

УДК 615.682.2:615.326

DOI 10.30914/2411-9687-2023-9-4-368-375

**ДИОКСИД КРЕМНИЯ КАК ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЭНТЕРОСОРБЕНТ В СВИНОВОДСТВЕ
И МАТРИЦА ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ СРЕДСТВ****Т. В. Герунов¹, Л. К. Герунова¹, С. Ю. Смоленцев², В. А. Лапухова¹**¹Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, г. Омск, Российская Федерация²Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола, Российская Федерация

Аннотация. Введение. Одной из проблем промышленного животноводства является качество кормов. Микотоксины, содержащиеся в кормах, способны циркулировать по пищевой цепи и представляют угрозу здоровью человека. Дополнительный фактор риска – лекарственные средства (противопаразитарные, антибактериальные и др.), остаточные количества которых могут присутствовать в продуктах питания. По этой причине возрастает роль энтеросорбентов в животноводстве. **Цель** – обобщить опыт применения диоксида кремния в свиноводстве и оценить перспективы создания новых лекарственных средств на его основе. **Материалы и методы.** Поиск данных осуществляли в базах данных eLIBRARY.RU, Scopus, Web of Science, PubMed, где в качестве поисковых слов использовали «сорбент», «энтеросорбент», «свины», «диоксид кремния», «кремнезем». В рукопись включали статьи, описывающие различные эффекты энтеросорбентов и особенности действия диоксида кремния. **Результаты исследования, обсуждения.** Продемонстрированы результаты применения диоксида кремния в свиноводстве. Диоксид кремния улучшает усвояемость питательных веществ, повышает продуктивность животных, в том числе показатели среднесуточного прироста и послеубойной массы свиней, улучшает репродуктивную функцию свиноматок. В лабораторных и производственных условиях доказана способность диоксида кремния связывать микотоксины, а также улучшать белоксинтезирующую функцию печени. При этом он обладает антиоксидантным действием и проявляет антибактериальные свойства. При добавлении в рацион поросят снижает количество *E. coli* в фекалиях, устраняет признаки диареи. Диоксид кремния может быть использован как матрица для модификации различными соединениями, в том числе антибактериальными и противопаразитарными лекарственными средствами, что повышает их фармакологическую эффективность при более низких дозах. **Заключение.** Диоксид кремния применяется в качестве полифункционального энтеросорбента в свиноводстве и представляет интерес как матрица для получения модифицированных лекарственных препаратов с широким спектром фармакологических эффектов.

Ключевые слова: энтеросорбент, диоксид кремния, кремнезем, свиньи, микотоксины, противопаразитарные препараты, антибактериальные препараты

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МД-2435.2022.5.).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Диоксид кремния как полифункциональный энтеросорбент в свиноводстве и матрица для создания новых лекарственных средств / Т. В. Герунов, Л. К. Герунова, С. Ю. Смоленцев, В. А. Лапухова // Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». 2023. Т. 9. № 4. С. 368–375. DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2023-9-4-368-375>

**SILICON DIOXIDE AS A MULTIFUNCTIONAL ENTEROSORBENT IN PIG FARMING
AND A MATRIX FOR THE CREATION OF NEW MEDICINES****T. V. Gerunov¹, L. K. Gerunova¹, S. Yu. Smolentsev², V. A. Lapukhova¹**¹Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin, Omsk, Russian Federation²Mari State University, Yoshkar-Ola, Russian Federation

Abstract. Introduction. One of the problems of industrial animal husbandry is the quality of feed. Mycotoxins contained in feed are able to circulate through the food chain and pose a threat to human health. An additional risk factor is medicines (antiparasitic, antibacterial, etc.), residual amounts of which may be present in food. For this reason, the role of enterosorbents in animal husbandry is increasing. **Purpose.** To summarize the experience of using silicon dioxide in pig farming and evaluate the prospects for the creation of new medicines based on it.

