

## ВЛИЯНИЕ МЕЛИОРАНТОВ НА ПОДВИЖНОСТЬ КАДМИЯ В ПОЧВАХ

В работе представлены результаты исследований содержания валовых и подвижных форм кадмия в дерново-подзолистых почвах, удобряемых высокими нормами жидкой фракции навозных стоков, и в почве контрольных участков. Содержание валового Cd в почве контрольных участков составляло 0.01–0.04 мг/кг, а в обрабатываемых почвах 0.09–0.10 мг/кг, что свидетельствует о его накоплении в корнеобитаемом слое. Для сельскохозяйственных почв характерно и более высокое содержание подвижного Cd. В лабораторном эксперименте изучено влияние известняковой муки и фосфоритов Верхнекамских бедных на подвижность Cd в разных по кислотности и содержанию органического вещества почвах. Установлено, что оба мелиоранта не оказывают существенного влияния на накопление подвижных форм кадмия, однако в образцах почвы с добавкой известняковой муки отмечалась тенденция к переходу Cd в подвижную форму. Через 8 недель после внесения добавок содержание подвижного Cd в образцах почвы с добавкой фосфоритов была ниже, чем в почве с добавкой известняковой муки. Полученные результаты показывают, что выбор мелиорантов для реабилитации загрязненных Cd почв имеет принципиальное значение.

*Ключевые слова:* навозные стоки; почвы; дерново-подзолистые почвыагро; кадмий, фосфориты Верхнекамские бедные; известняковая мука; почвенные мелиоранты.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.60.66>

### Введение

Кадмий входит в число наиболее токсичных тяжелых металлов (ТМ), представляющих значительную опасность для нормального развития и функционирования любых живых организмов. Механизм токсического действия Cd связан со способностью данного элемента необратимо ингибировать различные ферменты. Для Cd характерна высокая мобильность в природных средах, интенсивная биоаккумуляция, активная передача по пищевым цепям и низкая скорость выведения из органов и тканей. Основным ресурсом Cd в наземных экосистемах является почва (Cadmium ..., 1993), при этом его содержание в почвах тесно связано с хозяйственной деятельностью человека (Пилип и др., 2021; Силков, 2011). К ведущим источникам техногенного загрязнения окружающей среды этим металлом относят металлургические предприятия, тепловые электростанции, автотранспорт, производство электронных, полупроводниковых и электротехнических изделий, а также фосфорные удобрения, сырьем для которых служит богатая кадмием руда. Казалось бы, сельское хозяйство и животноводческие комплексы вносят незначительный вклад в загрязнение окружающей среды кадмием (Wu et al., 2012),

однако современное животноводство имеет свои особенности. Переход на промышленную основу привел к созданию крупных промышленных агрокомплексов, для которых характерна высокая концентрация поголовья на ограниченных площадях. Основное количество образующихся на животноводческих предприятиях навозных стоков (НС) чаще всего обезвреживают и в качестве удобрений вносят в расположенную поблизости (на расстоянии 5–10 км) пашню (Пилип, Ашихмина, 2017). Результатом подобной деятельности является изменение агрохимических характеристик почв, прежде всего уровня кислотности, содержания органического вещества, фосфора, калия и тяжелых металлов, а также биодоступности соответствующих элементов для растений (Пилип и др., 2023; Сырчина и др., 2022). Навоз сельскохозяйственных животных становится фактором, способствующим мобилизации металлов в почвах за счет процессов комплексообразования, ионного обмена, микробиологического выщелачивания. Особую опасность для окружающей среды представляет повышение мобильности таких токсичных элементов, включая Cd. Защита почв от кадмиевого загрязнения и ограничение подвижности этого элемента в почвах сельскохо-

зяйственного назначения входит в число наиболее важных и актуальных проблем современной экологии и агроэкологии.

Иммобилизации металлов в почвах способствует внесение известковых удобрений, фосфоритной муки (ФМ), сорбентов и других агрохимикатов, связывающих их в малорастворимые соединения (Волошин, Глазьев, 2003; Приемы повышения ..., 2021). Вместе с тем, применение некоторых агрохимикатов часто ограничено тем, что они сами являются источниками металлов. В частности, повышенное содержание Cd характерно для природных фосфоритов и известняков многих месторождений (Занин и др., 2000; Шумакова, 2011).

