

Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства

© 2022. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., доцент, с. н. с.,
Л. В. Пилип², к. в. н., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,
³Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru

В результате выполненных исследований установлено, что систематическое внесение значительных объёмов жидкой фракции (ЖФ) навозных стоков в пашню приводит к существенной трансформации физико-химических свойств агрозёмов. Под влиянием ЖФ в пахотном горизонте значительно повышается содержание подвижных форм фосфора (до 980–1170 мг/кг), обменного калия (до 860 мг/кг), органического вещества, снижается кислотность. Жидкая фракция навозных стоков крупного рогатого скота (КРС) способствует более выраженному повышению pH_{KCl} и более интенсивному накоплению органического вещества, чем ЖФ свиных навозных стоков, что, возможно, обусловлено разным химическим составом навоза. Навоз КРС содержит больше соединений Са и Mg, способствующих снижению кислотности, а также лигнина и клетчатки, приводящих к накоплению в почве гумуса. Концентрации всех изученных тяжёлых металлов (ТМ) в почве пашни не превышали значения, характерные для агрозёмов Кировской области. Вместе с тем, содержание валовых и подвижных форм Cu, Cd и Pb в обследуемых агрозёмах оказалось выше, чем на фоновых территориях. Количество ТМ в стеблях кукурузы не превышало обычное содержание этих элементов в растениях незагрязнённых территорий. Индексы аккумуляции всех изученных ТМ, кроме Cu, были существенно выше при выращивании растений на кислых почвах. Возможной причиной повышенной биодоступности Cu для растений в нейтральных почвах может быть образование растворимых хелатных комплексов меди. Результаты исследований свидетельствуют о глубокой трансформации агрохимических свойств агрозёмов под влиянием ЖФ. Для предотвращения загрязнения окружающей среды в районе размещения животноводческих комплексов необходимо совершенствование действующей системы утилизации отходов животноводства и внедрение технологий, позволяющих транспортировать отходы на более значительные расстояния.

Ключевые слова: навозные стоки, загрязнение почвы, тяжёлые металлы, индекс аккумуляции, деградация агрозёмов.

Chemical land degradation under the influence of animal husbandry waste

© 2022. N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760[?]

L. V. Pilip² ORCID: 0000-0001-9695-7146[?]

T. Ya. Ashikhmina^{1,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047[?]

¹Vyatka State University,

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

²Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

³Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,

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

e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru

Systematic introduction of significant volumes of liquid fraction (LF) of manure effluents into arable land leads to a significant transformation of the physical and chemical properties of agrozems. Under the influence of LF, the content of mobile forms of phosphorus (up to 980–1170 mg/kg), exchangeable potassium (up to 860 mg/kg), and organic matter in the arable horizon significantly increases, and acidity decreases. The LF of manure effluents of cattle contributes to a more pronounced increase pH_{KCl} and a more intensive accumulation of organic matter than the LF of pig manure effluents, which may be due to the different chemical composition of manure. Cattle manure contains more Ca and Mg, which lower the pH, as well as lignin and fiber, leading to the accumulation of humus in the soil. The concentration of all studied heavy metals (HM) in arable land did not exceed the values typical for agrozems of the Kirov region. The content of gross and mobile forms Cu, Cd, Pb in the surveyed agro-ecosystems turned out to be higher than in the background territories. The amount of HM in corn stalks did not exceed the usual content of these elements in plants of uncontaminated territories. The accumulation indices of all studied HM, except Cu, were significantly higher when growing plants on acidic soils. A possible reason for the increased bioavailability of Cu for plants in neutral soils may be the formation of soluble chelate complexes. To prevent environmental pollution in the area of livestock complexes, it is necessary to improve the existing system of animal waste disposal and introduce technologies that allow waste to be transported over long distances.

Keywords: manure runoff, soil pollution, heavy metals, accumulation index, degradation of agrozem.

