

УДК 631.416

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА СОДЕРЖАНИЕ КАДМИЯ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПАХОТНОЙ ПОЧВЕ

Чеглакова Оксана Александровна
младший научный сотрудник
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3227-6274>
E-mail: 4eglacova@gmail.com

Шихова Людмила Николаевна
ведущий научный сотрудник,
доктор сельскохозяйственных наук,
<https://orcid.org/0000-0001-7371-7588>
E-mail: shikhova-l@mail.ru
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого», Россия,
610007, Киров, ул. Ленина, д. 166а

Представлены результаты изучения длительного внесения удобрений на содержание кислоторастворимого кадмия в дерново-подзолистой среднесуллинистой почве. Исследование проведено в 2016-2018 гг. на полях длительного стационарного опыта географической сети опытов с удобрениями международного проекта «EuroSOMNET». Опыт заложен в 1972 году. Поля находятся в севообороте по годам с чередованием культур. Выбраны варианты с внесением следующих доз NPK: 30, 60, 90, 120 и 150 кг/га д.в. (действующего вещества). Пробы почвы отбирали 4 раза в течение вегетационного сезона в шестикратной повторности. Содержание кислоторастворимых соединений кадмия определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Исследуемая почва содержит незначительное количество кислоторастворимого кадмия – 0,06...0,87 мг/кг почвы, что ниже ПДК. При длительном внесении возрастающих доз минеральных удобрений отмечено постепенное накопление кадмия в почве, особенно при высоких дозах удобрений (на 7–50 % к контролю). В течение вегетационных сезонов содержание кислоторастворимых соединений кадмия существенно варьирует, увеличение содержания отмечено в первой половине и в конце вегетационного сезона. В середине сезона содержание кислоторастворимых соединений кадмия снижается. На содержание кадмия влияют обменная кислотность ($r = -0,89; -0,85$, при $P > 0,95$ в 2016 и 2017 гг. соответственно) и содержание общего органического углерода в почве ($r = 0,93; 0,75$, при $P > 0,95$). В зависимости от года исследований доля влияния изучаемых факторов меняется, что связано с комплексным действием

UDC 631.416

4.1.3. Agrochemistry, agro-soil science, plant protection and quarantine

EFFECT OF LONG-TERM APPLICATION OF MINERAL FERTILIZERS ON CADMIUM CONTENT IN SOD-PODZOLIC ARABLE SOIL

Cheglakova Oxana Aleksandrovna
Junior Researcher
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3227-6274>
E-mail: 4eglacova@gmail.com

Shikhova Lyudmila Nikolaevna
Leading Researcher, Doctor of Agricultural Sciences,
<https://orcid.org/0000-0001-7371-7588>
E-mail: shikhova-l@mail.ru

Rudnitsky Federal Agricultural Research Center of the North-East, 166a Lenina, Kirov, 610007, Russia

The results of the study of long-term application of fertilizers on the content of acid-soluble cadmium in sod-podzolic medium-loamy soil are presented. The study was carried out in 2016-2018 on the fields of a long stationary experiment of a geographical network of experiments with fertilizers of the international project "EuroSOMNET". The Experiment was laid in 1972. The fields are in crop rotation by year. The following NPK doses were selected: 30, 60, 90, 120 and 150 kg/ha of active matter. Soil samples were taken 4 times during the growing season in sixfold repetition. The content of acid-soluble cadmium compounds was determined by atomic absorption spectrometry. The studied soil contains a small amount of acid-soluble cadmium - 0.06... 0.87 mg/kg of soil, which is below the MPC. With prolonged application of increasing doses of mineral fertilizers, a gradual accumulation of cadmium in the soil was noted, especially with high doses of fertilizers (by 7-50% to control). During the growing seasons, the content of acid-soluble cadmium compounds varies significantly; an increase in the content was noted in the first half and at the end of the growing season. In the middle of the season, the content of acid-soluble cadmium compounds decreases. The cadmium content is influenced by the exchangeable acidity ($r = -0.89; -0.85$, with $P > 0.95$ in 2016 and 2017, respectively) and the content of total organic carbon in the soil ($r = 0.93; 0.75$, at $P > 0.95$). Depending on the year of research, the share of the influence of the studied factors varies, which is associated with the complex effect of different soil and weather conditions. The "fertilizer dose" factor significantly affects the cadmium content in 2016 and 2017 and does not affect in 2018. The change in the content of the element during the season is significant in 2017 and 2018 but

