

Научная статья

УДК 502.55: 631.147: 633.39

DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-53-64

Аккумуляция кадмия в зеленой массе кукурузы на удобряемых навозом почвах

Лариса Валентиновна Пилип¹✉, Надежда Викторовна Сырчина²

¹Вятский государственный агротехнологический университет, Киров, Россия

²Вятский государственный университет, Киров, Россия

¹pilip_larisa@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0001-9695-7146>

²nvms1956@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8049-6760>

Аннотация. Почвы, загрязненные тяжелыми металлами, становятся непригодными для выращивания экологически безопасной продукции. К числу наиболее опасных экотоксикантов относится кадмий (Cd). Его содержание подлежит обязательному нормированию в почве, сельскохозяйственном сырье, кормах и продуктах питания. В пахотные почвы Cd поступает в том числе и в составе навоза. Настоящее исследование посвящено изучению влияния систематического внесения высоких норм традиционных органических удобрений (жидких фракций свиного навоза и навоза крупного рогатого скота) на накопление Cd в почве и растениеводческой продукции (зеленой массе кукурузы). В результате исследований установлено, что многолетнее внесение значительных норм (~200–250 т/га) навозных стоков приводит к увеличению содержания валового и подвижного Cd в агродерново-подзолистых почвах. При оценке рисков загрязнения растениеводческой продукции Cd важно учитывать соотношение pH и органического вещества в агроземе. Наиболее активная биоаккумуляция Cd происходит в кислых почвах с низким содержанием органического вещества. Внесение навоза в нейтральные или слабощелочные почвы способствует образованию мобильных, но малодоступных для растений фульватных комплексов. Коэффициент биологического поглощения Cd для зеленой массы кукурузы, выращиваемой на удобряемых навозными стоками полях, составляет 1,5–2,0, что свидетельствует о биогенной аккумуляции соответствующего тяжелого металла. Зависимость значения коэффициента биологического поглощения от свойств почвы незначительна. Коэффициент биогеохимического поглощения Cd зеленой массой кукурузы изменяется в более широких пределах (от 2 до 9) и существенно зависит от свойств почвы. Наиболее высокий уровень коэффициента биогеохимического поглощения выявлен для кислых агродерново-подзолистых почв.

Ключевые слова: кадмий, почвы, кукуруза, аккумуляция кадмия, навозные стоки.

Для цитирования: Пилип Л. В., Сырчина Н. В. Аккумуляция кадмия в зеленой массе кукурузы на удобряемых навозом почвах // Известия КГТУ. 2025. № 78. С. 53–64. DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-53-64.

Original article

Accumulation of cadmium in green mass of corn on soils fertilized with manure

Larisa V. Pilip¹✉, Nadezhda V. Syrchina²

¹Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russia

²Vyatka State University, Kirov, Russia

¹pilip_larisa@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0001-9695-7146>

²nvms1956@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8049-6760>

Abstract. Soils contaminated with heavy metals become unsuitable for growing environmentally friendly products. Cadmium (Cd) is one of the most dangerous ecotoxins. The Cd content is subject to mandatory standardization in soil, agricultural raw materials, feed and food products. Cadmium enters arable fields, including as part of manure. This study is devoted to the investigation of the effect of systematic application of high rates of traditional organic fertilizers (liquid fractions of pig manure and cattle manure) on the accumulation of Cd in soil and plant products (green mass of corn). As a result of research, it has been established that long-term application of significant rates (~200–250 tons per hectare) of manure effluents leads to an increase in the content of total and mobile Cd in agrosoddy-podzolic soils. When assessing the risks of Cd pollution of plant products, it is important to take into account the ratio of pH and organic matter in agrozem. The most active bioaccumulation of Cd occurs in acidic soils with a low content of organic matter. Application of manure to neutral or slightly alkaline soils promotes the formation of mobile, but poorly accessible to plants fulvic complexes. The coefficient of biological absorption of Cd for the green mass of corn grown on fields fertilized with manure effluents is 1.5–2.0, which indicates biogenic accumulation of the corresponding heavy metal. The dependence of the value of the biological absorption coefficient on soil properties is insignificant. The coefficient of biogeochemical absorption of Cd by the green mass of corn varies within a wider range (from 2 to 9) and significantly depends on soil properties. The highest level of the biogeochemical absorption coefficient has been found for acidic agro-sod-podzolic soils.