Анализ складывающейся ситуации показывает, что поиск новых эффективных и экологически безопасных натуральных мелиорантов для иммобилизации Cd в почвах является актуальной и практически значимой задачей.

Цель настоящей работы состояла в сравнительной оценке влияния фосфоритов Верхнекамских бедных и известняковой муки на содержание подвижных форм кадмия в пахотных почвах.

#### Материалы и методы исследования

Для проведения исследований использовали образцы фосфоритов Верхнекамских бедных (ФВБ), соответствующих ТУ 08.91.19-002-85629294-2020 и муку известняковую (МИ), производимую по ГОСТ 26826-86. Известняковая мука относится к традиционным почвенным мелиорантам, широко используемым для повышения плодородия почв. В отличие от МИ, ФВБ являются новым и недостаточно изученным агрохимикатом. Интерес к использованию ФВБ в качестве почвенных мелиорантов обусловлен особенностями их химического и минералогического состава, а также низким содержанием Cd и других токсичных элементов. Сырьем для производства ФВБ служат хвосты обогащения фосфоритной руды (ХОФ) Вятско-Камского месторождения, складированные на территории хвостохранилища Верхнекамского рудника. Поскольку для обогащения добываемой на месторождении руды применяли только безреагентные физические методы (грохочение и промывка), натуральный состав минеральных компонентов ХОФ полностью сохранился (Сырчина и др., 2020; Хузиахметов и др., 2022). Производство ФВБ осуществляют методом экскавирования ХОФ, таким образом, по составу и свойствам ФВБ и ХОФ практически идентичны. Результаты опубликованных исследований свидетельствуют о том, что ХОФ представляют большой интерес для сельского хозяйства и

могут найти применение в качестве натуральных фосфорно-калийных удобрений или почвенных мелиорантов, способствующих снижению кислотности и иммобилизации ТМ в почве (Корчагин, Романюк, 2011; Bruland, 1992).

Минералогический состав ФВБ представлен глауконитами (до 65%), фосфоритами мелких фракций, кварцевым песком, глинистыми и известковыми материалами. В используемых для проведения исследований образцах ФВБ содержание  $P_2O_5$  составляло  $5.8 \pm 0.3\%$ ,  $K_2O$  –  $3.2 \pm 0.2\%$ ; Ca (в пересчете на  $CaCO_3$ ) –  $3.8 \pm 0.3\%$ ; Cd –  $0.18 \pm 0.02$  мг/кг. По физическим характеристикам образцы ФВБ представляли собой однородный мелкозернистый сыпучий материал зеленовато-серого цвета. Для проведения исследований использовали ФВБ в молотом виде, содержание частиц размером  $< 0.18$  мм – 90%.

Состав МИ был представлен карбонатами кальция ( $91.2 \pm 1.1\%$ ) и магния ( $6.2 \pm 0.7\%$ ), содержание Cd составляло  $0.21 \pm 0.03$  мг/кг.

Изучение влияния ФВБ на подвижность Cd проводили на примере 4-х различных образцов дерново-подзолистых среднесуглинистых почвы, существенно различающихся между собой по величине pH и содержанию органического вещества. Именно эти показатели оказывают определяющее влияние на процессы иммобилизации/мобилизации Cd в почвах (Volan et al., 2014).

Точечные пробы почвы отбирали тростевым буром в соответствии с ГОСТ Р 58595–2019 с глубины 0–20 см на 2-х пахотных полях (опыт 1 и опыт 2) и на территориях, незатронутых хозяйственной деятельностью (контроль 1 и контроль 2), расположенных на расстоянии  $500 \pm 50$  м от границ пахотных полей (контроль 1 – зарастающий кустарником участок луга; контроль 2 – опушка леса). Необходимость отбора проб с двух контрольных участков была обусловлена значительным расстоянием между пахотными полями (не менее 15 км). Из точечных проб готовили объединенные пробы, которые использовали для проведения экспериментальных исследований.