многих почвенных и погодных условий. Фактор «доза удобрений» значимо влияет на содержание кадмия в 2016 и 2017 гг. и не влияет в 2018. Изменение содержания элемента в течение сезона достоверно в 2017 и 2018 гг. и отсутствует в 2016 г.

not in 2016

Ключевые слова: ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТАЯ ПОЧВА, ДИНАМИКА, КАДМИЙ, КИСЛОТОРАСТВОРИМЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, МИНЕРАЛЬНЫЕ УДОБРЕНИЯ, РАЗНЫЕ ДОЗЫ

Keywords: SOD-PODZOLIC SOIL, DYNAMICS, CADMIUM, ACID-SOLUBLE COMPOUNDS, MINERAL FERTILIZERS, DIFFERENT DOSES

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-217-026>

Кадмий входит в число наиболее токсичных тяжелых металлов (ТМ). Для него характерна высокая мобильность в природных средах, активная передача по пищевым цепям. Высокое содержание элемента в почвах напрямую связано с деятельностью человека [1]. Основным источником кадмия в почве наследуется от почвообразующих пород. Фоновое содержание Cd в почвах мира составляет от 0,01 до 0,2 мг/кг почвы [2]. К источникам техногенного загрязнения окружающей среды этим элементом относят металлургические предприятия, электростанции, автотранспорт, минеральные удобрения и др. В сельском хозяйстве основным источником загрязнения считаются минеральные удобрения, где ТМ присутствуют в виде естественных примесей и их количество зависит от сырья и метода производства [3]. Наибольшее содержание кадмия характерно, как правило, для фосфорных удобрений. По литературным данным двойной суперфосфат содержит от 50 до 170 мг/кг [4]. Удобрения могут, как снижать подвижность металла в результате специфической сорбции на поверхности оксидов и гидроксидов железа и алюминия, так и приводить к увеличению подвижности металла за счет подкисления почвы и перехода в растворимое состояние железа и алюминия [5].

По исследованиям в разных горизонтах дерново-подзолистых и подзолистых суглинистых почв Кировской области содержание валового кадмия колеблется от 0,66 до 1,11 мг/кг [6].

<http://ej.kubagro.ru/2026/03/pdf/26.pdf>

Валовое содержание элемента показывает общую загрязненность, а реальную опасность для окружающей среды и человека показывает подвижная форма (кислоторастворимая). Угрозу загрязнения почвы кадмием можно оценить, сравнив содержание элемента в почве с ПДК (предельно допустимая концентрация). Особенно важно учитывать содержание кислоторастворимых соединений кадмия, так как они являются актуальным запасом подвижных соединений. При подкислении почвенного раствора кислоторастворимые формы кадмия переходят в подвижные и тем самым повышают доступность элемента для растений [7]. Часть их при взаимодействии с органическими веществами становится более устойчива к вымыванию и накапливается в почвенном слое [8].

Длительное применение минеральных удобрений положительно влияет на агрохимическую характеристику почвы. В опытах одних авторов увеличивается содержание органического вещества в почве (на 30-40%), повышается содержание подвижного фосфора, обменного калия, и не приводит к накоплению содержания кадмия [9, 10], из других источников [11] применение минеральных удобрений способствует накоплению ТМ.

Цель исследования: оценить влияние длительного применения возрастающих доз минеральных удобрений на содержание и динамику содержания кислоторастворимого кадмия в пахотном горизонте дерново-подзолистой суглинистой почвы.

Условия, материалы и методы. Объектом исследования является пахотный горизонт дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы, сформированной на элюво-делювии пермских отложений. Водное питание смешанное, режим увлажнения промывной. Содержание общего углерода гумуса (по Тюрину) 1,07 – 1,57%, $pH_{\text{сол.}}$ (метод ЦИНАО) – 4,18 – 5,0.