Key words: cadmium, soils, corn, cadmium accumulation, manure effluents.

For citation: Pilip L. V., Syrchina N. V. Accumulation of cadmium in green mass of corn on soils fertilized with manure. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(78):53–64. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-53-64.

ВВЕДЕНИЕ

Защита окружающей среды от химического загрязнения является важной экологической задачей. Рост численности населения и активное развитие промышленного и сельскохозяйственного производства способствуют переносу и

рассеиванию тяжелых металлов (ТМ) в окружающей среде. ТМ не способны к биодegradации, поэтому территории, подверженные многолетнему техногенному и агрогенному загрязнению, становятся зонами повышенного экологического риска [1, 2]. К числу наиболее опасных для окружающей среды и человека ТМ относится кадмий (Cd) – токсикант первого класса опасности. Содержание Cd в продовольственном сырье, продуктах питания, кормах для животных и почве относится к нормируемым показателям, характеризующим их безопасность [3, 4]. Соединения Cd являются токсичными практически для всех живых организмов. Острое и хроническое отравление человека этим элементом приводит к поражению почек, сердечно-сосудистой и репродуктивной систем, разрушению костной ткани, онкозаболеваниям. Экологическая опасность Cd усугубляется высокой подвижностью (мобильностью) данного элемента в почве и водной среде, а также его способностью легко передаваться по пищевым цепям и накапливаться в организмах растений и животных.

Основным источником поступления Cd в растительные объекты является почва. Загрязнение почвы Cd во многом обусловлено техногенными факторами. Соединения этого металла содержатся в выбросах предприятий теплоэнергетической сферы, автотранспорта, лакокрасочного производства, горнодобывающей и металлургической промышленности, цементных заводов, в складированных на свалках и полигонах отходах. В пахотные почвы Cd поступает в составе фосфорных удобрений, известняковых мелиорантов, некоторых пестицидов, а также используемых в качестве удобрений золы, осадков сточных вод, навоза [4, 5]. Особую опасность для пахотных земель представляет свиной навоз (СН), вносимый в пашню в значительных нормах [6]. Опубликованы данные, согласно которым длительное (17 лет) внесение высоких норм соответствующего удобрения привело к повышению содержания валового Cd в верхнем горизонте пахотной почвы в 17–19 раз [7]. Высокое содержание Cd в СН обусловлено широким применением минеральных добавок, включаемых в рацион животных [8]. Для снижения экологической опасности СН как органического удобрения большое значение имеют такие факторы, как контроль содержания Cd в кормовых добавках и навозе, а также корректирование норм внесения соответствующего удобрения в почву [9].

По абсолютному содержанию в растениях Cd относится к элементам низкой концентрации [10]. Коэффициент биологического поглощения соответствующего ТМ обычно близок к 1, но может существенно изменяться в зависимости от вида и условий выращивания растений [11]. Повышенной способностью к аккумуляции Cd отличается рис, активно поглощающий этот элемент из загрязненных почв, а также многие овощи [12, 13].

Для защиты сельскохозяйственных культур от загрязнения кадмием разработаны такие технологии, как промывка, цементирование или замена загрязненного корнеобитаемого слоя чистой почвой, использование сортов с пониженной способностью к аккумуляции Cd, оптимизация системы удобрений, применение приемов биоремедиации и др. Определенный положительный эффект обеспечивает внесение в почву натуральных сорбентов (например, биоугля), а также регуляторов кислотности. Основными недостатками соответствующих технологий являются высокая трудоемкость, чрезмерный уровень материальных затрат, вывод обрабатываемых площадей из хозяйственного оборота на

продолжительный период времени, что существенно ограничивает возможность их широкого внедрения в практику [14, 15].