Функционирование современного промышленного животноводства сопряжено с образованием больших объёмов отходов, основным из которых является навоз – смесь твёрдых и жидких экскрементов сельскохозяйственных животных (НЖ). Согласно официальной статистике общее поголовье крупного рогатого скота (КРС), содержащегося в хозяйствах всех категорий, в Российской Федерации (РФ) в 2021 г. составило 18535,2 тыс. голов, поголовье свиней – 27347,7 тыс. голов. При содержании такого количества животных расчётная масса ежегодного образования навоза КРС достигает 372 млн т, навоза свиней – 45 млн т. **С соответствующим количеством отходов в окружающую среду ориентировочно поступает до 43,16 млн т органических веществ; 1,03 млн т связанного азота; 970 тыс. т P_2O_5 , 1,5 млн т K_2O , а также широкий спектр других химических элементов, входящих в состав кормов и витаминно-минеральных премиксов (расчёты выполнены в соответствии с РД-АПК 1.10.15.02-17; принятая влажность навоза – 88%).**

Основным направлением утилизации НЖ является использование их в качестве органических удобрений. Однако локализация животноводческих предприятий на ограниченных территориях и высокие затраты на доставку соответствующих удобрений до мест внесения приводят к формированию выраженного дисбаланса в распределении биогенных отходов по посевным площадям. Поскольку транспортирование НЖ на расстояние более 7–15 км практически не окупается прибавкой урожая выращиваемых культур [1, 2], животноводческие хозяйства вынуждены вносить эти удобрения в пахотные поля, расположенные в непосредственной близости от мест образования и обработки отходов. Регулярное и долговременное внесение больших объёмов

НЖ на ограниченные площади приводит к загрязнению территорий широким спектром разнообразных химических веществ, включая тяжёлые металлы (ТМ), подвижные соединения фосфора, легко окисляемые органические вещества. Под воздействием НЖ изменяется почвенная микробиота, оказывающая непосредственное влияние на состояние и миграционную способность химических элементов в окружающей среде [3–5]. Для обеспечения экологической устойчивости агроландшафтов и предотвращения деградации земель сельскохозяйственного назначения вблизи животноводческих предприятий необходимо получение объективной информации о динамике трансформации химического состава почв под воздействием высоких норм НЖ.

Цель настоящей работы состояла в оценке влияния долговременного внесения высоких норм обеззараженной жидкой фракции свиного навоза и навоза КРС на химический состав пахотного горизонта агрозёмов и содержание ТМ в выращиваемых культурах.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследований были выбраны пахотные поля, расположенные в центральной части Кировской области (ЦКО) вблизи крупного свиноводческого комплекса откормочного типа (агрозём 1) и молочной фермы с беспривязным содержанием коров (агрозём 2). Почва обследуемых полей дерново-подзолистая среднесуглинистая на покровных суглинках. Применяемая на животноводческих предприятиях технология обработки навозных стоков включает разделение отходов на твёрдую и жидкую фракции (методом сепарирования) с последующим обеззараживанием жидкой фракции (ЖФ) в прудах-накопителях (лагунах), а твёрдой

фракции – на специально оборудованных площадках. После обеззараживания ЖФ вносится в пашню, расположенную вблизи очистных сооружений, а твёрдую фракцию можно транспортировать на более значительные расстояния. Периодичность внесения – ежегодно в течение 6 лет. Метод внесения ЖФ – внутрпочвенный с использованием высокопроизводительных шланговых систем. Нормы внесения ЖФ устанавливает агрохимическая служба предприятий в соответствии с РД-АПК 1.10.15.02-17. Среднегодовая норма внесения составила 200 ± 20 т/га. Минеральные удобрения и известковые материалы на обследуемых полях последние 6 лет не применяли.