Исследования проводили на опытном поле ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока в условиях длительного стационарного опыта географической

сети опытов с удобрениями и другими агрохимическими средствами в международном проекте «EuroSOMNET. Опыт заложен в 1972. Поля находятся в зерно-паро-травяном севообороте, с чередованием культур. Схема опыта состоит из 54 вариантов в 2-кратной повторности. Для изучения динамики содержания кислоторастворимых форм Cd были выбраны варианты с внесением следующих доз NPK: 30, 60, 90, 120 и 150 кг/га д.в. (действующего вещества).

В опыте ежегодно использовали следующие минеральные удобрения: аммиачная селитра, суперфосфат двойной гранулированный и хлористый калий. Минеральные удобрения вносили вручную под предпосевную культивацию. Удобрения вносятся под зерновые культуры, под клевер не вносят.

Отбор проб осуществляли в шестикратной повторности из пахотного слоя 0–20 см (ГОСТ 17.3.01-83) раз в месяц с мая по август в 2016–2018 гг. Кадмий экстрагировали 1 М азотной кислотой (РД 52.18.289-90). Определение содержания кислоторастворимого кадмия проведено на атомно-абсорбционном спектрофотометре АА-6800. Математическая обработка результатов проведена методом дисперсионного анализа с использованием пакета программ Microsoft Excel 2003 и AGROS 2.07. Достоверность сезонной динамики элемента оценивалась с использованием критерия Дункана.

Результаты и обсуждение. Известно, что кислоторастворимые соединения кадмия в почве могут составлять до 100% от валового количества [12, 13]. Поэтому возможно сравнивать содержание кислоторастворимого кадмия с ПДК его валового содержания. В течение трёх лет наблюдения содержание кислоторастворимого Cd в почве варьировало от 0,06 до 0,87 мг/кг почвы в разных вариантах. Это существенно ниже значений ПДК для валового содержания элемента в дерново-подзолистых почвах и близко к значениям, приводимым в

литературе для дерново-подзолистых и подзолистых почв Кировской области – 0,66-1,11 мг/кг [6].

Содержание кадмия в почве различается в вегетационные периоды разных лет исследования. В вегетационный период 2016 года оно меняется от 0,06 до 0,15 мг/кг почвы, в 2017 году – от 0,58 до 0,87 мг/кг, в 2018 году от 0,09 до 0,18 мг/кг (табл. 1).

Таблица 1 – Содержание кислоторастворимых соединений кадмия по вариантам опыта в течение вегетационного сезона, мг/кг

Вариант	май	июнь	июль	август	Среднее
2016 год					
N0P0K0	0,08±0,01	0,11±0,01	0,06±0,02	0,09±0,01	0,08a
N30P30K30	0,11±0,02	0,13±0,01	0,08±0,01	0,10±0,02	0,10bc
N60P60K60	0,08±0,01	0,09±0,01	0,10±0,02	0,08±0,01	0,09a
N90P90K90	0,11±0,02	0,11±0,01	0,10±0,01	0,06±0,01	0,09ab
N120P120K120	0,10±0,02	0,10±0,02	0,08±0,01	0,13±0,01	0,10abc
N150P150K150	0,12±0,01	0,10±0,01	0,10±0,01	0,15±0,02	0,12c
Среднее	0,10	0,11	0,09	0,10	
2017 год					
N0P0K0	0,67±0,02	0,61±0,06	0,66±0,03	0,58±0,05	0,63a
N30P30K30	0,78±0,07	0,66±0,06	0,60±0,04	0,87±0,05	0,73b
N60P60K60	0,68±0,05	0,67±0,05	0,70±0,05	0,72±0,08	0,69b
N90P90K90	0,72±0,05	0,62±0,04	0,62±0,03	0,82±0,07	0,69b
N120P120K120	0,66±0,04	0,62±0,03	0,65±0,02	0,84±0,07	0,69b
N150P150K150	0,81±0,07	0,72±0,04	0,66±0,02	0,81±0,07	0,75b
Среднее	0,72b	0,65a	0,65ab	0,77c	
2018 год					
N0P0K0	0,18±0,05	0,10±0,02	0,09±0,02	0,13±0,03	0,13a
N30P30K30	0,12±0,03	0,15±0,02	0,16±0,02	0,11±0,04	0,13a
N60P60K60	0,15±0,05	0,13±0,02	0,10±0,02	0,16±0,01	0,14a
N90P90K90	0,17±0,04	0,17±0,03	0,10±0,02	0,16±0,05	0,15a
N120P120K120	0,17±0,02	0,15±0,02	0,10±0,01	0,15±0,03	0,14a
N150P150K150	0,14±0,01	0,14±0,02	0,12±0,02	0,15±0,02	0,14a
Среднее	0,15c	0,14abc	0,11ab	0,14bc	