В складывающихся условиях особую актуальность и практическую значимость представляют исследования, направленные на мониторинг содержания Cd в почве и растениях, а также изучение и оценку факторов, влияющих на аккумуляцию этого ТМ в почве и растительных объектах.

Цель работы – выявить влияние систематического внесения высоких норм традиционных органических удобрений (жидких фракций свиного навоза и навоза крупного рогатого скота) на накопление Cd в почве и растениеводческой продукции (зеленой массе кукурузы).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводили на примере двух пахотных полей, расположенных в Кировской области вблизи систем накопления и обезвреживания жидкой фракции навозных стоков (лагунах) крупных животноводческих предприятий. Почва (агрозем) – агродерново-подзолистая, суглинистая, тип севооборота – полевой. Обезвреженную в лагунах жидкую фракцию (ЖФ) навозных стоков (НС) в период обработки почвы (весна и осень) вносили в пашню. Глубина внесения – 50 см, способ внесения – буксируемая шланговая система, продолжительность внесения – 8 лет. Пашню первого поля (Поле 1) удобряли ЖФ свиных НС, пашню второго поля (Поле 2) – ЖФ НС крупного рогатого скота (КРС). Нормы и сроки внесения удобрений в пашню определяли агрохимические службы соответствующих животноводческих предприятий на основании данных о содержании в агроземе и в обезвреженной ЖФ азота. Среднегодовое внесение ЖФ в пашню варьировало от 220 до 280 т/га. В год отбора проб и в предыдущий год оба поля использовали для выращивания кукурузы на силос.

Пробы агрозема и зеленой массы кукурузы (ЗМК 1 и ЗМК 2) для проведения лабораторных исследований отбирали одновременно. Агрозем отбирали из пахотного горизонта с помощью тростевого бура согласно ГОСТ Р 58595-2019, ЗМК – в соответствии с «Методическими указаниями по оценке качества и питательности кормов» [16]. На каждом удобряемом поле было отобрано по 40 точечных проб агрозема. Расстояние между точками отбора – 10 м. Для проведения химического анализа использовали объединенные пробы (5 проб).

Контрольные (фоновые) образцы дерново-подзолистой суглинистой почвы (Контроль 1 и Контроль 2) отбирали на заросших кустарником и травянистой растительностью территориях, расположенных несколько выше по профилю, чем пашня. Расстояние от точек отбора контрольных образцов почвы до границ пашни составляло 400 м. Хозяйственная деятельность на фоновых территориях на протяжении последних десятилетий (не менее 50 лет) не проводилась. Пробы почвы на фоновых участках отбирали методом конверта (по 5 проб с каждого участка размером 100 м²). Для отбора проб использовали тростевой бур, глубина отбора – 30 см.

Пробы ЗМК (средняя часть стебля с листьями) отбирали в середине сентября перед уборкой урожая. Учетные площадки (УП) для отбора проб были

расположены по диагонали поля. Площадь каждой УП – 2 м², количество УП – 12, масса каждой точечной пробы – 0,5 кг. Для химического анализа использовали по 3 объединенные пробы ЗМК с каждого поля.

Химический анализ проводили через 5 суток после отбора проб согласно действующим стандартам (табл. 1). Определение содержания валового и подвижного Cd в пробах почвы выполняли по ФР 1.31.2018.31189, в пробах ЗМК – по ГОСТ 32343-2013. Метод анализа – атомно-абсорбционный. Для извлечения подвижных форм Cd (Cd_{подв.}) применяли ацетатно-аммонийный буферный раствор с pH=4,8.

Для оценки биогенной аккумуляции Cd использовали коэффициент биологического поглощения (КБП), который рассчитывали по формуле: КБП = С_к/С_в [17]; оценку доступности Cd для растений проводили с помощью коэффициента биогеохимической подвижности (КБХП) по формуле: КБХП = С_к/С_п [18], где С_к – концентрация (мг/кг) Cd в воздушно-сухой ЗМК, С_в – концентрация (мг/кг) валового Cd (Cd_{вал.}) в воздушно-сухом агроземе, С_п – концентрация (мг/кг) Cd_{подв.} в воздушно-сухом агроземе.