Отбор точечных проб агроёма проводили в октябре 2021 г. в соответствии с ГОСТ Р 58595-2019 тростевым буром на глубину пахотного горизонта. Из точечных проб составляли объединённые пробы массой 500 г. Контрольные пробы (фон) отбирали на участках, покрытых кустарником, не затронутых хозяйственной деятельностью, аналогично отбору проб агроёма. Гранулометрический состав контрольных проб соответствовал гранулометрическому составу экспериментальных проб. Анализ проб выполняли через 7 суток после отбора. Для оценки динамики трансформации химического состава агроёмов использовали результаты обследования соответствующих полей за 2016 и 2018 гг. Отбор и подготовку растительных проб (стеблей кукурузы) проводили согласно ГОСТ Р 58588-2019. Пробы отбирали в 2021 г. в конце вегетационного периода. Индекс аккумуляции (ИА) определяли по отношению концентрации ТМ в воздушно-сухой массе растений к концентрации ПФ соответствующих ТМ в почве [6].

Содержание органического вещества в пробах почвы определяли по ГОСТ 23740-2016 методом прокаливания до постоянной массы; pH_{KCl} – по ГОСТ 26483-85; содержание подвижных соединений фосфора и обменного калия – по ГОСТ Р 54650-2011, обменного кальция – по ГОСТ 26487-8. Определение содержания ТМ в стеблях кукурузы проводили с использованием ГОСТ 30692-2000, в почве – по ФР 1.31.2018.31189 атомно-абсорбционным методом с помощью спектрометра ААС «Спектр-5-4». Статистическую обработку полученных данных выполняли в программе Microsoft Excel по общепринятым методикам. Статистическую значимость различий средних величин оценивали по t -критерию Стьюдента.

Влияние ЖФ на свойства агроёмов оценивали по следующим показателям: обменная кислотность (pH_{KCl}), содержание органического вещества, подвижных форм фосфора ($P_{2O_{5\text{подв.}}}$), обменного калия ($K_2O_{\text{обм.}}$), ТМ. В перечень определяемых ТМ были включены Fe, Mn, Cu, Zn (используются в составе минеральных добавок для животных) [7], Cd, Pb, Ni (токсичные элементы, в составе минеральных добавок не используются, но содержатся в кормах) [8].

Результаты и обсуждение

Результаты химического анализа отобранных образцов агроёма приведены в таблице 1. Для получения более объективной информации о влиянии ЖФ на свойства агроёмов, в таблице 1 приведены значения показателей, характерные для пахотных земель ЦКО, в пределах которой расположены животноводческие предприятия.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что удобрение пашни ЖФ привело к существенному снижению обменной кислотности и повышению содержания подвижного фосфора, обменного калия, органического вещества по сравнению со средними значениями соответствующих показателей, характерными для фоновых территорий и ЦКО. Внесение ЖФ навоза КРС способствовало более значительному повышению pH_{KCl} , чем внесение ЖФ свиного навоза, что может быть обусловлено более высоким содержанием соединений кальция и магния в навозе КРС [12]. Содержание в агроёмах подвижных и валовых форм ТМ по сравнению с фоновыми территориями также изменилось, однако в большинстве случаев находилось в пределах средних значений, характерных для пахотных земель ЦКО.

Внесение ЖФ привело к статистически значимому накоплению в пахотном горизонте валовых форм Cu, Cd, Pb, а также появлению тенденции к накоплению Ni (по сравнению с фоном). Основным источником поступления ТМ в обследуемые агроёмы является навоз, содержащий широкий перечень разнообразных химических элементов, входящих в состав кормов и витаминно-минеральных премиксов [13].

Под влиянием ЖФ содержание подвижной формы (ПФ) Fe в агроёме по сравнению с фоновыми участками уменьшилось в 5–7 раз, а подвижного Mn возросло в 6–11 раз. Существенно увеличилось количество ПФ Cu и Cd. Снижение концентрации подвижного Fe,

Таблица 1 / Table 1

Изменение свойств агрозёма под влиянием жидкой фракции навозных стоков
Changes of the properties of agrozem under the influence of the liquid fraction of manure

