

Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 1 (47). Март, 2023

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
В. Krasnov
А. Gugotek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>





УДК УДК 631.81

ЖИВОТНОВОДЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ КАК ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ (CU, ZN)

ПИЛИП

Лариса Валентиновна

кандидат ветеринарных наук, ФГБОУ ВО Вятский государственный агротехнологический университет, pilip_larisa@mail.ru

СЫРЧИНА

Надежда Викторовна

кандидат химических наук, ФГБОУ ВО Вятский государственный университет, nvms1956@mail.ru

КУЗНЕЦОВ

Дмитрий Алексеевич

аспирант, ФГБОУ ВО Вятский государственный университет, dimzaaa@gmail.com

Ключевые слова:

побочные продукты животноводства
почвы
микроэлементы
медь
цинк
тяжелые металлы
загрязнение окружающей среды

Аннотация: Микроэлементы Zn и Cu широко используются в составе витаминно-минеральных комплексов для животных. Около 1/3 содержащихся в рационе микроэлементов переходит в навоз – побочный продукт животноводства (ППЖ). Поступление Zn и Cu в окружающую среду в составе ППЖ от небольшой фермы на 500 коров может достигнуть 42.7 и 6.4 кг в год соответственно, при этом основная доля ППЖ вносится в пашню, расположенную вблизи от мест содержания животных. Исследования влияния навоза крупного рогатого скота на содержание Zn и Cu выполняли на территории, примыкающей к лагунам для обезвреживания жидкой фракции навозных стоков. В результате исследований установлено, что в удобряемой ППЖ пашне (почва глинистая) по сравнению с контролем наблюдается накопление валовых форм Cu и Zn (в 7 и 2.3 раза соответственно). Содержание подвижной Cu в пашне по сравнению с контролем увеличилось в 16 раз, содержание подвижного Zn практически не изменилось. Выявленный уровень микроэлементов в почве не превышает установленных норм, однако накопление валовых форм Zn и Cu свидетельствует о том, что поступление соответствующих элементов с ППЖ (даже при использовании органических удобрений в агрохимически обоснованных нормах) превышает их вынос с урожаем кормовых культур. Результаты исследований дают основания предположить, что основной вклад в процессы мобилизации / иммобилизации Cu вносит комплексообразование с органическими лигандами, а для Zn его связывание на отрицательно заряженной поверхности глинистых частиц. Для предотвращения возможности загрязнения примыкающих к животноводческим предприятиям территорий Zn и Cu необходимо контролировать динамику поступления и актуального содержания этих элементов в почве.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: В. И. Кулагина

Получена: 02 декабря 2022 года

Подписана к печати: 15 апреля 2023 года

Введение

28 июня 2022 г. Государственной Думой был принят Федеральный закон от 14 июля 2022 г. № 248-ФЗ «О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Целью принятого закона является повышение эффективности использования навоза, помета, стоков, подстилки, которые ранее относились к категории отходов производства. После вступления закона в силу (с 1 марта 2023 г.) при условии соблюдения всех предъявляемых к ним требований соответствующие материалы получат статус побочных продуктов животноводства (ППЖ) и могут быть использованы в качестве органических удобрений в сельскохозяйственном производстве. Важнейшим требованием закона является недопущение загрязнения окружающей среды. Соблюдение указанного требования сопряжено с определенными трудностями, поскольку в ППЖ содержатся не только агрохимически ценные компоненты, но и широкий спектр составляющих, которые представляют существенную экологическую опасность (тяжелые металлы (ТМ), антибиотики, патогенные микроорганизмы и др.) (Пилип, Сырчина, 2019; Сырчина и др., 2022). Для минимизации негативных последствий ППЖ перед использованием подвергаются специальной обработке (обезвреживанию), которая обычно включает разделение навоза и навозных стоков на жидкую (ЖФ) и твердую фракции (ТФ) с последующим выдерживанием ЖФ в лагунах, а ТФ на оборудованных площадках. Соответствующая обработка способствует уничтожению патогенных микроорганизмов, яиц гельминтов и семян сорных растений. Обезвреженные ППЖ могут быть использованы в качестве органических удобрений.

