4.21
N150P60K60	6.09	4.68	5.37	3.54	4.08	3.75	4.53	5.07	4.42
N90K90	5.58	4.70	4.20	3.46	4.53	3.24	4.20	4.89	3.17
N90P30K60	5.92	4.81	4.35	3.56	4.55	3.35	4.23	4.83	3.34
N90P90K60	6.03	4.63	4.85	3.51	4.53	3.53	4.24	4.85	3.62
N90P60	5.57	4.33	3.90	3.47	4.29	3.21	3.96	4.60	3.05
N90P60K30	5.84	4.86	4.10	3.53	4.54	3.45	4.04	4.82	3.36
N90P60K90	5.93	4.98	4.75	3.56	4.70	3.64	4.22	5.13	3.56
N90P120K60	5.72	5.01	4.73	—	4.71	3.48	—	4.75	3.73
N90P60K90 + + CaCO ₃	5.72	4.78	4.68	—	4.62	3.55	—	4.48	3.95
N90P60K150	6.14	4.92	4.59	—	4.80	3.74	—	4.84	4.13
<i>HCP</i> ₀₅ , т/га	0.38–0.48	0.30–0.38	0.31–0.39	0.15–0.34	0.18–0.30	0.23–0.35	0.21–0.34	0.21–0.36	0.25–0.42

внимание, что масса пахотного слоя равна ≈ 3 млн. кг, то дополнительное увеличение концентрации Pb, Cd и Cu в почве составило без учета выноса урожаем 0.008–0.070, 0.002–0.008 и 0.035–0.152 мг/кг соответственно. При этом варианты с внесением повышенных доз удобрений существенно не отличались по содержанию ТМ в почве от контроля без внесения удобрений и во всех случаях были отнесены к 1-й группе суглинистых и глинистых почв с pH < 5.5 ед., и концентрацией ≤ 0.5 ПДК.

Таким образом, при принятой системе удобрения под зерновые культуры для увеличения содержания в почве Cd на 0.1 мг/кг необходимо 250 лет, Pb и Cu на 1 мг/кг – ≥ 285 и 132 лет соответственно. В то же время следует отметить, что в США при использовании низкокачественных фосфорных удобрений в обычных дозах при содержании в них кадмия 100 мг/кг в почве в год поступает 2–13, а в почве Западной Европы – 1.6–9.4 г Cd/га [21], что сопоставимо с накоплением кадмия в почвах России при применении отечественных удобрений в течение 20 лет.

ВЫВОДЫ

1. Многолетнее внесение различных доз минеральных удобрений с учетом среднего содержа-

ния в них ТМ способствовало дополнительному увеличению содержания в почве Pb на 0.008–0.070, Cd – на 0.002–0.008 и Cu – на 0.035–0.152 мг/кг почвы. При принятой системе удобрения под зерновые культуры для увеличения содержания в почве Cd на 0.1 мг/кг необходимо 250 лет, Pb и Cu – соответственно 285 и 132 года.

2. Многолетнее систематическое применение различных доз минеральных удобрений или их полное отсутствие оказало существенное влияние на баланс элементов питания в почве и агрохимические показатели выщелоченного чернозема. Наибольший отрицательный баланс элементов питания в почве отмечен в контрольных вариантах без внесения удобрений и при применении несбалансированных по количеству элементов питания минеральных удобрений, что приводило к ухудшению свойств почв и снижению в 1.3–1.7 раза урожайности зерновых культур.