Показатель Indicator		Значение показателя / Value of indicator					
		агрозём / agrozem		фон / background		Кировская область* Kirov region*	
		1	2	1	2		
рН _{КСЛ} , ед. рН		5,3±0,2	7,2±0,2	4,0±0,2	4,2±0,2	4,6–5,5	
Органическое вещество, % Organic, %		2,9±0,6	5,4±1,1	2,1±0,4	2,0±0,4	2,1	
мг/кг / mg/kg	P ₂ O ₅	подв. / mobile	980±200	1170±230	94±19	184±37	151–250
	Ca	обменный exchange	7,1±1,1	13,2±2,0	8,2±1,2	10,3±1,5	10,1–15,0
	K ₂ O	обменный exchange	660±100	850±130	122±18	119±18	121–170
	Fe	вал. / total	9300±2400	5900±1500	9200±2300	2600±600	–
		подв. / mobile	18±5	25±6	133±33	122±31	35,7–51,1
	Mn	вал. / total	550±130	500±120	650±150	630±150	430–1500
		подв. / mobile	124±29	116±27	19±4	12,8±2,9	43,2–82,4
	Cu	вал. / total	28±6	19±4	13,9±3,2	10,2±2,3	9,2–37
		подв. / mobile	1,8±0,4	1,19±0,27	0,47±0,11	0,08±0,02	1,6–3,3
	Zn	вал. / total	38±13	17±6	40±13	7,3±2,4	24,8–49,5
		подв. / mobile	8,5±2,8	5,4±1,8	2,8±0,9	4,3±1,4	2,1–5,0
	Cd	вал. / total	0,18±0,05	0,16±0,05	0,038±0,011	0,07±0,02	0,15–0,23
		подв. / mobile	0,026±0,008	0,067±0,020	< 0,01		0,08–0,11
	Pb	вал. / total	6,2±1,5	7,8±2,0	3,2±0,8	2,02±0,25	11,6–14,0
подв. / mobile		1,11±0,28	0,91±0,11	0,66±0,16	1,13±0,14	1,7–1,9	
Ni	вал. / total	23±9	14±6	13±6	11±4	10,2–33,5	
	подв. / mobile	0,76±0,32	0,30±0,10	0,43±0,18	0,46±0,19	0,3–1,1	

Примечание: вал. – валовое содержание; подв. – подвижная форма. * – Характерные значения для центральной части Кировской области [9–11]. Статистически значимые отличия определяемых показателей от соответствующих показателей фоновых территорий (p < 0,05) выделены жирным шрифтом. Отсутствующие в опубликованных источниках данные отмечены прочерком.

Note: total – total content; mobil – movable form. * – Characteristic values for the central part of the Kirov region [9–11]. Statistically significant differences between the determined indicators and the corresponding indicators of the background territories (p < 0.05), are highlighted in bold. Data missing in published sources are marked with a dash.

вероятно, связано с повышением рН и высоким содержанием фосфатов, способствующим образованию малорастворимых соединений железа [14]. Повышение содержания подвижных форм Mn, Cu и Cd в условиях регулярного обогащения почвы органическим веществом ЖФ может быть обусловлено образованием характерных для этих элементов мобильных органоминеральных комплексов [15, 16]. На подвижность Cd существенное влияние могло оказать и высокое содержание обменного калия, способного вытеснять адсорбированные катионы Cd²⁺ с поверхности твёрдой фазы в раствор [17]. Увеличение содержания ПФ Pb и Zn, по сравнению с фоном, наблюдалось в агрозёме 1 (рН_{КСЛ} 5,3). В агрозёме 2 (рН_{КСЛ} 7,2) содержание ПФ этих элементов оказалась несколько ниже, чем в агрозёме 1. Снижение под-

вижности ТМ в нейтральной среде может быть обусловлено образованием малорастворимых фосфатов, карбонатов, оксигидратов и гуматов [18–19]. В отличие от других ТМ, содержание ПФ Cd оказалось несколько выше в агрозёме 2, что может быть обусловлено образованием хорошо растворимых в слабощелочной и нейтральной средах комплексных соединений с органическими веществами и пониженной способностью соответствующих комплексов к иммобилизации за счёт процессов адсорбции [20, 21]. Определённое значение для перевода Cd в подвижную форму может иметь и более высокое содержание в агрозёме 2 обменного Ca, активно конкурирующего с Cd за адсорбционные центры [22].