Materials and methods. The data was searched in eLIBRARY.RU, Scopus, Web of Science, and PubMed databases, where "sorbent", "enterosorbent", "pigs", "silicon dioxide", and "silica" were used as search words. The manuscript included articles describing various effects of enterosorbents and features of the action of silicon dioxide. **Research results and discussion.** The results of the use of silicon dioxide in pig farming have been demonstrated. Silicon dioxide improves the digestibility of nutrients, increases the productivity of animals, including the indicators of average daily growth and post-slaughter weight of pigs, and improves the reproductive function of sows. The ability of silicon dioxide to bind mycotoxins, as well as to improve the protein-synthesizing function of the liver, has been proven in laboratory and industrial conditions. At the same time, it has an antioxidant effect and exhibits antibacterial properties. When added to the diet of piglets, it reduces the amount of *E. coli* in the feces, and eliminates signs of diarrhea. Silicon dioxide can be used as a matrix for modification by various compounds, including antibacterial and antiparasitic drugs, which increases their pharmacological effectiveness at lower doses. **Conclusion.** Silicon dioxide is used as a multifunctional enterosorbent in pig breeding and is of interest as a matrix for the production of modified drugs with a wide range of pharmacological effects.

Keywords: enterosorbent, silicon dioxide, silica, pigs, mycotoxins, antiparasitic drugs, antibacterial drugs

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists (MD-2435.2022.5.).

The authors declare no conflict of interest

For citation: Gerunov T. V., Gerunova L. K., Smolentsev S. Yu., Lapukhova V. A. Silicon dioxide as a multifunctional enterosorbent in pig farming and a matrix for the creation of new medicines. *Vestnik of the Mari State University. Chapter "Agriculture. Economics"*, 2023, vol. 9, no. 4, pp. 368–375. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2023-9-4-368-375>

Введение

Корма для животных являются одним из факторов, определяющих их здоровье, продуктивность и, как следствие, экономическую эффективность животноводства как отрасли. При этом качество и безопасность кормов влияют на качественную характеристику продуктов питания животного происхождения [1]. Кормовые токсины и лекарственные препараты, используемые в животноводстве, могут накапливаться в различных тканях и органах животных, подвергая тем самым потребителей продукции животноводства экологическому риску. Контаминация кормов микотоксинами признана Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ФАО) и Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) приоритетной проблемой вследствие их высокой токсичности для животных и человека [2]. Чаще всего в кормах для животных выявляют афлатоксины, фумонизины, охратоксины, зеараленон и трихотечены (дезоксиниваленон и токсины Т-2 и НТ-2) [2; 3; 4]. Угрозу здоровью человека представляют и лекарственные средства, в том числе регулярно применяемые в животноводстве противопаразитарные препараты [5] и антибиотики [6],

остаточные количества которых могут присутствовать в продуктах питания [7]. По этой причине возрастает роль энтеросорбентов в животноводстве.

Цель обзора – обобщить опыт применения диоксида кремния в свиноводстве и оценить перспективы создания новых лекарственных средств на его основе.

Материалы и методы

Поиск данных для написания статьи осуществляли в базах данных eLIBRARY.RU, Scopus, Web of Science, PubMed, где в качестве поисковых слов использовали «сорбент», «энтеросорбент», «свины», «диоксид кремния», «кремнезем». В рукопись включали статьи, описывающие различные эффекты энтеросорбентов и особенности действия диоксида кремния.

Результаты исследования, обсуждения

Одним из универсальных методов эфферентной терапии, обеспечивающих прижизненное выведение токсических соединений различной природы из организма животных, является применение энтеросорбентов, механизм действия

которых заключается в прерывании энтерогепатической циркуляции веществ, их связывании и эвакуации с последующей дефекацией [8; 9]. С одной стороны, энтеросорбенты имеют существенные различия по химической природе, размерам пор, механизмам связывания токсикантов, с другой стороны, они обладают общим принципом действия. В настоящее время накоплен положительный опыт применения энтеросорбентов в свиноводстве. Использование цеолита и монтмориллонита в рационе свиней на откорме способствует увеличению среднесуточных привесов и повышает коэффициент конверсии корма [10; 11]. Цеолит существенно повышает показатели послеубойной массы свиней, в том числе убойный выход [12]. Применение в рационе бентонита способствует увеличению убойного выхода, длины туши и площади мышечного глазка [13].