Статистическую обработку результатов анализа (расчет средних значений и стандартных отклонений) выполняли в программе Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты агрохимического анализа удобряемой почвы и почвы контрольных участков приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика отобранных образцов почвы
Table 1. Characteristics of the selected soil samples

Показатель	Контроль 1	Поле 1	Контроль 2	Поле 2	Метод анализа
pH водный	6,6±0,2	7,6±0,2*	4,0±0,2	5,3±0,2	ГОСТ 26483-85
Органическое вещество, %	2,2±0,4	6,0±1,2	2,1±0,4	7,2±1,6	ГОСТ 23740-2016
P ₂ O ₅ подвижный, мг/кг	175±40	1060±180	116±34	920±140	ГОСТ Р 54650-2011
K ₂ O обменный, мг/кг	130±20	850±120	120±15	660±110	ГОСТ Р 54650-2011
N общий, мг/кг	480±90	1250±420	400±70	530±110	ГОСТ Р 58596-2019

Примечание: *Полужирным шрифтом выделены статистически значимые отличия свойств агрозема от аналогичных свойств почвы контрольных участков (p<0,05).

Выполненные исследования показали, что систематическое внесение ЖФ в агродерново-подзолистую почву привело к накоплению органического вещества и увеличению таких показателей, как pH водный, N общий, P₂O₅ подвижный, K₂O обменный. Наиболее значительный рост мобильности фосфора вызвало внесение ЖФ навозных стоков КРС (в 8 раз по сравнению с контролем). На мобильность

калия в большей степени повлияла ЖФ свиных НС. Кислотность агрозема, по сравнению с кислотностью почвы фоновых участков, снизилась. Все выявленные отличия статистически значимы.

Результаты исследований, характеризующие содержание Cd в пробах агрозема и ЗМК, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Содержание разных форм кадмия в образцах агрозема и зеленой массы кукурузы

Table 2. Content of different forms of cadmium in samples of agrozem and green mass of corn

Объект	Содержание Cd	
	валовый	подвижные формы
Контроль 1	0,007±0,002	<ПО**
Поле 1	0,090±0,027*	0,067±0,020
ЗМК 1	0,180±0,063	не определяли
Контроль 2	0,038±0,011	<ПО
Поле 2	0,095±0,029	0,016±0,004
ЗМК 2	0,144±0,050	не определяли

Примечание: *Полужирным шрифтом выделены статистически значимые отличия показателей почвы пахотных полей от соответствующих показателей почвы контрольных участков ($p < 0,05$);

** ПО – предел обнаружения.

Согласно результатам исследований, содержание Cd в почве всех обследованных участков соответствовало требованиям СанПиН 1.2.3685-21 (ОДК Cd в суглинистых нейтральных и близких к нейтральным почвах – 2,0 мг/кг). Однако более высокое содержание валового и подвижного Cd в агроземе, по сравнению с почвой фоновых участков, свидетельствует о тенденции к загрязнению пашни соответствующим ТМ. В пробах агрозема «Поле 1» доля подвижных форм Cd достигала 70 % от валового уровня, в пробах агрозема «Поле 2» соответствующий показатель был ниже и составлял 17 %. Выявленное различие в подвижности Cd может быть обусловлено более высокими значениями таких показателей, как «содержание органического вещества» и «рН» почвы «Поле 1», по сравнению с почвой «Поле 2». Известно, что для Cd характерна значительная органофильность, т. е. способность образовывать устойчивые комплексы с органическими компонентами почвы [19, 20, 21]. Снижение кислотности способствует увеличению степени диссоциации (депротонированию) кислотных групп органических лигандов. Отрыв протона (H^+) приводит к увеличению отрицательного заряда на лигандах и, соответственно, к возрастанию их способности связывать катионы ТМ. Особенно это касается ТМ, характеризующихся выраженной органофильностью. Большое количество кислотных групп характерно для гуминовых веществ, в частности для весьма подвижных фульвокислот, которыми богаты удобряемые навозом почвы. Образование устойчивых растворимых комплексов с фульвокислотами приводит к переходу органофильного Cd в мобильную форму. Увеличение подвижности Cd за счет образования растворимых комплексов с органическими лигандами может

способствовать детоксикации почв за счет миграции соответствующего ТМ с атмосферными осадками в более глубокие горизонты почвенного профиля.