В таблице 2 приведены результаты обследования полей за 2016 и 2018 гг.

Таблица 2 / Table 2

Динамика изменения химических свойств агрозёма
Dynamics of changes in chemical properties of agrozem

Показатель / Indicator	Значение показателя / Value of indicator				
	агрозём 1 / agrozem 1		агрозём 2 / agrozem 2		
	2016	2018	2016	2018	
pH _{KCl}	4,6±0,1	4,4±0,1	5,7±0,1	6,7±0,1	
Органическое вещество, % / organic, %	2,9±0,6	2,5±0,5	5,4±0,8	5,0±0,7	
P ₂ O ₅ , мг/кг / mg/kg	подв. / mobile	270±50	390±80	360±70	430±90
K ₂ O, мг/кг / mg/kg	обменный / exchange	209±31	242±36	350±60	468±70
Cd, мг/кг / mg/kg	вал. / total	0,12±0,03	0,14±0,04	0,10±0,03	0,12±0,03
Pb, мг/кг / mg/kg	вал. / total	4,6±0,9	5,6±1,1	6,6±1,3	8,8±2,2

Таблица 3 / Table 3

Содержание тяжёлых металлов в средней части стеблей кукурузы
The content of heavy metals in the middle part of corn stalks

Показатель / Indicator	Содержание, мг/кг (на сухое вещество) / Content, mg/kg (per dry matter)		
	агрозём 1 / agrozem 1	агрозём 2 / agrozem 2	обычное содержание в растениях незагрязнённых территорий [10, 23] / normal content in plants of uncontaminated areas [10, 23]
Fe	112±14	81±10	20–80
Mn	210±50	131±30	17–334
Cu	1,18±0,27	0,89±0,20	1–30
Zn	18,4±3,9	9,4±2,0	7–27
Cd	0,14±0,05	0,18±0,06	0,05–0,20
Pb	3,4±1,2	2,1±0,7	1,5–14,0
Ni	4,8±0,7	1,40±0,20	< 9,0

Примечание: жирным шрифтом выделены достоверные отличия (p < 0,05) между вариантами (агрозём 1 и агрозём 2).
Note: Significant differences (p < 0.05) between the variants (agrozem 1 and agrozem 2) are highlighted in bold.

Таблица 4 / Table 4

Индексы аккумуляции тяжёлых металлов в стеблях кукурузы
Indices of accumulation of heavy metals in corn stalks

Элементы / Elements	Индексы аккумуляции / Indices of accumulation	
	агрозём 1 / agrozem 1	агрозём 2 / agrozem 2
Fe	6,1	3,25
Mn	1,69	1,13
Cu	0,65	0,74
Zn	2,17	1,74
Cd	5,4	2,7
Pb	3,1	2,2
Ni	6,3	4,7

Сопоставление данных, приведённых в таблицах 1 и 2, свидетельствует о положительной динамике накопления в агрозёмах, удобряемых ЖФ, подвижных форм калия и фосфора, а также тенденции к повышению содержания валового Cd и Pb. Содержание подвижных форм ТМ в образцах агрозёма, отобранных в разные годы, варьировало в пределах, не превышающих точность используемых методов измерения.

В таблице 3 приведены данные о содержании ТМ в стеблях кукурузы, выращенной на обследуемых полях.

Согласно полученным данным содержание всех ТМ в стеблях кукурузы находилось в пределах обычных значений, характерных для растений, выращиваемых на незагрязнённых территориях, однако при возделывании кукурузы на более кислых почвах прослеживалась некоторая тенденция к повышению содержания ТМ (кроме Cd). Содержание Cd в стеблях растений коррелирует с содержанием ПФ этого элемента в почве, т. е. растения, выращенные на агрозёме 2, характеризовались несколько более высоким содержанием Cd, чем растения

на агрозёме 1 (различие статистически не значимо).