Особенностью ЖФ является высокая влажность и низкое содержание питательных веществ, что снижает экономическую целесообразность транспортировки этого продукта на значительные расстояния. В связи с этим ЖФ из лагун вносится в пашню, расположенную на незначительном расстоянии (до 5 км) от животноводческих предприятий. Внесение больших объемов органических удобрений на ограниченных площадях оказывает существенное влияние на агрохимические характеристики агроземов: уровень кислотности, содержание органического вещества, подвижность фосфора, калия, биодоступность агрохимически ценных

микроэлементов и опасных тяжелых металлов (Пилип и др., 2020, 2021). Следует отметить, что многие микроэлементы, включая Zn и Cu, относятся к группе ТМ. Потребность живых организмов в этих элементах ограничена определенными физиологическими пределами, при превышении которых микроэлементы начинают проявлять токсичные свойства. Согласно ГОСТ 17.4.1.0283, Zn относится к первому, а Cu ко второму классу опасности. Содержание этих элементов в почве подлежит нормированию.

Сбалансированный рацион для коров должен включать 695 мг Zn и 105 мг Cu (Позывайло и др., 2016). Примерно треть потребленных микроэлементов переходит в навоз (Андреев и др., 2022). Простые расчеты показывают, что поступление Zn и Cu в окружающую среду в составе ППЖ от небольшой фермы на 500 коров составят 42.7 и 6.4 кг в год соответственно. Содержащиеся в навозе органические соединения (карбоновые кислоты, мочевины, фенолы, гетероциклы, биогенные амины и др.), способные образовывать растворимые комплексы с ионами ТМ, могут повысить подвижность и биодоступность микроэлементов в почве до опасного для окружающей среды уровня. В условиях чрезмерного накопления подвижных форм микроэлементов почвы утрачивают свое плодородие.

Цель настоящей работы состояла в изучении влияния обезвреженной жидкой фракции навоза крупного рогатого скота на содержание валовой и подвижной форм микроэлементов (Zn, Cu) в пашне.

Материалы

Исследования проводили в октябре 2021 г. в Кировской области вблизи крупного молочного комплекса. В хозяйстве предусмотрено кормление животных полнорационными кормосмесями (монокорм), которые состоят из силоса, сена (сенная резка), концентратов и кормовых добавок. Система содержания животных – круглогодичная стойловая.

Образующийся навоз сепарируют на фракции. После аэробной обработки в био-реакторах ТФ возвращают на фермы и используют в качестве подстилки, а ЖФ направляют в лагуны. После периода обезвреживания ЖФ откачивают из лагун и вносят в пашню с помощью буксируемой шланговой системы. Нормы внесения рассчитывает агрохимическая служба предприятия.

Для проведения исследований было вы-

брано примыкающее к лагунам пахотное поле площадью 30 га (эксперимент). Почвы глинистые, дерново-подзолистые. В период с 2019 по 2021 г. в пашню ежегодно вносили ЖФ в норме 200 ± 20 т/га. В более ранний период в качестве удобрений использовали подстилочный и бесподстилочный навоз КРС. Минеральные удобрения последние 6 лет не применяли. Поле использовали в кормовом севообороте. В год отбора почвенных проб на поле выращивали кукурузу на силос.

Контрольные пробы (контроль) отбирали на заросших травой и кустарником участках, расположенных на расстоянии не менее 300 м от границ пашни. Почва контрольных участков дерново-подзолистая, механический состав идентичен пахотному полю.

Объединенные пробы почвы массой по 500 г составляли из точечных, отобранных методом конверта. Точечные пробы почвы отбирали на глубину пахотного горизонта тростевым буром. Было отобрано по 80 точечных проб с опытного и контрольного участков, из которых было составлено по 4 объединенные пробы (контроль и эксперимент). Отбор проб проводили согласно ГОСТ Р 58595-2019. Пробоподготовку и химический анализ выполняли через 3 дня после отбора проб.

Методы

Содержание Zn и Cu определяли атомно-абсорбционным методом на спектрометре ААС «Спектр-5-4» по ФР 1.31.2018.31189 «Методика измерений массовых долей токсичных металлов в пробах почв атомно-абсорбционным методом». Подвижные формы металлов в почвах извлекали ацетатно-аммонийным буферным раствором с $pH = 4.8$. Отношение массы почвы к объему рас-

твора 1:10, время воздействия экстрагента 1 час при взбалтывании на ротаторе.