Содержание Cd в пробах ЗМК, отобранных на разных полях, было ниже предела, установленного для сочных кормов (0,3 мг/кг) [22]. В образцах ЗМК 1 концентрация Cd была несколько выше, чем в образцах ЗМК 2 (различие статистически не значимо).

В табл. 3 приведены значения коэффициентов биологического поглощения и биогеохимической активности Cd для отобранных проб ЗМК.

Таблица 3. Значения коэффициентов биологического поглощения и биогеохимической подвижности кадмия

Table 3. Values of biological absorption coefficients and biogeochemical mobility of cadmium

Показатель	Образцы исследования	
	ЗМК 1	ЗМК 2
Коэффициент биологического поглощения (КБП)	2,0	1,5
Коэффициент биогеохимической подвижности (КБХП)	2,7	9,0

Согласно полученным данным, КБП Cd в ЗМК, выращенной на разных по химическому составу почвах, был выше единицы, что свидетельствует о накоплении соответствующего элемента в зеленой массе растений.

Поскольку растениям доступны только подвижные формы, для более корректного отражения интенсивности поглощения металлов из почвы используют показатель КБХП [23, 24]. Коэффициент биохимического поглощения Cd зеленой массой кукурузы в более кислой почве (Поле 2) оказался в 7,5 раз выше, чем в слабощелочной (Поле 1). Возможно, данный эффект обусловлен тем, что в щелочных почвах Cd образует подвижные, но труднодоступные для поглощения комплексные соединения с крупными органическими лигандами, а в кислых почвах – легкодоступные аквакомплексы, то есть поглощение Cd растениями зависит не столько от подвижности данного элемента в почвах, сколько от того, с какими лигандами связан данный катион.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Долговременное внесение навозных стоков приводит к постепенному накоплению валовых и подвижных форм Cd в пахотном горизонте почвы. Увеличению мобильности Cd способствует значительное содержание вносимых с навозными стоками органических веществ и повышенный уровень pH (>7,0). Соответствующие условия способствуют образованию устойчивых и хорошо растворимых комплексов соответствующего металла с некоторыми органическими лигандами, в частности фульвокислотами.

Коэффициент биологического поглощения Cd в удобряемых навозными стоками почвах варьировал от 1,5 до 2,0, что свидетельствует о биоаккумуляции данного ТМ в зеленой массе кукурузы.

Коэффициент биогеохимической подвижности, характеризующий доступность Cd для растений, изменялся в более широких пределах – от 2,7 в близкой к нейтральной почве (pH=7,6) до 9,0 в кислой (pH=5,3). Таким образом, повышение уровня кислотности почв является фактором риска загрязнения ЗМК кадмием.

Результаты работы свидетельствуют об отсутствии прямой зависимости между содержанием подвижных форм Cd в почве и накоплением этого металла в ЗМК. При оценке рисков загрязнения растениеводческой продукции Cd необходимо учитывать соотношение pH и органического вещества в агроземе. Наиболее активная биоаккумуляция Cd происходит в кислых почвах с низким содержанием органического вещества. Внесение навоза в нейтральные или слабощелочные почвы способствует образованию мобильных, но малодоступных для растений фульватных комплексов. Высокая устойчивость и значительные размеры соответствующих координационных соединений затрудняют абсорбцию катионов Cd^{2+} корневой системой растений.

Эффект повышения мобильности Cd в нейтральных, удобряемых навозом почвах может найти практическое применение для детоксикации загрязненных соответствующим ТМ территорий. Внесение раскислителей (например, известковых материалов) на фоне высоких норм органических удобрений обеспечивает хорошие условия для миграции Cd из корнеобитаемого горизонта в более глубокие слои почвенного профиля, что снижает риски загрязнения растениеводческой продукции соответствующим ТМ.