Оба пахотных поля находились в непосредственной близости от животноводческих предприятий, не далее 3 км от помещений для содержания животных и лагун для хранения жидкой фракции навозных стоков (ЖНС). Первое поле удобряли откачиваемой из лагун ЖНС крупного рогатого скота (КРС), второе – ЖНС свиноводческого предприятия. Органические удобрения (ЖНС) вносили в пашню в значительных нормах (до  $200 \text{ м}^3/\text{га}$  в год) в течение не менее 7 лет. Поля использовали в кормовом севообороте.

Перед проведением исследований образцы

почв просеивали, высушивали до воздушно-сухого состояния и загружали в пластиковые контейнеры. В подготовленную почву вносили добавки МИ и ФВБ, перемешивали, увлажняли дистиллированной водой до влажности  $65 \pm 5\%$ , накрывали микроперфорированной полипропиленовой пленкой и выдерживали на протяжении всего эксперимента (8 недель) при температуре  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  в условиях естественного освещения. Масса вносимых в почву МИ и ФВБ составляла 1 г/кг.

Химический анализ почв выполняли перед внесением добавок ФВБ и МИ, а также через 1, 2, 5 и 8 недель после внесения. Эксперимент выполняли в трех повторностях. Содержание органического вещества в почве определяли по ГОСТ 26213-91,  $\text{pH}_{\text{КСР}}$  в соответствии с ГОСТ 26483-85, концентрацию Cd по ФР 1.31.2018.31189 «Методика изменений массовых долей токсичных металлов в пробах почв атомно-абсорбционным методом» на спектрометре ААС «Спектр-5-4».

Химическое разложение почвы при определении валового содержания Cd осуществляли методом кипячения проб в растворе  $\text{HNO}_3$  (1:1) с последующей обработкой суспензии концентрированным раствором  $\text{H}_2\text{O}_2$  и повторным кипячением. Содержание подвижных форм Cd определяли в ацетатно-аммонийном буферном растворе с  $\text{pH}$  4.8. Полученные результаты статистически обрабатывали в программе Microsoft Excel. Достоверность отличий между вариантами оценивали по t-критерию Стьюдента. В таблицах приведены средние значения и стандартные отклонения измеряемых величин.

### Результаты и их обсуждение

По данным литературы, в пахотных почвах Кировской области среднее содержание валового Cd составляет  $0.115 \pm 0.035$  мг/кг, подвижного –  $0.060 \pm 0.018$  мг/кг (Товстик и др., 2018).

Содержание валового ( $\text{Cd}_v$ ) и подвижного ( $\text{Cd}_n$ )

Таблица 1. Характеристика опытных и контрольных почв  
Table 1. Characteristics of experimental and control soils

| Показатели<br>Indicators          | Опыт 1<br>Experiment 1 | Контроль 1<br>Control 1 | Опыт 2<br>Experiment 2 | Контроль 2<br>Control 2 |
|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| $\text{Cd}_v$ , мг/кг             | $0.090 \pm 0.027^*$    | $0.007 \pm 0.002$       | $0.095 \pm 0.029^*$    | $0.038 \pm 0.011$       |
| $\text{Cd}_n$ , мг/кг             | $0.067 \pm 0.020^*$    | $< 0.001$               | $0.076 \pm 0.025^*$    | $< 0.001$               |
| $\text{pH}_{\text{КСР}}$ , ед. рН | $6.7 \pm 0.1$          | $5.3 \pm 0.1$           | $4.8 \pm 0.1$          | $4.2 \pm 0.1$           |
| Органическое вещество, %          | $6.6 \pm 0.7^*$        | $2.5 \pm 0.5$           | $4.5 \pm 0.7^*$        | $2.3 \pm 0.5$           |
| Частицы $< 0.01$ мм, %            | $36 \pm 3^*$           | $34 \pm 2$              | $35 \pm 2^*$           | $33 \pm 2$              |

\*статистически значимые различия между опытом и контролем ( $P > 0.95$ )

\*statistically significant differences between experiment and control ( $P > 0.95$ )

кадмия в удобряемых ЖНС почвах существенно отличается от его содержания в почвах контрольных участков (табл. 1).