В таблице 4 приведены значения индексов аккумуляции ТМ в стеблях кукурузы.

Приведённые в таблице 4 данные свидетельствуют о более низкой аккумуляции большинства ТМ растениями, выращиваемыми на нейтральных почвах, что может быть обусловлено снижением биодоступности ТМ в нейтральной и слабощелочной среде [24, 25]. Индекс аккумуляции Си оказался более высоким на агрозёме 2. Возможной причиной повышенной биодоступности Си в нейтральных почвах может быть образование растворимых хелатных комплексов. Для катионов Cu^{2+} характерно более высокое сродство к органическим компонентам почвы, чем для других двухвалентных катионов, что и обуславливает особенности транслокации этого элемента в системе почва-растение [26].

Заключение

В результате выполненных исследований установлено, что существующая система использования обезвреженной ЖФ в качестве удобрения для пахотных полей, расположенных в непосредственной близости от прудов-накопителей, может представлять серьёзную опасность для окружающей среды. Систематическое внесение значительных объёмов ЖФ в пашню приводит к существенной трансформации физико-химических свойств агрозёмов. Под влиянием ЖФ в пахотном горизонте значительно повышается содержание подвижных форм фосфора, обменного калия, органических веществ, снижается кислотность, увеличивается валовое содержание и подвижность Си, Cd, Pb. Чрезмерное накопление ПФ фосфора и калия в агроэкосистемах свидетельствует о глубокой трансформации естественных процессов распределения и миграции соответствующих элементов в почве. Для предотвращения деградации пахотных почв вследствие загрязнения отходами животноводства на прилегающих к животноводческим комплексам территориях можно рекомендовать внедрение технологий переработки навоза в пригодные для транспортирования гранулированные формы органических и органоминеральных удобрений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги»,

номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.

References

1. Vasil'ev E.V. Basis of the rational radius of the manure transportation // *Molochnokhozayistvenny vestnik*. 2014. No. 1 (13). P. 49–55 (in Russian).
2. Järvan M., Vettik R., Tamm K. The importance and profitability of farmyard manure application to an organically managed crop rotation // *Zemdirbyste-Agriculture*. 2017. V. 104. No. 4. P. 321–328. doi: 10.13080/za.2017.104.041
3. Pilip L.V., Sychina N.V., Ashikhmina T.Ya. Industrial pig farms as sources of environmental pollution with heavy metals // *Proceedings of the Komi science centre of the Ural division of the Russian Academy of Sciences*. 2021. No. 5 (51). P. 88–91 (in Russian).
4. Pilip L.V., Kozvonin V.A., Sychina N.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya. Effects of acidifying manure effluent on its microbiological characteristics // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 161–167 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-161-167
5. Kumar R.R., Park B.J., Cho J.Y. Application and environmental risks of livestock manure // *Journal of Applied Biological Chemistry*. 2013. No. 56. P. 497–503. doi: 10.1007/s13765-013-3184-8
6. Novotnf J., Seidel H., Kováč G., Babcek R. Bioavailability of trace elements proteinate in pigs // *Medycyna Weterynaryjna*. 2005. V. 61. No. 1. P. 38–42 (in Polish).
7. Hejna M., Moscatelli A., Onelli E., Baldi A., Pilu S., Rossi L. Evaluation of concentration of heavy metals in animal rearing system // *Italian Journal of Animal Science*. 2019. V. 18. No. 1. P. 1372–1384. doi: 10.1080/1828051X.2019.1642806
8. Report on the scientific and production activities of FSBI GCAS Kirovsky for 2017. Kirov: State Center of Agrochemical Service “Kirovskiy”, 2018. 149 p. (in Russian).
9. Shikhova L.N., Egoshina T.L. Heavy metals in soils and plants of the North-East of the European part of Russia. Kirov: Zonalnyy NIISKh Severo-Vostoka, 2004. 264 p. (in Russian).
10. Simonova O.A., Simonov M.V., Tovstik E.V. Content of heavy metals (Zn, Cu, Mn, Fe) in agrosols of a non-chernozem zone of Russia in the conditions of application of mineral fertilizers (on the example of Kirov) // *Ecobiotech*. 2019. V. 2. No. 3. P. 302–306. doi: 10.31163/2618-964X-2019-2-3-302-306
11. Komyakova Y.M., Antonova O.I. The composition of cattle and swine manure, features of use and prospects for recycling // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020. No. 6 (188). P. 63–68 (in Russian).
12. Dacha J., Starmans D. Heavy metals balance in Polish and Dutch agronomy: Actual state and previsions for the future // *Agriculture, Ecosystems & Environ-*