Список источников

1. Пилип, Л. В. Анализ экологических рисков отрасли свиноводства в Кировской области / Л. В. Пилип // Вестник Вятской ГСХА. – 2020. – № 1 (3). – С. 1–5.
2. Пилип, Л. В. Животноводческие комплексы как источники загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами (Cu, Zn) / Л. В. Пилип, Н. В. Сырчина, Д. А. Кузнецов // Принципы экологии. – 2023. – № 1 (47). – С. 82–89, <https://doi.org/10.15393/j1.art.2023.13182>.
3. Валл, Е. В. Содержание тяжелых металлов в реках Калининградской области / Е. В. Валл, Н. Р. Ахмедова // Известия КГТУ. – 2022. – № 67. – С. 11–20, <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-67-11-20>.
4. Пилип, Л. В. Промышленные свинокомплексы как источники загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами / Л. В. Пилип, Н. В. Сырчина, Т. Я. Ашихмина // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2021. – № 5 (51). – С. 88–91, <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2021-5-88-91>.
5. Пилип, Л. В. Влияние мелиорантов на подвижность кадмия в почвах / Л. В. Пилип, Н. В. Сырчина // Российский журнал прикладной экологии. – 2023. – № 4 (36). – С. 60–66, <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.60.66>.
6. Сырчина, Н. В. Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства / Н. В. Сырчина, Л. В. Пилип, Т. Я. Ашихмина // Теоретическая и прикладная экология. – 2022. – № 3. – С. 219–225, <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-219-225>.

7. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure / L. Wu et al. // *Geoderma*. 2012. V. 173. P. 224–230, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.003>.
8. Potential risk of cadmium in a soil-plant system as a result of long-term (10 years) pig manure application / Y. G. Xu et al. // *Plant Soil Environ*. 2015. V. 61. N 8. P. 352–357, <https://doi.org/10.17221/100/2015-PSE>.
9. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective / S. O. Petersen et al. // *Livestock science*. 2007. V. 112. N 3. P. 180–191, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.09.001>.
10. Матвеев, Н. М. Тяжелые металлы в почвах и растениях в условиях техногенеза / Н. М. Матвеев, Н. В. Прохорова // *Вестник СамГУ*. – 1996. – Специальный выпуск. – С. 125–147.
11. Добровольский, В. В. Основы биогеохимии / В. В. Добровольский. – Москва: Высшая школа, 1998. – 413 с. – ISBN 5-06-003-112-8.
12. Lead and cadmium contamination and exposure risk assessment via consumption of vegetables grown in agricultural soils of five-selected regions of Pakistan / Z. U. Rehman et al. // *Chemosphere*. 2017. V. 168. P. 1589–1596, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.152>.
13. Potential risks of copper, zinc, and cadmium pollution due to pig manure application in a soil–rice system under intensive farming: a case study of Nanhu, China / J. Shi et al. // *Journal of Environmental Quality*. 2011. V. 40. N 6. P. 1695–1704, <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0316>.
14. Environmental pollution induced by heavy metal (loid) s from pig farming / Z. Feng et al. // *Environmental earth sciences*. 2018. V. 77. P. 1–10, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7300-2>.
15. Regulatory mechanisms of nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: a review / Y. Yang et al. // *Science of the Total Environment*. 2020. V. 708. N 1. P. 135186. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135186>.
16. Методические указания по оценке качества и питательности кормов. – Москва: ЦИНАО, 2002. – 76 с.
17. Дьяконов, К. Н. Современные методы географических исследований / К. Н. Дьяконов, Н. С. Касимов, В. С. Тикунов. – Москва: Просвещение, 1996. – 205 с. – ISBN 5-09-004-567-4.
18. Перельман, А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман. – Москва: Высшая школа, 1999. – 62 с. – ISBN 5-7594-0077-0.
19. Водяницкий, Ю. Н. Сродство тяжелых металлов и металлоидов к фазам-носителям в почвах / Ю. Н. Водяницкий // *Агрохимия*. – 2008. – № 9. – С. 87–94.
20. Медведев, И. Ф. Тяжелые металлы в экосистемах / И. Ф. Медведев, С. С. Деревягин. – Саратов: Ракурс, 2017. – 178 с. – ISBN 978-5-97-58-1665-8.
21. Сырчина, Н. В. Влияние органических удобрений на содержание микроэлементов в зеленой массе кукурузы / Н. В. Сырчина, Л. В. Пилип, Т. Я. Ашихмина // *Химия растительного сырья*. – 2024. – № 1. – С. 372–380, <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240112298>.
22. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках // Библиотека