Содержание  $\text{Cd}_v$  в почвах, удобряемых ЖНС КРС, было почти в 13 раз выше, чем в почвах контрольного участка, однако находилось в пределах ОДК. В почвах, удобряемых ЖНС свиноферм, содержание  $\text{Cd}_v$  было не ниже, чем в почве, удобряемой ЖНС КРС. Поскольку поля удобряли только ЖНС, а минеральные удобрения и МИ в почву не вносили, можно предположить, что основным источником Cd были ЖНС. Соответствующее предположение в определенной степени подтверждается высоким значением коэффициента корреляции между массовой долей органического вещества в почвах и содержанием валового кадмия ( $r=0.83$ ). Известно, что содержание Cd в навозных стоках варьирует в широких пределах и в среднем пересчете на сухое вещество составля-

ет 0.36 мг/кг для свиных НС и 0.34 мг/кг для НС КРС (Лукин, Селюкова, 2016).

Содержание подвижных форм Cd в пахотных почвах было также выше, чем на контрольных участках. В подвижной форме находилось до 70–80% валового кадмия.

Внесение в почву добавок МИ привело к повышению  $\text{pH}_{\text{КСР}}$ , а внесение ФВБ заметного влияния на обменную кислотность почвы не оказало. Динамика изменения водородного показателя почвы с добавками ФВБ и МИ представлена в таблице 2.

В таблице 3 приведены данные о влиянии добавок ФВБ и МИ на динамику содержания подвижного кадмия в почвах.

Полученные результаты показали, что ФВБ и МИ в изученных дозировках не оказывают существенного влияния на содержание  $\text{Cd}_n$  в почвах. Вместе с тем, если в почвах контрольных участков концентрации подвижных форм кадмия до

Таблица 2. Динамика изменения pH почвы с добавками ФВБ и МИ  
 Table 2. Dynamics of pH in soil with additives of phosphorites of the Verkhnekamsky poor (PVP) and limestone flour (LF)

| Периоды отбора проб<br>Sampling periods | Опыт 1<br>Experiment 1 |          | Контроль 1<br>Control 1 |          | Опыт 2<br>Experiment 2 |          | Контроль 2<br>Control 2 |          |
|---|------------------------|----------|-------------------------|----------|------------------------|----------|-------------------------|----------|
|   | ФВБ<br>PVP             | МИ<br>LF | ФВБ<br>PVP              | МИ<br>LF | ФВБ<br>PVP             | МИ<br>LF | ФВБ<br>PVP              | МИ<br>LF |
| До внесения добавок                     | 6,7±0,1                |          | 5,3±0,1                 |          | 4,8±0,1                |          | 4,2±0,1                 |          |
| 1 неделя                                | 6.7±0.2                | 7.2±0.2* | 5.5±0.2                 | 6.4±0.2* | 5.0±0.1                | 5.6±0.1* | 4.6±0.1                 | 5.0±0.1* |
| 2 недели                                | 6.8±0.2                | 7.4±0.1* | 5.4±0.1                 | 6.5±0.2* | 5.2±0.2                | 5.8±0.2* | 4.6±0.1                 | 5.2±0.1* |
| 5 недель                                | 6.8±0.2                | 7.2±0.2  | 5.5±0.1                 | 5.9±0.2* | 4.9±0.1                | 5.4±0.1* | 4.4±0.1                 | 5.0±0.1* |
| 8 недель                                | 6.7±0.1                | 7.2±0.2* | 5.4±0.1                 | 5.8±0.2* | 4.9±0.1                | 5.2±0.1* | 4.2±0.1                 | 4.8±0.1* |

\*статистически значимые различия между вариантами с добавкой ФВБ и МИ (P > 0.95)

\*statistically significant differences between variants with the addition of FVB and MI (P > 0.95)

внесения добавок находились ниже предела обнаружения, то в присутствии МИ подвижный кадмий хорошо определялся. Через 8 недель после внесения добавок содержание подвижного Cd во всех образцах почвы с добавкой ФВБ было ниже, чем в почве с добавкой МИ (различия статистически значимы, кроме опыта 2).

Экспериментальные результаты можно объяснить на основе механизмов мобилизации и иммобилизации Cd. Внесение МИ способствует повышению pH почвенного раствора, что приводит к депротонированию гумусовых кислот и повышению устойчивости гуматных и фульватных комплексов Cd. За счет мобильных фульватных комплексов катионы Cd переходят в подвижную форму. Кроме фульвокислот, водорастворимые комплексные соединения с катионами Cd<sup>2+</sup> могут образовывать органические вещества (в частно-

сти, органические кислоты), вносимые в почву в составе навозных стоков. Известно, что для кадмия характерно образование широкого спектра разнообразных растворимых комплексов с органическими лигандами, повышающими его мобильность в окружающей среде (Naidu, Harter, 1998; Путилина и др., 2009).