Для определения валовой формы к 10 г измельченной и просеянной воздушно-сухой почвы добавляли $50 \text{ см}^3 \text{ HNO}_3$ (1:1), кипятили на медленном огне 10 мин, добавляли 10 см^3 концентрированной H_2O_2 , кипятили 10 мин, суспензию фильтровали, к осадку добавляли 40 см^3 раствора HNO_3 (1 моль/ дм^3), кипятили 30 мин, фильтровали, осадок на фильтре промывали горячим раствором HNO_3 (1 моль/ дм^3).

Кроме Zn и Cu в отобранных пробах определяли кислотность (pH_{KCl} – по ГОСТ Р 58594-2019; $pH_{\text{H}_2\text{O}}$ – по ГОСТ 26423-85) и органическое вещество (ГОСТ 23740-2016 методом прокаливания до постоянной массы), поскольку эти показатели оказывают существенное влияние на подвижность микроэлементов (Fijałkowski et al., 2012; Маркина и др., 2016).

Статистическую значимость различий средних величин оценивали по t-критерию Стьюдента (использовали гетероскедастический двусторонний тест ТТЕСТ из статистического пакета Microsoft Excel).

Результаты

В результате проведенных исследований было выявлено, что экспериментальные пробы почвы отличались более высоким содержанием органического вещества и более низким уровнем кислотности по сравнению с контрольными пробами и средневзвешенными показателями (СВП) пахотных почв Кировской области (данные агрохимического обследования сельскохозяйственных угодий предоставлены ФГБУ ГЦАС «Кировский» за 2018 г.), характерными для пахотных почв соответствующей территории (табл. 1).

Таблица 1. Содержание органического вещества и кислотность почвы

№ п/п	Показатель	Значение		
		контроль	эксперимент	СВП
1	Содержание органического вещества, % масс.	4.2 ± 0.2	6.0 ± 0.4	2.1
2	Обменная кислотность (pH_{KCl}), единиц pH	4.0 ± 0.2	7.7 ± 0.3	5.1
3	pH водной вытяжки ($pH_{\text{H}_2\text{O}}$), единиц pH	5.7 ± 0.3	8.1 ± 0.3	Данные отсутствуют

Примечание. Жирным шрифтом в таблицах выделены статистически значимые различия между контрольными и экспериментальными пробами ($P > 0.95$).

Выявленное в ходе эксперимента накопление органического вещества и снижение уровня кислотности пашни под влиянием многолетнего внесения навоза КРС хорошо согласуется с результатами других экспери-

ментальных исследований (Васбиева, 2021).

В табл. 2 приведены результаты эксперимента, характеризующие содержание подвижных и валовых форм микроэлементов в отобранных образцах почвы.

Таблица 2. Содержание меди и цинка в почве

№ п/п	Показатель	Содержание, мг/кг					
		валовое содержание			подвижная форма		
		контроль	эксперимент	СВП	контроль	эксперимент	СВП
1	Cu	2.8 ± 0.6	19.3 ± 4.4	9.2	0.08 ± 0.02	1.2 ± 0.3	2.9
2	Zn	7.3 ± 2.4	16.8 ± 5.5	24.8	5.3 ± 1.4	5.4 ± 1.8	1.2

Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в удобряемой навозом пашне по сравнению с контролем наблюдается накопление валовых форм Cu и Zn (в 7 и 2.3 раза соответственно). Содержание подвижной Cu в пашне по сравнению с контролем увеличилось в 16 раз. Подвижность Zn в контрольных и опытных пробах была практически одинаковой.

Выявленное в ходе эксперимента содержание подвижного Zn в пашне, согласно принятым в агрохимической службе грациям для дерново-подзолистых и серых лесных почв, приближается к высокой обеспеченности (более 5.0 мг/кг). Содержание подвижной Cu соответствует низкой обеспеченности (менее 1.5 мг/кг), однако существенно превышает соответствующий уровень, выявленный для контрольных проб.

В нейтральной, богатой органическим веществом пашне доля подвижной Cu превышает 6 % от валового уровня, в кислой почве контрольных участков этот показатель не достигает 3 %. Можно предположить, что в пашне переход Cu в подвижную форму обусловлен образованием мобильных органоминеральных комплексов, например комплексов с карбоксильными или фенольными соединениями, источником которых является навоз. Данные о выраженной органофильности Cu приведены в различных исследованиях (Sims, 1986; McBride, 1989). Увеличение pH приводит к депротонированию карбоксильных и фенольных групп, в результате чего связывание катионов TM в комплексы облегчается. Соответствующий эффект будет проявляться более отчетливо в условиях известкования, поскольку снижение кислотности способствует депротониро-

ванию органических лигандов и повышению устойчивости комплексных соединений.