3. Несбалансированное применение высоких доз азотных и калийных удобрений обусловило увеличение подвижности ТМ в системе почва-растение. При этом, несмотря на относительно невысокие концентрации Cd в почве, накопление его в зерне яровой пшеницы в этих вариантах превышало нормы СанПиН 2.3.2.1078-01 в 1.1–1.8 раза, содержание Pb достигало предельно допу-

Таблица 4. Влияние систем удобрения на накопление тяжелых металлов в зерне яровой пшеницы

Вариант	Pb		Cd		Cu	
	мг/кг	K_n	мг/кг	K_n	мг/кг	K_n
Контроль	0.35 ± 0.06	0.036	0.09 ± 0.01	1.12	5.75 ± 0.17	0.34
P60K60	0.33 ± 0.07	0.038	0.10 ± 0.02	1.11	5.64 ± 0.01	0.33
N60P60K60	0.42 ± 0.06	0.042	0.12 ± 0.01	1.33	5.13 ± 0.19	0.30
N90P60K60	0.45 ± 0.07	0.056	0.11 ± 0.01	1.22	5.84 ± 0.10	0.34
N120P60K60	0.48 ± 0.06	0.064	0.14 ± 0.01	1.56	4.75 ± 0.20	0.29
N150P60K60	0.54 ± 0.06	0.052	0.15 ± 0.01	1.40	5.28 ± 0.20	0.33
N90K60	0.56 ± 0.22	0.057	0.18 ± 0.04	1.80	5.37 ± 0.23	0.32
N90P30K60	0.45 ± 0.17	0.049	0.14 ± 0.02	1.27	4.16 ± 0.21	0.26
N90P90K60	0.33 ± 0.18	0.040	0.14 ± 0.02	1.40	4.41 ± 0.17	0.28
N90P120K60	0.38 ± 0.14	0.042	0.12 ± 0.02	1.10	3.65 ± 0.19	0.22
N90P60	0.39 ± 0.05	0.042	0.14 ± 0.03	1.40	4.04 ± 0.17	0.29
N90P60K30	0.36 ± 0.04	0.042	0.10 ± 0.01	0.97	5.37 ± 0.22	0.34
N90P60K60	0.44 ± 0.03	0.055	0.13 ± 0.02	1.18	4.93 ± 0.19	0.28
N90P60K90	0.47 ± 0.04	0.055	0.12 ± 0.01	1.20	5.06 ± 0.30	0.33
N90P60K150	0.46 ± 0.02	0.060	0.15 ± 0.01	1.50	4.53 ± 0.25	0.30
N90P60K60 + CaCO ₃	0.33 ± 0.03	0.037	0.09 ± 0.01	0.90	3.47 ± 0.29	0.20
HCP ₀₅	0.17	0.019	0.05	0.22	0.64	0.05
СанПин 2.3.2.1078-01		0.5		0.1		—

стимых величин. В то же время фосфорные удобрения в возрастающих дозах и известкование снижали содержание Cu в растениях в 1.2–1.7 раза. Максимальным накоплением в урожае зерновых культур характеризовался кадмий, наименьшим – свинец.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедевский И.А., Явовлева Е.А. Минеральные удобрения как фактор трансформации тяжелых металлов в системе почва–растения на примере чернозема выщелоченного кубани // Научн. журн. КубГАУ. 2012. № 77(03).
2. Говорина В.В., Виноградова С.Б. Минеральные удобрения и загрязнение почв тяжелыми металлами // Химизация сел. хоз-ва. 1991. № 3. С. 87–90.
3. Басманов А.Е., Кузнецов А.В. Экологическое нормирование применения удобрений в современном земледелии // Вестн. сел.-хоз. науки. 1990. № 8. С. 88–95.
4. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение: Монография. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
5. Дричко В.Ф. Миграция химических элементов в биосфере и эколого-санитарные проблемы применения удобрений. Л.: ЛСХИ, 1990. 31 с.
6. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году”. М.: Минприроды РФ, НИА-Природа, 2017. 760 с.
7. Попова Л.А. Влияние минеральных и органических удобрений на состояние тяжелых металлов в почвах // Агрехимия. 1991. № 3. С. 62–69.
8. Nacke H., Gonçalves Jr. A.C., Schwantes D., Nava I.A., Strey L., Coelho G.F. Availability of heavy metals (cd, pb, and cr) in agriculture from commercial fertilizers // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2013. Т. 64. № 4. P. 537–544.
9. Gupta D.K., Walther C., Chatterjee S., Datta S., Veer V. Role of phosphate fertilizers in heavy metal uptake and detoxification of toxic metals // Chemosphere. 2014. V. 108. P. 134–144.
10. Gurin A.G., Basov U.V., Gneusheva V.V. Comparative assessment of heavy metals accumulation in grey forest soil with mineral fertilizers and waste products of sugar production // Rus. J. Agricult. Socio-Econom. Sci. 2017. № 3(63). P. 154–159.
11. Dodangeh H., Rahimi G., Fallah M., Ebrahimi E. Investigation of heavy metal uptake by three types of ornamental plants as affected by application of organic and chemical fertilizers in contaminated soils // Environ. Earth Sci. 2018. V. 77. № 12. 473 p.
12. Овчаренко М.М. Тяжелые металлы в системе почва–растение–удобрения. М., 1997. 290 с.
13. Williams C.H., David D.J. The accumulation in soil of cadmium residues from phosphate fertilizers and their effect on the cadmium content of plants // Soil Sci. 1976. № 121. P. 86–93