*- варианты, сопровождаемые одинаковыми латинскими буквами, различаются незначимо по критерию Дункана

Содержание элемента 2016 и 2018 гг. находится примерно на одном уровне, а в 2017 году было в несколько раз выше. Вероятно, основная причина такого различия в содержании элемента по годам связана с

погодными и гидротермическими условиями. Годы исследований характеризовались контрастными погодными условиями: 2016 и 2018 гг. – теплые и относительно сухие, 2017 г - прохладный и очень влажный. Низкая влажность и высокая температура в течение вегетационных сезонов 2016 и 2018 г способствовали сохранению Cd в более прочных соединениях, не разрушаемых кислотными экстрагентами. Известно, что важную роль в накоплении кадмия играют комплексы вторичных минералов с органическим веществом и гидроокислами Fe и Al [14]. Минералогический состав элюво-делювия пермских пород, на котором сформированы почвы, характеризуется присутствием значительного количества соединений трёхвалентного железа и марганца, в связи с которым находится большое количество ТМ. По результатам исследований некоторых авторов содержание кислоторастворимого железа в почве опыта составляет от 1180 до 2860 мг/кг [15]. Вероятно, чрезмерное увлажнение почвы в вегетационный период 2017 года привело к расшатыванию кристаллических решеток глинистых минералов и повышению доступности Cd, связанного с оксидами железа и марганца. При переувлажнении и недостатке кислорода часть этих соединений становится более доступной для воздействия кислот, что приводит к повышению содержания кислоторастворимых фракций ТМ, в частности кадмия.

Влияние на содержание элемента, очевидно, оказывают и другие факторы, выступающие в комплексе с погодными – содержание и динамика органического вещества, кислотность, деятельность почвенной биоты, поглощение элементов растениями и др. [16]. Важнейшим фактором, определяющим уровень содержания ТМ в почве, является её кислотность. Чем выше обменная кислотность (ниже pH_{KCl}), тем выше содержание кислоторастворимых фракций ТМ [17]. Влияние кислотности (pH_{KCl}) на содержание кадмия подтверждает достоверная значимая корреляционная связь между ними в 2016 и 2017 гг. ($r = -0,89; -0,85$, при $P > 0,95$).

Известно, что кадмий активно сорбируется гумусом [18]. В исследуемой почве содержание кадмия достоверно зависело от содержания общего углерода гумуса в 2016 и 2017 гг. ($r = 0,93; 0,75$, при $P > 0,95$).

В разные годы исследуемые факторы в разной степени влияют на содержание кислоторастворимого Cd. Дисперсионный анализ свидетельствует о достоверном возрастании содержания элемента при увеличении дозы удобрений в 2016 и 2017 гг. и отсутствии влияния в 2018г (табл. 1).

Усреднение значений содержания за весь вегетационный период наблюдения по каждому году свидетельствует о постепенном накоплении элемента в вариантах с удобрениями по сравнению с контрольным вариантом, особенно в вариантах с высокими дозами (табл. 2). По сравнению с контрольным вариантом, содержание кислоторастворимого Cd в вариантах с удобрениями в разные годы наблюдения увеличивается на 7-50%.