Для Zn выявлена противоположная зависимость: в пашне содержание подвижного Zn составляет 32 % от валового, в контроле – 73 %. Соответствующая зависимость может быть обусловлена сродством Zn к слоистым силикатам (Garcia-Mina, 2006; Водяницкий, 2008), поверхность которых благодаря наружным силанольным группам несет отрицательный заряд (Malandrino et al., 2006). В кислой среде ионы H⁺ вытесняют катионы Zn²⁺ с поверхности силикатов, в результате чего относительное содержание подвижных форм этого металла увеличивается. Снижение кислотности почвы под влиянием навоза приводит к депротонированию силанольных групп и увеличению отрицательного заряда на поверхности глинистых частиц, что способствует иммобилизации Zn.

Следует отметить, что Zn и Cu относятся к опасным экотоксикантам, содержание которых в почве населенных мест и сельскохозяйственных угодий нормируется СанПиН 1.2.3685-21. Согласно этому документу, ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) валовых форм Cu в кислых глинистых и суглинистых почвах составляет 66.0 мг/кг, в близких к нейтральным и нейтральных суглинистых и глинистых – 132.0 мг/кг. Для Zn соответствующие показатели установлены на уровне 110 и 220 мг/кг соответственно. Предельно допустимая концентрация (ПДК) подвижной Cu в почве – 3.0 мг/кг, подвижного Zn – 23.0 мг/кг. Сопоставление соответствующих нормативов с результатами выполненных исследований (см. табл. 2) показывает, что долговременное внесение навоза и ЖФ навоза КРС не привело к повышению уровня подвижных и валовых форм Zn и Cu в пашне выше допустимого, при этом

содержание доступных для растений форм дефицитных микроэлементов в агроземе по сравнению с бедными дерново-подзолистыми почвами увеличилось. Накопление валовых форм Zn и Cu свидетельствует о том, что поступление соответствующих элементов в пашню с навозом и ЖФ навоза (даже при использовании органических удобрений в агрохимически обоснованных нормах) превышает уровень выноса микроэлементов с урожаем кормовых культур.

Заключение

Систематическое внесение навоза, навозных стоков и продуктов их переработки (в частности, жидкой фракции навозных стоков) приводит к накоплению в пашне валовых форм Zn и Cu, входящих в состав витаминно-минеральных комплексов для животных. Соответствующий процесс имеет большое значение для обеспечения плодородия бедных микроэлементами дерново-подзолистых почв.

Внесение навоза в загрязненные медью почвы может привести к негативным экологическим последствиям, поскольку это удобрение способствует переходу Cu в под-

вижную форму за счет образования растворимых комплексов с органическими лигандами.

Влияние навоза на подвижность Zn обусловлено сочетанным действием двух противоположных процессов: переходом Zn в подвижную форму за счет образования комплексов с органическими веществами и иммобилизацией катионов Zn^{2+} на отрицательно заряженной поверхности слоистых силикатов (глинистых минералов). Снижение кислотности под влиянием навоза приводит к интенсификации обоих процессов, но в разной степени. Согласно результатам эксперимента, основное влияние на подвижность Zn оказывают процессы мобилизации-иммобилизации этого элемента на поверхности глинистых материалов, поэтому доля подвижного цинка в кислых почвах выше, чем в нейтральных.

Для предотвращения возможности загрязнения примыкающих к животноводческим предприятиям территорий цинком и медью необходимо контролировать динамику поступления и актуального содержания этих элементов в почве.