Механизмы воздействия ФВБ на процессы иммобилизации/мобилизации Cd в почвах более сложные. Входящий в состав ФВБ глауконит способен связывать катионы Cd<sup>2+</sup> не только за счет адсорбции на поверхности алюмосиликатов, но и за счет ионного обмена или адсорбции на гидроксидах железа, расположенных в виде пятен и вкраплений на поверхности зерен глауконита. Активнее всего Cd сорбируется из аквакомплексов. Сорбция связанного с органическими лигандами Cd затруднена, что объясняет незначительный

Таблица 3. Содержание подвижного кадмия в почвах с добавками ФВБ и МИ, мг/кг  
 Table 3. Content of mobile cadmium in soils with additives PVP and LF, mg/kg

| Периоды отбора проб<br>Sampling periods | Опыт 1<br>Experiment 1 |              | Контроль 1<br>Control 1 |              | Опыт 2<br>Experiment 2 |             | Контроль 2<br>Control 2 |              |
|---|------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|-------------|-------------------------|--------------|
|   | ФВБ<br>PVP             | МИ<br>LF     | ФВБ<br>PVP              | МИ<br>LF     | ФВБ<br>PVP             | МИ<br>LF    | ФВБ<br>PVP              | МИ<br>LF     |
| До внесения добавок                     | 0.067±0.020            |              | <0.001                  |              | 0.076±0.025            |             | <0.001                  |              |
| 1 неделя                                | 0.052±0.016            | 0.071±0.021  | <0.001                  | 0.082±0.037* | 0.058±0.017            | 0.074±0.022 | <0.001                  | 0.060±0.018* |
| 2 недели                                | 0.055±0.017            | 0.128±0.038  | <0.001                  | 0.054±0.016* | 0.052±0.015            | 0.076±0.023 | <0.001                  | 0.076±0.020* |
| 5 недель                                | 0.052±0.016            | 0.120±0.034  | <0.001                  | 0.060±0.018* | 0.050±0.015            | 0.072±0.022 | <0.001                  | 0.074±0.020* |
| 8 недель                                | 0.050±0.016            | 0.118±0.035* | <0.001                  | 0.068±0.020* | 0.049±0.011            | 0.065±0.02  | <0.001                  | 0.071±0.018* |

\*статистически значимые различия между вариантами с добавкой ФВБ и МИ (P > 0.95)

\*statistically significant differences between variants with the addition of FVB and MI (P > 0.95)

эффект его иммобилизации ФВБ. Определенный вклад в иммобилизацию Cd могут вносить и содержащиеся в ФВБ фосфаты, образующие с ним малорастворимые соединения (Аскарова, 2017).

### Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что регулярное и длительное внесение побочных продуктов животноводства в пахотные почвы приводит к изменению их химического состава, накоплению органического вещества, подкислению реакции среды, а также к повышению содержания валовых и подвижных форм кадмия.

Для предотвращения химической деградации почв под влиянием высоких норм внесения побочных продуктов животноводства необходима организация мониторинга, направленного на выявление динамики содержания валовых и подвижных форм металлов, в течение нескольких лет.

Выбор мелиорантов для реабилитации загрязненных кадмием почв имеет принципиальное значение. Обработка почвы известковыми материалами может привести к увеличению подвижности кадмия. Внесение в почву глауконитсодержащих материалов, в частности фосфоритов Верхнекамских бедных, способствует снижению подвижности металла, однако достигаемый при этом эффект незначителен.