нормативной документации [сайт]. – URL:
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293725/4293725464.htm> (дата обращения:
08.01.2025).

23. Енчилик, П. Р. Биологическое поглощение и биогеохимическая подвижность микроэлементов в лесных ландшафтах Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника / П. Р. Енчилик, Е. Н. Асеева, И. Н. Семенов // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 4. – С. 93–98, <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14093>.

24. Effect of Organic Matter on Distribution of Chemical Forms of Cadmium in Soil in Corn Rhizosphere / F. Lotfi et al. // Water and soil. 2018. V. 31. N 6. P. 1611–1622, <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i5.60064>.

References

1. Pilip L. V. Analiz ekologicheskikh riskov otrasli svinovodstva v Kirovskoy oblasti [Analysis of environmental risks of the pig industry in the Kirov region]. *Vestnik Vyatskoy GSKhA*, 2020, no. 1 (3), pp. 1–5.

2. Pilip L. V., Syrchina N. V., Kuznetsov D. A. Zhivotnovodcheskie komplekсы как istochniki zagryazneniya okruzhayushchey sredy tyazhelymi metallami (Cu, Zn) [Livestock complexes as sources of environmental pollution with heavy metals (Cu, Zn)]. *Printsipy ekologii*, 2023, no. 1(47), pp. 82–89, <https://doi.org/10.15393/j1.art.2023.13182>.

3. Vall E. V., Akhmedova N. R. Soderzhanie tyazhelykh metallov v rekakh Kaliningradskoy oblasti [Content of heavy metals in the rivers of the Kaliningrad region]. *Izvestiya KGTU*, 2022, no. 67, pp. 11–20, <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-67-11-20>.

4. Pilip L. V., Syrchina N. V., Ashikhmina T. Ya. Promyshlennyye svinokomplekсы как istochniki zagryazneniya okruzhayushchey sredy tyazhelymi metallami [Industrial pig farms as sources of environmental pollution with heavy metals]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra Uralskogo otdeleniya Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2021, no. 5(51), pp. 88–91, <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2021-5-88-91>.

5. Pilip L. V., Syrchina N. V. Vliyanie meliorantov na podvizhnost' kadmiya v pochvakh [Effect of meliorants on cadmium mobility in soils]. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*. 2023, no. 4(36), pp. 60–66, <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.60.66>.

6. Syrchina, N. V., Pilip L. V., Ashikhmina T. Ya. Khimicheskaya degradatsiya zemel pod vozdeystviem otkhodov zhivotnovodstva [Chemical degradation of land under the influence of animal husbandry waste]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2022, no. 3, pp. 219–225, <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-219-225>.

7. Wu L. et al. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure. *Geoderma*. 2012. V. 173. P. 224–230, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.003>.

8. Xu Y. G. et al. Potential risk of cadmium in a soil-plant system as a result of long-term (10 years) pig manure application. *Plant Soil Environ*. 2015. V. 61. N 8. P. 352–357, <https://doi.org/10.17221/100/2015-PSE>.