Таблица 2 – Изменение содержания кислоторастворимого Cd в почве при внесении возрастающих доз удобрений (средние значения за сезон)

Вариант	Год исследования					
	2016 г	% *	2017 г	% *	2018 г	% *
N0P0K0	0,08±0,01	100	0,63±0,03	100	0,13±0,02	100
N30P30K30	0,10±0,01	125,0	0,73±0,07	115,9	0,13±0,01	100,0
N60P60K60	0,09±0,01	112,5	0,69±0,01	109,5	0,14±0,02	107,7
N90P90K90	0,09±0,01	112,5	0,69±0,06	109,5	0,15±0,02	115,4
N120P120K120	0,10±0,01	125,0	0,69±0,06	109,5	0,14±0,02	107,7
N150P150K150	0,12±0,01	150,0	0,75±0,04	119,0	0,14±0,01	107,7

%* - в процентах к контролю

В целом для всех вариантов с дозами удобрений отмечено низкое содержание элемента.

Почвы гумидной зоны испытывают в течение года значительные колебания погодных факторов, что приводит к сезонным изменениям почвенных свойств и режимов. В результате этих изменений, а также деятельности человека, содержание ТМ и их подвижность существенно варьируют в течение вегетационного сезона.

Варьирование содержания кислоторастворимого кадмия в течение вегетационного сезона отмечено во все годы исследования. Однако в 2016 году эти изменения незначимы (табл. 1).

Более высокое содержание и достоверное изменение содержания кислоторастворимых соединений элемента отмечено в 2017 году. Наблюдалось снижение содержания элемента в середине периода во всех вариантах. Максимальное содержание во всех вариантах (кроме контроля) отмечено в конце исследуемого периода (август).

В вегетационный период 2018 года незначительное снижение содержания элемента отмечается практически на всех дозах в середине сезона (июль).

Усреднение данных по всем вариантам в течение сезона позволяет выявить общие закономерности и более чёткий характер динамики содержания элемента (рис. 1).

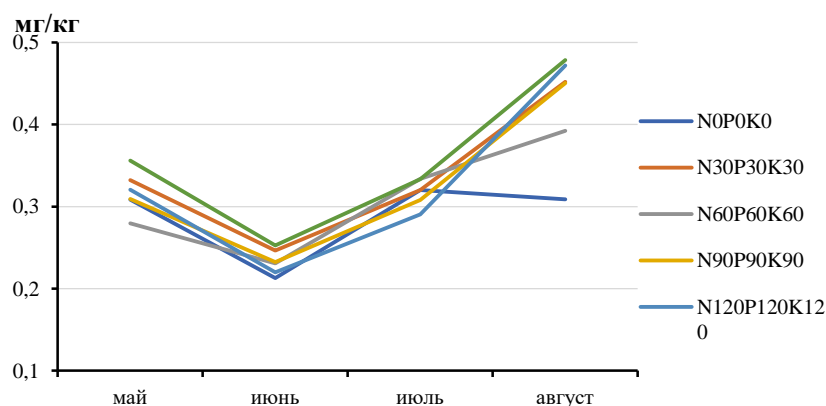


Рисунок 1 – Изменение содержания кислоторастворимых соединений кадмия в течение вегетационного периода (средние значения за 3 года)

Относительно повышенные содержания элемента отмечаются в самом начале и в конце вегетационного периода, что вероятно связано с более высокой увлажнённой почвой в это время и с меньшей прочностью почвенных минералов, в составе которых находится кадмий. Минимум содержания характерен для середины сезона (июнь, июль). Как правило, это самые сухие месяцы и кадмий находится в почве в более прочных соединениях. Вероятно, нельзя не учитывать и пассивное поглощение элемента растениями в этот период их наиболее активного роста и накопления биомассы.

Трёхфакторный дисперсионный анализ («доза удобрений», «год», «период сезона») показал, что за время исследования наибольшее влияние на содержание кислоторастворимого кадмия оказал фактор «год», то есть сочетание гидротермических и погодных условий разных лет исследования (табл. 3).