Библиография

- Андреев А. И., Менькова А. А., Костромкина Н. В. Усвоение марганца, меди и цинка при сенажном типе кормления ремонтных телок // Известия ОГАУ. 2022. № 4 (96). С. 290–293. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/usvoenie-margantsa-medi-i-tsinka-pri-senazhnom-tipe-kormleniya-remontnyh-tyolok> (дата обращения: 21.11.2022).
- Васбиева М. Т. Изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении удобрений // Почвоведение. 2021. № 1. С. 90–99. DOI: 10.31857/S0032180X21010135.
- Водяницкий Ю. Н. Сродство тяжелых металлов и металлоидов к фазам-носителям в почвах // Агрохимия. 2008. № 9. С. 87–94.
- Маркина Е. О., Григорьев В. В., Сырчина Н. В. Влияние различных добавок на подвижность тяжелых металлов в почвах // Экология родного края: проблемы и пути решения: Материалы Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Киров: ООО «Радуга-ПРЕСС», 2016. С. 87–90.
- Пилип Л. В., Сырчина Н. В. Экологическая проблема отрасли свиноводства // Аграрная наука – сельскому хозяйству: Сборник материалов XIV Междунар. научно-практич. конф. Кн. 2. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2019. С. 193–196.
- Пилип Л. В., Козвонин В. А., Сырчина Н. В., Колеватых Е. П., Ашихмина Т. Я. Влияние подкисления навозных стоков на их микробиологические характеристики // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 161–167. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-3-161-167.
- 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 (51). С. 88–91.
- Позывайло О. П., Котович И. В., Копать Н. В., Зайцев С. Ю. Динамика показателей минерального обмена у коров-первотелок в течение лактационного периода // Веснік МДПУ імя І. П. Шамякіна. 2016. № 1 (47). С. 68–75. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-pokazateley-mineralnogo-obmena-u-korov-pervotelok-v-techenie-laktatsionnogo-perioda> (дата обращения: 23.11.2022).
- Сырчина Н. В., Пилип Л. В., Ашихмина Т. Я. Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. Р. 219–225. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-3-219-225.
- Fijałkowski K., Kasprzak M., Grobelak A., Placek A. The influence of selected soil parameters on the mobility of heavy metals in soil // Inżynieria i Ochrona Środowiska. 2012. Vol. 15. No 1. P. 81–92.

URL: https://www.researchgate.net/publication/282734701_The_influence_of_selected_soil_parameters_on_the_mobility_of_heavy_metals_in_soil (дата обращения: 22.11.2022).

Garcia-Mina J. M. Stability, solubility and maximum metal binding capacity in metal–humic complexes involving humic substances extracted from peat and organic compost // *Organic Geochemistry*. 2006. Vol. 37. No 12. P. 1960–1972. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2006.07.027.

Malandrino M., Abollino O., Giacomino A., Aceto M., Mentasti E. Adsorption of heavy metals on vermiculite: influence of pH and organic ligands // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2006. Vol. 299. No 2. P. 537–546. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.03.011.

McBride M. B. Reactions controlling heavy metal solubility in soils // *Adv. Soil Sci.* 1989. Vol. 10. P. 1–56. DOI: 10.1007/978-1-4613-8847-0_1.

Sims J. T. Soil pH effects on the distribution and plant availability of manganese, copper, and zinc // *Soil Science Society of America Journal*. 1986. Vol. 50. No 2. P. 367–373.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за информационную поддержку руководителю ФГБУ ГЦАС «Кировский» Молодкину Владимиру Николаевичу.

LIVESTOCK COMPLEXES AS SOURCES OF ENVIRONMENTAL POLLUTION WITH HEAVY METALS (CU, ZN)

PILIP Larisa Valentinovna *Ph.D., Vyatka State Agrotechnological University, pilip_larisa@mail.ru*

SYRCHINA Nadezhda Victorovna *Ph.D., Vyatka State University, nvms1956@mail.ru*

KUZNETSOV Dmitriy Alekseevich *postgraduate student, Vyatka State University, dimzaaa@gmail.com*

Keywords:
animal industry by-products
soil
trace elements
copper
zinc
heavy metals
environmental pollution

Summary: Trace elements Zn and Cu are widely used as part of vitamin-mineral complexes for animals. About 1/3 of the trace elements of the animal diet goes into manure – a by-product of animal industry (BPA). The intake of Zn and Cu into the environment as part of the BPA from a small farm for 500 cows can reach 42.7 and 6.4 kg per year, respectively. At that, most of the BPA goes into arable land, next to animal farms. Studies of the effect of cattle manure on the content of Zn and Cu were carried out on the territory adjacent to the lagoons for the neutralization of the liquid fraction of manure effluents. It was found that in the arable land fertilized by BPA (clay soil), there was an accumulation of total forms of Si and Zn by 7 and 2.3 times, respectively, in comparison with the control. The content of mobile Cu in arable land increased by 16 times compared to the control, and the content of mobile Zn practically did not change. The detected level of trace elements in the soil did not exceed the established norms. However, the accumulation of total forms of Zn and Cu indicates that the intake of the corresponding elements from the BPA (even when using organic fertilizers in agrochemically-sound rate) exceeds their removal with the harvest of forage crops. The results of the research give reason to assume that the main contribution to the processes of mobilization /immobilization of Cu is a complex formation with organic ligands, as for Zn, it is binding on the negatively charged surface of clay particles. To prevent the possibility of contamination of territories adjacent to livestock enterprises with Zn and Cu, it is necessary to monitor the dynamics of the intake and current content of these elements in the soil.