ment. 2005. V. 107. No. 4. P. 309–316. doi: 10.1016/j.agee.2005.02.017

13. Gomonova N.F., Mineev V.G. Iron transformation under the effect of the long-term application of agrochemicals in an agrocenosis // *Eurasian Soil Science*. 2003. V. 36. No. 11. P. 1216–1224.

14. Vasilev A.A., Chashchin A.N. Heavy metals in soils of the city of Chusovoy: assessment and diagnosis of pollution. Perm: Permskaya GSKhA, 2011. 197 p. (in Russian).

15. Dube A., Zbytniewski R., Kowalkowski T., Cukrowska E., Buszewski B. Adsorption and migration of heavy metals in soil // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2001. V. 10. No. 1. P. 1–10.

16. Efremova M.A., Sladkova N.A., Vyalshina A.S. The dynamics of cadmium and potassium accumulation in wheat on soddy-podzolic and lowland peat soils // *Agrohimia*. 2013. No. 11. P. 86–96 (in Russian).

17. Reddy K.J., Wang L., Gloss S.P. Solubility and mobility of copper, zinc and lead in acidic environments // *Plant Soil*. 1995. V. 171. P. 53–58.

18. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile // *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2021. No. 54. P. 8–12. doi: 10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12

19. Singh B.R., Narwal R.P., Jeng A.S., Almas A. Crop uptake and extractability of cadmium in soils naturally high in metals at different pH levels // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1995. V. 26. P. 2123–2142.

20. Plekhanova V.A. Problem of fixing maintenance of cadmium in soil // *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*. 2010. No. 2. P. 55–59 (in Russian).

21. Wang W.Z., Brusseau M.L., Aftioli J.F. The use of calcium to facilitate desorption and removal of cadmium and nickel in subsurface soils // *Journal of Contaminant Hydrology*. 1997. V. 25. No. 3–4. P. 325–336. doi: 10.1016/S0169-7722(96)00046-0

22. Medvedev I.F., Derevyagin S.S. Heavy metals in ecosystems. Saratov: Rakurs, 2017. 178 p. (in Russian).

23. Sibgatullina M.Sh., Aleksandrova A.B., Ivanov D.V., Valiev V.S. Estimation of the biogeochemical status of herbs and soils in the Volga-Kama reserve // *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya estestvennye nauki*. 2014. V. 156. P. 87–108 (in Russian).

24. Takáč P., Szabová T., Kozáková E., Benková M. Heavy metals and their bioavailability from soils in the long-term polluted Central Spiš region of SR // *Plant Soil Environ*. 2009. V. 55. No. 4. P. 167–172. doi: 10.17221/21/2009-pse

25. Zhang M.K., Liu Z.Y., Wang H. Use of single extraction methods to predict bioavailability of heavy metals in polluted soils to rice // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2010. V. 41. No. 7. P. 820–831. doi: 10.1080/00103621003592341/

26. Mengel K., Kirkby E.A., Kosegarten H., Appel T. Soil copper // *Principles of Plant Nutrition*. 2001. No. 5. P. 599–611. doi: 10.1007/978-94-010-1009-2