Таблица 3 – Трёхфакторный дисперсионный анализ («доза удобрений», «год», «период сезона»)

Источник	SS	df	ms	F	НСР
Общее	16.912	215	-	-	-
Блоки	0.060	2	0.030	36.920*	-
Фактор А (доза удобрений)	0.062	5	0.012	15.423*	0.013
Фактор В (год)	16.182	2	8.091	10021.229*	0.009
Фактор С (период сезона)	0.106	3	0.035	43.895*	0.011
Взаимосвязь АВ	0.051	10	0.005	6.356*	0.023
Взаимосвязь АС	0.051	15	0.003	4.237*	0.026
Взаимосвязь ВС	0.111	6	0.019	22.931*	0.019
Взаимосвязь АВС	0.174	30	0.006	7.167*	0.046
Остаточное	0.115	142	0.001	-	-

В зависимости от конкретных условий года исследования влияние факторов «доза удобрений» и «период сезона» может варьировать, однако, в многолетних исследованиях их доля влияния остаётся ниже.

Выводы. Многолетнее внесение минеральных удобрений не привело к значительному накоплению кадмия в дерново-подзолистой суглинистой пахотной почве. Содержание кислоторастворимого кадмия в период исследования составило 0,06...0,87 мг/кг почвы в зависимости от варианта, что ниже ПДК. При длительном внесении возрастающих доз минеральных удобрений отмечено постепенное увеличение содержания кадмия в почве, особенно при высоких дозах удобрений (на 7–50 % к контролю). В течение вегетационных сезонов содержание кислоторастворимых соединений кадмия существенно варьирует, увеличение содержания отмечено в первой половине и в конце вегетационного сезона. В середине сезона содержание кислоторастворимых соединений кадмия снижается. На содержание кадмия влияют обменная кислотность ($r = -0,89; -0,85$, при $P > 0,95$ в 2016 и 2017 гг. соответственно) и содержание общего органического углерода в почве ($r = 0,93; 0,75$, при $P > 0,95$). В многолетних исследованиях наибольшее влияние на содержание элемента оказывает фактор «год», то есть сочетание гидротермических и погодных условий каждого года. В зависимости от года исследований доля влияния изучаемых факторов меняется, что связано с комплексным действием многих почвенных и погодных условий. Фактор «доза удобрений» значимо влияет на содержание кадмия в 2016 и 2017 гг. и не влияет в 2018. Изменение содержания элемента в течение сезона достоверно в 2017 и 2018 гг. и отсутствует в 2016 г.

Список литературы

1. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я. Промышленные свинокомплексы как источники загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2021. №5. С. 88–91.
2. Погодин С. А., Кадмий // Краткая химическая энциклопедия, т. 2. М.: Изд-во: Большая советская энциклопедия. 1963. – 543 с.
3. Saloni Sachdeva, Abhiruchi Varshney, Harish Chandra Barman, Mike A. Powell, Prafulla Kumar Sahoo. Potentially toxic elements in different inorganic and organic fertilizers: A comprehensive review on global perspective and fertilizer-wise differences.

Applied Soil Ecology. Volume 209. 2025. 105996.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105996>.

4. Погорелов А. В. и др. Тяжелые металлы в окружающей среде и их влияние на сельскохозяйственные растения // Рисоводство. 2021. № 4 (53). – С. 54-61. DOI [10.33775/1684-2464-2021-53-4-54-61](https://doi.org/10.33775/1684-2464-2021-53-4-54-61).

5. Макаров М.И. Фосфор органического вещества почв. МГУ им. М. В. Ломоносова. М., 2009. 397 с.

6. Шихова Л.Н., Лисицын Е.М. Содержание подвижного и валового кадмия в кислых дерново-подзолистых почвах // Агроэкологический вестник. Вып. 7. Воронеж, 2016. С. 234-239.

7. Lukin, S.V., Zhuikov N.V. Content and Balance of Trace Elements (Co, Mn, Zn) in Agroecosystems of the Central Chernozemic Region of Russia Agriculture, 2022. 12 (2). – 154 с. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020154>.

8. Воробьев В.Б. О взаимосвязи между содержанием тяжелых металлов и гумуса в дерновоподзолистой легкосуглинистой почве // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 4. С. 103–107.