### Список литературы

1. Аскарова Д.А., Глебов В.В. Содержание и формы нахождения тяжелых металлов в почвенном слое // *Фундаментальные и прикладные основы сохранения плодородия почвы и получения экологически безопасной продукции растениеводства / Материалы докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2017. С. 64–70.
2. Волошин Е.И., Глазьев С.Ю. Кадмий в почвах Средней Сибири // *Агрохимия*. 2003. №5. С. 81–89.
3. Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Писарева Г.М. Кадмий, ванадий, цинк фосфоритов в катагенезе // *Доклады Академии наук*. 2000. Т. 374, №2. С. 228–231.
4. Корчагин В.И., Романюк В.Н. Глаукониты и плодородие Воронежских черноземов // *Плодородие*. 2011. №4. С. 42–43.
5. Лукин С.В., Селюкова С.В. Агроэкологическая оценка влияния органических удобрений на микроэлементный состав почв // *Достижения науки и техники АПК*. 2016. №12. С. 61–65.
6. Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Отходы свиноводческих комплексов – проблемы, пути решения // *Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем / Материалы докладов XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Киров: Вятский государственный университет, 2017. С. 180–183.
7. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я. Промышленные свиноккомплексы как источники загрязнения окружа-

ющей среды тяжелыми металлами // *Известия Коми научно-центра УрО РАН*. 2021. №5. С. 88–91.

8. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Кузнецов Д.А. Животноводческие комплексы как источники загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами (Cu, Zn) // *Принципы экологии*. 2023. №1. С. 82–89. <https://doi.org/10.15393/j1.art.2023.13182>.

9. Приемы повышения плодородия почв (известкование, фосфоритование, гипсование): научно-методические рекомендации. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. 116 с.

10. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции // *Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы*. 2009. №90. С. 1–155.

11. Силков С.И. Анализ влияния степени загрязнения почвы цинком и кадмием на качество зерна яровой пшеницы // *Достижения науки – агропромышленному производству / Материалы докладов Международной научно-технической конференции*. Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2011. С. 92–97.

12. Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Богатырёва Н.Н., Кантор Г.Я. Глаукониты Вятско-Камского фосфоритоносного бассейна // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. №2. С. 117–122. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-117-122>.

13. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. №3. С. 219–225. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-219-225>.

14. Товстик Е.В., Березин Г.И., Казакова А.А. Исследование содержания тяжелых металлов в агропочвах Нечерноземной зоны России // *Современные научные исследования и разработки*. 2018. Т. 1, №5. С. 629–633.

15. Хузиахметов Р.Х., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Иванова Н.Н. // *Комплексная переработка природных фосфоритов с использованием щелочных отходов нефтехимического синтеза и газовой серы* // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. №1. С. 174–180. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-102-108>.

16. Шумакова Г.Е. К проблеме принятия управленческих решений по оценке экологичности агропродукции // *Государственное и муниципальное управление. Ученые записки*. 2011. №1. С. 177–185.

17. Bolan N., Kunhikrishnan A., Thangarajan R., Kumpiene J., Park J., Makino T., Kirkham M.B., Scheckel K. Remediation of heavy metal (loid) s contaminated soils—to mobilize or to immobilize? // *Journal of hazardous materials*. 2014. Vol. 266. P. 141–166.

18. Bruland K.W. Complexation of cadmium by natural organic ligands in the central North Pacific // *Limnology and Oceanography*. 1992. Vol. 37, №5. P. 1008–1017.

19. Cadmium: environmental aspects. World Health Organization. Environmental health criteria, Geneva (1992). // URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/39366/9241571357-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения 20.10.2023).

20. Naidu R., Harter R.D. Effect of different organic ligands on cadmium sorption by and extractability from soils // *Soil science society of America journal*. 1998. Vol. 62, №3. P. 644–650.

21. Wu L., Tan C., Liu L., Zhu P., Peng C., Luo Y., Christie, P. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure // *Geoderma*. 2012. Vol. 173. P. 224–230.