Reviewer: V. I. Kulagina

Received on: 02 December 2023

Published on: 15 April 2023

References

- Andreev A. I. Men'kova A. A. Kostromkina N. V. Assimilation of manganese, copper and zinc during the haylage type of feeding of heifer replacement, *Izvestiya OGAU*. 2022. N 4 (96). P. 290–293. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/usvoenie-margantsa-medi-i-tsinka-pri-senazhnom-tipe-kormleniya-remontnyh-tyolok> (data obrascheniya: 21.11.2022).
- Fijałkowski K., Kacprzak M., Grobelak A., Placek A. The influence of selected soil parameters on the mobility of heavy metals in soil, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*. 2012. Vol. 15. No 1. R. 81–92. URL: https://www.researchgate.net/publication/282734701_The_influence_of_selected_soil_parameters_on_the_mobility_of_heavy_metals_in_soil (data obrascheniya: 22.11.2022).
- Garcia-Mina J. M. Stability, solubility and maximum metal binding capacity in metal–humic complexes involving humic substances extracted from peat and organic compost, *Organic Geochemistry*. 2006. Vol. 37. No 12. P. 1960–1972. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2006.07.027.
- Malandrino M., Abollino O., Giacomino A., Aceto M., Mentasti E. Adsorption of heavy metals on vermiculite: influence of pH and organic ligands, *Journal of Colloid and Interface Science*. 2006. Vol. 299. No 2. P. 537–546. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.03.011.
- Markina E. O. Grigor'ev V. V. Syrchina N. V. Influence of various additives on the mobility of heavy metals in

- soils, *Ekologiya rodnogo kraja: problemy i puti resheniya: Materialy Vserop. nauchno-prakticheskoy konf.s mezhdunar.uchastiem*. Kirov: OOO «Raduga-PRESS», 2016. P. 87–90.
- McBride M. B. Reactions controlling heavy metal solubility in soils, *Adv. Soil Sci.* 1989. Vol. 10. P. 1–56. DOI: 10.1007/978-1-4613-8847-0_1.
- Pilip L. V. Kozvonin V. A. Syrchina N. V. Kolevatyh E. P. Ashihmina T. Ya. The effect of acidifying of manure effluent on their microbiological characteristics, *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2020. N 3. P. 161–167. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-3-161-167.
- Pilip L. V. Syrchina N. V. Ashihmina T. Ya. Industrial pig farms as sources of environmental pollution with heavy metals, *Izvestiya Komi nauchnogo centra UrO RAN*. 2021. N 5 (51). P. 88–91.
- Pilip L. V. Syrchina N. V. Environmental problem of the pig industry, *Agrarnaya nauka - sel'skomu hozyaystvu: Sbornik materialov XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii*. Kniga 2. Barnaul: Altayskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet. 2019. P. 193–196.
- Pozvyaylo O. P. Kotovich I. V. Kopat' N. V. Zaycev S. Yu. Dynamics of mineral metabolism indicators in first-calf heifers during the lactation period, *Vesnik MDPU imya I. P. Shamyakina*. 2016. N 1 (47). P. 68–75. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-pokazateley-mineralnogo-obmena-u-korov-pervotelok-v-techenie-laktatsionnogo-perioda> (data obrascheniya: 23.11.2022).
- Sims J. T. Soil pH effects on the distribution and plant availability of manganese, copper, and zinc, *Soil Science Society of America Journal*. 1986. Vol. 50. No 2. P. 367–373.
- Syrchina N. V. Pilip L. V. Ashihmina T. Ya. Chemical land degradation under the influence of animal husbandry waste, *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2022. No 3. P. 219–225. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-3-219-225.
- Vasbieva M. T. Change of agrochemical properties in soddy-podzolic soil owing to long-term application of fertilizers, *Pochvovedenie*. 2021. N 1. P. 90–99. DOI: 10.31857/S0032180X21010135.
- Vodyanickiy Yu. N. Affinity of heavy metals and metalloids for phase-carriers in soils, *Agrohimiya*. 2008. N 9. P. 87–94.