9. Чуйков В. А., Тебердиев Д. М., Родионова А. В., Запивалов С. А. Влияние длительного применения минеральных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы сенокосного угодья // Адаптивное кормопроизводство. 2021. № 3. С. 49–59. DOI: <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2021-3-49-59> (дата обращения 26.12.2025).

10. Завьялова, Н. Е. Влияние минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы, содержание основных элементов питания и тяжелых металлов в озимой ржи // Агрохимия. 2021. № 4. С. 49-56. DOI [10.31857/S0002188121040153](https://doi.org/10.31857/S0002188121040153). – EDN KUBCNQ.

11. Теучеж, А. А. ПЛЮСЫ и МИНУСЫ применения минеральных удобрений // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2021. Т. 17. № 1. С. 38-43. – EDN PXROOR.

12. Ладонин Д.В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах. М.: Издательство Московского университета. 2019. 312 с. https://soil.msu.ru/attachments/article/1366/Ladonin_formy_i_soedinenij_tyazhelyih_metallov.pdf

13. Головатый С.Е. Формы нахождения кадмия, свинца и цинка в почвах в зоне воздействия цементного производства, 2018. С. 30 – 32 <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/204058/1/30-32.pdf>.

14. Vodianitskii Y., Minkina T., Bauer T. Methods to determine the affinity of heavy metals for the chemically extracted carrier phases in soils // Environmental Geochemistry and Health. 2022. V. 44(4).

15. Симонова, О. А. Влияние разных факторов на содержание подвижных соединений железа в пахотном горизонте дерново-подзолистой почвы / О. А. Симонова // Материалы V Международной научно-практической конференции "Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве", Киров, 01–05 апреля 2019 года. – Киров: Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, 2019. С. 255-257.

16. Никитина О. В., Стифеев А. И., Зуев С. А. Источники поступления тяжёлых металлов в окружающую среду и основные направления их снижения // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. №. 3. С. 50-55.

17. Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Санжаров А.И., Корнеев Ю.Н., Крыленкин Д.В., Щеглов А.И., Колягин Ю.Г. Исследование поведения кадмия в системе почва - лизиметрический раствор - растение в модельном эксперименте с использованием радиоактивного индикатора ^{109}Cd // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2022. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-povedeniya-kadmiya-v-sisteme-pochva-lizimetricheskiy-rastvor-rastenie-v-modelnom-eksperimente-s-ispolzovaniem> (дата обращения: 21.12.2025).

18. Водяницкий Ю.Н. Средство тяжелых металлов и металлоидов к фазам-носителям в почвах (литературный обзор) // Агрехимия. 2008. № 9. С. 87-94

References

1. Pilip L.V., Syrchina N.V., Ashikhmina T.YA. Promyshlennye svinokompleksy kak istochniki zagryazneniya okruzhayushchej sredy tyazhelymi metallami // Izvestiya Komi nauchnogo centra URO RAN. 2021. №5. S. 88–91.

2. Pogodin S. A., Kadmij / Kratkaya khimicheskaya ehnciklopediya, t. 2. - M.: Izd-vo: Bol'shaya sovetskaya ehnciklopediya, 1963. – 543 s.

3. Saloni Sachdeva, Abhiruchi Varshney, Harish Chandra Barman, Mike A. Powell, Prafulla Kumar Sahoo, Potentially toxic elements in different inorganic and organic fertilizers: A comprehensive review on global perspective and fertilizer-wise differences, Applied Soil Ecology, Volume 209, 2025, 105996, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105996>.

4. Pogorelov A. V. i dr. Tyazhelye metally v okruzhayushchej srede i ikh vliyanie na sel'skokhozyajstvennye rasteniya //Risovodstvo. 2021. № 4 (53). – S. 54-61. DOI 10.33775/1684-2464-2021-53-4-54-61.

5. Makarov M.I. Fosfor organicheskogo veshchestva pochv. MGU im. M. V. Lomonosova. M., 2009. 397 s.

6. Shikhova L.N., Lisicyn E.M. Soderzhanie podvizhnogo i valovogo kadmiya v kislykh dernovo-podzolistykh pochvakh // Agroehkologicheskij vestnik. Vyp. 7. Voronezh, 2016. S. 234-239.