## References

1. Askarova D.A., Glebov V.V. Soderzhanie i formy nakhozhdeniya tyazhelykh metallov v pochvennom sloe [Contents and forms of presence of heavy metals in the soil layer] // *Fundamentalnye i prikladnye osnovy sokhraneniya plodorodiya pochvy i polucheniya ekologicheskii bezopasnoy produktsii rastenievodstva* [Fundamental and applied principles of preserving soil fertility and obtaining environmentally friendly crop products] / *Materialy dokladov*. Ulyanovsk, 2017. P. 64–70.
2. Voloshin E.I., Glazev S.Yu. Kadmiy v pochvakh Sredney Sibiri [Cadmium in soils of the Middle Siberia] // *Agrokimiya* [Agrochemistry]. 2003. No 5. P. 81–89.
3. Zanin Yu.N., Zamirailova A.G., Pisareva G.M. Kadmiy, vanadiy, tsink fosforitov v katageneze [Behavior of cadmium, vanadium, and zinc in phosphorites during catagenesis] // *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. 2000. Vol. 374. P. 1136–1138.
4. Korchagin V.I., Romanyuk V.N. Glaukonity i plodorodie Voronezhskikh chernozemov [Glauconites and the fertility of Voronezh chernozems] // *Plodorodie* [Fertility]. 2011. No 4. P. 42–43.
5. Lukin S.V., Selyukova S.V. Agroekologicheskaya otsenka vliyaniya organicheskikh udobreniy na mikroelementnyy sostav pochv [Agroecological assessment of the influence of organic fertilizers on the microelement composition of soil] // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of science and technology in agro-industrial complex]. 2016. No 12. P. 61–65.
6. Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Otkhody svinovodcheskikh kompleksov - problemy, puti resheniya [Waste from pig complexes – problems, solutions] // *Biodiagnostika sostoyaniya prirodnykh i prirodno-tekhnogennykh sistem* [Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems] / *Materialy dokladov*. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2017. P. 180–183.
7. Pilip L.V., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya. Promyshlennyye svinokomplekсы kak istochniki zagryazneniya okruzhayushchey sredy tyazhelymi metallami [Industrial pig farms as sources of environmental pollution with heavy metals] // *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN* [Proceedings of the Komi science center of the Ural division of the Russian Academy of Sciences]. 2021. No 5. P. 88–91.
8. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kuznetsov D.A. Zhivotnovodcheskie komplekсы kak istochniki zagryazneniya okruzhayushchey sredy tyazhelymi metallami (Cu, Zn) [Livestock complexes as sources of environmental pollution with heavy metals (Cu, Zn)] // *Printsipy ekologii* [Principles of the ecology]. 2023. No 1. P. 82–89. <https://doi.org/10.15393/jl.art.2023.13182>.
9. Priemy povysheniya plodorodiya pochv (izvestkovanie, fosforitovanie, gipsovaniye): nauchno-metodicheskie rekomendatsii [Techniques for increasing soil fertility (liming, phosphorite treatment, gypsum): scientific method. rec.]. Moscow, 2021. 116 p.
10. Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. Adsorbtsiya tyazhelykh metallov pochvami i gornymi porodami. Kharakteristiki sorbenta, usloviya, parametry i mekhanizmy adsorbtsii. Literaturny [Adsorption of heavy metals by soils and rocks sorbent characteristics, conditions, parameters and adsorption mechanisms] // *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoy Ecology* [Ecology. A series of analytical reviews of world literature]. 2009. Vol. 90. P. 1–155.
11. Silkov S.I. Analiz vliyaniya stepeni zagryazneniya pochvy tsinkom i kadmiem na kachestvo zerna yarovoy pshenitsy [Analysis of the influence of the degree of soil contamination with zinc and cadmium on the quality of spring wheat grain] // *Achievements of science - agro-industrial production / Materialy dokladov*. Chelyabinsk, 2011. P. 92–97.
12. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyreva N.N., Kantor G.Ya. Glaukonity Vyatsko-Kamskogo fosforitonosnogo basseyna [Glauconites of the Vyatka-Kama phosphorite-bearing basin] // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology]. 2020. No 2. P. 117–122. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-117-122>.
13. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Khimicheskaya degradatsiya zemel pod vozdeystviem otkhodov zhitovnovodstva [Chemical land degradation under the influence of animal husbandry waste] // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology]. 2022. No 3. P. 219–225. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-219-225>.
14. Tovstik E.V., Berezin G.I., Kazakova A.A. Issledovanie soderzhaniya tyazhelykh metallov v agropochvakh Nechernozemnoy zony Rossii [Investigation of the content of heavy metals in agricultural soils of the Non-Chernozem zone of Russia] // *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i razrabotki* [Modern scientific research and development]. 2018. Vol. 1, No 5. P. 629–633.
15. Khuziakmetov R.Kh., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Ivanova N.N. // Kompleksnaya pererabotka prirodnykh fosforitov s ispolzovaniem shchelochnykh otkhodov neftekhimicheskogo sinteza i gazovoy sery [Complex processing of natural phosphorites using alkaline wastes of petrochemical synthesis and gas sulfur] // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology]. 2022. No 1. P. 174–180. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-102-108>.
16. Shumakova G.E. K probleme prinyatiya upravlencheskikh resheniy po otsenke ekologichnosti agroproduktsii [The problem of taking managerial decisions about the assessment of eco-friendliness of agricultural products] // *Gosudarstvennoe i munitsipalnoe upravlenie. Uchenyye zapiski* [State and municipal administration. Scientific notes]. 2011. No 1. P. 177–185.
17. Bolan N., Kunhikrishnan A., Thangarajan R., Kumpiene J., Park J., Makino T., Kirkham M. B., Scheckel K. Remediation of heavy metal (loid) s contaminated soils—to mobilize or to immobilize? // *Journal of hazardous materials*. 2014. Vol. 266. P. 141–166. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.018>.
18. Bruland K.W. Complexation of cadmium by natural organic ligands in the central North Pacific // *Limnology and Oceanography*. 1992. Vol. 37, No 5. P. 1008–1017. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.5.1008>
19. Cadmium: environmental aspects. World Health Organization. Environmental health criteria, Geneva (1992). // URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/39366/9241571357-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed: 20.10.2023).
20. Naidu R., Harter R.D. Effect of different organic ligands on cadmium sorption by and extractability from soils // *Soil Science Society of America Journal*. 1998. V. 62. No 3. P. 644–650.
21. Wu L., Tan C., Liu L., Zhu P., Peng C., Luo Y., Christie P. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure // *Geoderma*. 2012. Vol. 173. P. 224–230.