9. Petersen S. O. et al. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective. *Livestock science*. 2007. V. 112. N 3. P. 180–191, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.09.001>.
10. Matveev N. M., Prokhorova N. V. Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh v usloviyakh tekhnogeneza [Heavy metals in soils and plants under technogenesis conditions]. *Vestnik SamGU*, 1996, Spetsial'nyy vypusk, pp. 125–147.
11. Dobrovolskiy V. V. *Osnovy biogeokhimii* [Fundamentals of Biogeochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola, 1998. 413 p.
12. Rehman Z. U. et al. Lead and cadmium contamination and exposure risk assessment via consumption of vegetables grown in agricultural soils of five-selected regions of Pakistan. *Chemosphere*. 2017. V. 168. P. 1589–1596, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.152>.
13. Shi J. et al. Potential risks of copper, zinc, and cadmium pollution due to pig manure application in a soil–rice system under intensive farming: a case study of Nanhu, China. *Journal of Environmental Quality*. 2011. V. 40. N 6. P. 1695–1704, <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0316>.
14. Feng Z. et al. Environmental pollution induced by heavy metal (loid) s from pig farming. *Environmental earth sciences*. 2018. V. 77. P. 1–10, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7300-2>.
15. Yang Y. et al. Regulatory mechanisms of nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: a review. *Science of the Total Environment*. 2020. V. 708. N 1. P. 135186, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135186>.
16. *Metodicheskie ukazaniya po otsenke kachestva i pitatelnosti kormov* [Guidelines for assessing the quality and nutritional value of feed]. Moscow, TsINA O, 2002, 76 p.
17. D'yakonov K. N., Kasimov N. S., Tikunov V. S. *Sovremennyye metody geograficheskikh issledovaniy* [Modern methods of geographical research]. Moscow, Prosveshchenie, 1996, 205 p.
18. Perel'man A. I. *Geokhimiya landshafta* [Geochemistry in the landscape]. Moscow, Vysshaya shkola, 1999, 62 p.
19. Vodyanitskiy Yu. N. Srodstvo tyazhelykh metallov i metalloidov k fazam-nositelyam v pochvakh [Affinity of heavy metals and metalloids to carrier phases in soils]. *Agrokhiimiya*, 2008, no. 9, pp. 87–94.
20. Medvedev I. F., Derevyagin S. S. *Tyazhelye metally v ekosistemakh* [Heavy metals in ecosystems]. Saratov, Rakurs Publ., 2017. 178 p.
21. Syrchina, N. V., Pilip L. V., Ashikhmina T. Ya. Vliyanie organicheskikh udobreniy na sodержание mikroelementov v zelenoy masse kukuruzy [The effect of organic fertilizers on the content of trace elements in the green mass of corn]. *Khiimiya rastitelnogo syrya*, 2024, no. 1, pp. 372–380, <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240112298>.
22. Vremennyy maksimalno dopustimyy uroven' (MDU) sodержaniya nekotorykh khimicheskikh elementov i gossipola v kormakh dlya selskokhozyaystvennykh zhivotnykh i kormovykh dobavkakh [Temporary maximum permissible levels (MRL) of certain chemical elements and gossypol in feed for farm animals and feed additives]. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293725/4293725464.htm> (accessed 8 January 2025).

23. Enchilik P. R., Aseeva E. N., Semenov I. N. Biologicheskoe pogloshchenie i biogeokhimicheskaya podvizhnost' mikroelementov v lesnykh landshaftakh Tsentral'no-Lesnogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika [Biological uptake and biogeochemical mobility of microelements in forest landscapes of the central forest state biosphere nature reserve]. *Problemy regionalnoy ekologii*, 2018, no. 4, pp. 93–98, <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14093>.

24. Lotfi F. et al. Effect of Organic Matter on Distribution of Chemical Forms of Cadmium in Soil in Corn Rhizosphere. *Water and soil*. 2018. V. 31. N 6. P. 1611–1622, <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i5.60064>.

Информация об авторах

Л. В. Пилип – кандидат ветеринарных наук, доцент

Н. В. Сырчина – кандидат химических наук, доцент, старший научный сотрудник

Information about the authors

L. V. Pilip – PhD in Veterinary, Associate Professor

N. V. Syrchina – PhD in Chemistry, Associate Professor, Senior Researcher

Статья поступила в редакцию 09.04.2025; одобрена после рецензирования 10.04.2025; принята к публикации 20.05.2025.

The article was submitted 09.04.2025; approved after reviewing 10.04.2025; accepted for publication 20.05.2025.