7. Lukin, S.V., Zhuikov N.V. Content and Balance of Trace Elements (Co, Mn, Zn) in Agroecosystems of the Central Chernozemic Region of Russia Agriculture, 2022. 12 (2). – 154 s. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020154>.

8. Vorob'ev V.B. O vzaimosvyazi mezhdru soderzhaniem tyazhelykh metallov i gumusa v dernovopodzolistoj legkosuglinistoj pochve // Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel'skokhozyajstvennoj akademii. 2022. № 4. S. 103–107.

9. Chujkov V. A., Teberdiev D. M., Rodionova A. V., Zapivalov S. A. Vliyanie dlitel'nogo primeneniya mineral'nykh udobrenij na agrokhimicheskie svojstva dernovo-podzolistoj pochvy senokosnogo ugod'ya // Adaptivnoe kormoproizvodstvo. 2021. № 3. S. 49–59. DOI: <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2021-3-49-59> (data obrashcheniya 26.12.2025).

10. Zav'yalova, N. E. Vliyanie mineral'nykh udobrenij na plodorodie dernovo-podzolistoj pochvy, soderzhanie osnovnykh ehlementov pitaniya i tyazhelykh metallov v ozimoj rzhi // Agrokimiya. 2021. № 4. S. 49-56. DOI 10.31857/S0002188121040153. – EDN KUBCNQ.

11. Teuchezh, A. A. PLYUSY i MINUSY primeneniya mineral'nykh udobrenij // Ehkologicheskij Vestnik Severnogo Kavkaza. 2021. T. 17. № 1. S. 38-43. – EDN PXROOR.

12. Ladonin D.V. Formy soedinenij tyazhelykh metallov v tekhnogenno-zagryaznennykh pochvakh. M.: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta. 2019. 312s.

https://soil.msu.ru/attachments/article/1366/Ladonin_formyi_soedinenij_tyazhelyih_metallov.pdf

13. Golovatyj S.E. Formy nakhozhdeniya kadmiya, svinca i cinka v pochvakh v zone vozdejstviya cementnogo proizvodstva, 2018. S. 30 – 32 <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/204058/1/30-32.pdf>.

14. Vodianitskii Y., Minkina T., Bauer T. Methods to determine the affinity of heavy metals for the chemically extracted carrier phases in soils // Environmental Geochemistry and Health. 2022. V. 44(4).

15. Simonova, O. A. Vliyanie raznykh faktorov na sodержanie podvizhnykh soedinenij zheleza v pakhotnom gorizonte dernovo-podzolistoj pochvy / O. A. Simonova // Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Metody i tekhnologii v selekcii rastenij i rastenievodstve", Kirov, 01–05 aprelya 2019 goda. – Kirov: Federal'nyj agrarnyj nauchnyj centr Severo-Vostoka imeni N.V. Rudnickogo, 2019. S. 255-257.

16. Nikitina O. V., Stifeev A. I., Zuev S. A. Istochniki postupleniya tyazhyolykh metallov v okruzhayushchuyu sredu i osnovnye napravleniya ikh snizheniya // Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skokhozyajstvennoj akademii. 2024. №. 3. S. 50-55.

17. Anisimov V.S., Anisimova L.N., Sanzharov A.I., Korneev YU.N., Krylenkin D.V., Shcheglov A.I., Kolyagin YU.G. Issledovanie povedeniya kadmiya v sisteme pochva - lizimetricheskij rastvor - rastenie v model'nom ehksperimente s ispol'zovaniem radioaktivnogo indikatora 109CD // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie. 2022. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-povedeniya-kadmiya-v-sisteme-pochva-lizimetricheskij-rastvor-rastenie-v-modelnom-eksperimente-s-ispolzovaniem> (data obrashcheniya: 21.12.2025).

18. Vodyanickij YU.N. Srodstvo tyazhelykh metallov i metalloidov k fazamnosityam v pochvakh (literaturnyj obzor) // Agrokimiya. 2008. № 9. S. 87-94.