---

**Pilip L.V., Syrchina N.V. Effect of meliorants on cadmium mobility in soils.**

The study presents the results of the content of gross and mobile forms of cadmium in agrozems fertilized by high rates of liquid fraction of manure effluents and in the soil of control sites. The mechanical composition of the agrozems and the soil of the control sites was identical – medium loam.

According to the data obtained, the content of gross Cd in the soil of the control plots was 0.01–0.04 mg/kg, and in agrozems 0.09–0.10 mg/kg. The latter indicated the accumulation of Cd in the root horizon of the soil. Agrozems were also characterized by higher content of mobile Cd. In the laboratory experiment we studied the effect of limestone flour and phosphorites of the Verkhnekamsk poor on Cd mobility in soils with different acidity and organic matter content. Neither limestone flour nor phosphorites of the Verkhnekamsk poor had significant effect on the corresponding indicator. However, in soil samples with the addition of limestone flour, there was a certain tendency to transition Cd into an acid-soluble form. 8 weeks after the addition of additives, Cd mobility in all soil samples with the addition of phosphorites of the Verkhnekamsky poor was lower than in the soil with the addition of limestone flour. The results obtained showed that the choice of ameliorants for the rehabilitation of Cd-contaminated soils was of fundamental importance.

*Keywords:* manure effluents; agrozem; cadmium; mobility; phosphorites of the Verkhnekamsk poor; limestone; soil meliorants.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

**Информация о статье / Information about the article**

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 07.11.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 21.11.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 05.12.2023

**Сведения об авторах**

Пилип Лариса Валентиновна, кандидат ветеринарных наук, доцент, Вятский государственный агротехнологический университет, Россия, 610030, г. Киров, Октябрьский пр., 133, E-mail: pilip\_larisa@mail.ru.

Сырчина Надежда Викторовна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Вятский государственный университет, Россия, 610000, г. Киров, ул. Московская, 36, E-mail: nvms1956@mail.ru.

**Information about the authors**

Larisa V. Pilip, Ph.D. in Veterinary, Assistant Professor, Vyatka State Agrotechnological University, 133, Oktyabrsky Av., Kirov, 610030, Russia, E-mail: pilip\_larisa@mail.ru.

Nadezhda V. Syrchina, Ph.D. in Chemistry, Senior Researcher, Vyatka State University, 36, St. Moskovskaya, Kirov, 610000, Russia, E-mail: nvms1956@mail.ru.