14. Карпова Е.А., Минеев В.Г. Тяжелые металлы в агро-экосистеме. М.: Изд-во КДУ, 2015. 252 с.
15. Методические указания по обследованию почв сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства на содержание тяжелых металлов, остаточных количеств пестицидов и радионуклидов. М.: ЦИНАО, 1995. 45 с.
16. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: Росинформагротех, 2003. 240 с.
17. Бровкин В.И. Динамика подвижного фосфора в пахотном слое выщелоченного чернозема // Бюл. ВИУА. 1990. № 102. С. 27–31.
18. Минкина Т.М., Бурачешский М.В., Чаплыгин В.А. Накопление тяжелых металлов в системе почва–растение в условиях загрязнения // Научн. журн. Рос. НИИ пробл. мелиорат. 2011. № 4(04).
19. Пархоменко Н.А. Агроэкологическая оценка действия тяжелых металлов в системе почва–растение: Дис. ... канд. сел.-хоз. наук. Омск, 2004. 237 с.
20. СанПиН 2.3.2.1078-01 Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов. Санитарные правила и нормы. М.: Госкомсанэпиднадзор России, 2002. 17 с.
21. Beaufays J.M., Nangniot P. Etude comparative du dosage du Cd dans les eaux, les engrais et les plantes—par polarographie impulsionnelle différentielle et spectrométrie et absorption atomique // Analysis. 1976. V. 4. P. 193–199.

Accumulation of Heavy Metals in Crop Yields during Long-Term Use of Mineral Fertilizers

D. N. Kurbakov^{a,#}, V. K. Kuznetsov^a, M. S. Khlopuk^b, and H. V. Sidorova^a

^a Russian Institute of Radiology and Agroecology
Kievskoye shosse 109 km, Kaluga region, Obninsk 249032, Russia

^b Tula Scientific Research Institute of Agriculture – Branch of FIC “Nemchinovka”
ul. Sadovaya 7, Tula region, Plavsky district, pos. Dairy Yards 301493, Russia

[#]E-mail: kurbakov007@gmail.com

In a long-term study, the effect of long-term use of various doses of mineral fertilizers on the accumulation of heavy metals in the harvest of grain crops, agrochemical properties of soils and the yield of grain crops was studied. The greatest negative balance of nutrients in the soil was noted in the control variants without fertilization and with the use of mineral fertilizers unbalanced in terms of the number of nutrients, which led to a deterioration in soil properties, a 1.3–1.7-fold decrease in the yield of grain crops and exceeding the maximum permissible Cd content in spring wheat grain. At the same time, phosphorus fertilizers and liming reduced the content of Cu and Pb in grain by 1.2–1.7, Pb – by 1.5 times. The maximum accumulation in the harvest of grain crops was characterized by cadmium, the least – lead.

Key words: agricultural ecosystems, heavy metals, mineral fertilizers, grain crops.