Е. Ю. Тарасова и др. оценивали сорбционную активность ряда энтеросорбентов, среди которых Полисорб ВП (АО «Полисорб», Россия), в отношении афлатоксинов [14]. Исследование выполняли *in vitro* при рН 2,0 (моделирование среды желудка), 7,0 и 8,0 (моделирование среды кишечника). Это позволило оценить прочность комплекса микотоксин-адсорбент на всем протяжении желудочно-кишечного тракта. Результаты исследования после внесения в образцы по 10 мкг микотоксинов показали, что Полисорб ВП адсорбировал $8,10 \pm 0,19$ мкг афлатоксина В1 в кислой среде. При нейтральном рН сорбционная способность препарата повысилась на 13,18 % по сравнению с кислой средой. В щелочной среде адсорбция Полисорбом ВП афлатоксина В1 составила 0,12 мкг. В исследовании оценивалась также «истинная сорбция», которая определялась путем вычисления разницы между начальным связыванием в кислой среде («непрочное связывание») и последующей десорбцией в щелочной среде («прочное связывание»). «Истинная сорбция» при использовании Полисорба ВП составила $79,5 \pm 1,1$ % [14].

Этот же препарат в реальных производственных условиях продемонстрировал корректирующее действие на обмен веществ при микотоксикозах у свиней. Свиньям крупной белой породы в возрасте 7–9 месяцев, в кормах которых были обнаружены зеараленон и Т-2 токсин, при наличии клинических признаков микотоксикоза задавали профилактическую дозу препарата (0,2 г/кг массы животного) или лечебную дозу (0,5 г/кг

массы животного). Результаты исследования показали нормализацию уровня общего белка и белковых фракций у опытных животных. Так, исходный уровень общего белка составлял $48,46 \pm 6,86$ г/л при референсных значениях 72,0–86,0 г/л. После применения профилактической дозы Полисорба ВП показатели общего белка увеличились до $77,6 \pm 2,43$ г/л, лечебной дозы – до $76,12 \pm 3,6$ г/л. При этом наблюдалось значительное повышение альбуминов, α -, β -, и γ -глобулинов. Существенного влияния на липидный обмен и уровень холестерина Полисорб ВП не оказывает [15], однако приводит к снижению уровня малонового диальдегида в крови, а также повышению содержания витаминов А и Е и активности каталазы, что свидетельствует об антиоксидантном действии препарата [16].

В ряде исследований, направленных на изучение синергетических эффектов при использовании в кормлении свиней активированного диоксида кремния и других добавок, отмечено, что одновременное введение в рационы активированного диоксида кремния и фитазы повышает усвояемость кальция из кормов на 62 %, а фосфора – на 129 %. В сочетании с бензойной кислотой диоксид кремния повышает прирост живой массы у поросят, которая на 0,7 кг превосходит контрольные показатели. При обобщении результатов серии исследований отмечено, что применение активированного диоксида кремния способствует увеличению среднесуточного прироста у поросят в среднем на 5,6 % [17].

На одной из свиноферм Бразилии проведено исследование на супоросных и лактирующих свиноматках, в ходе которого утановлено влияние добавок с активированным кристаллическим диоксидом кремния (Silica⁺[®], Ceresco Nutrition, Канада) на показатели репродуктивной функции животных, а также выживаемость и прирост живой массы поросят. При добавлении в рацион животных 0,3 кг активированного кремния на тонну корма и скармливания его в период от 111-го дня супоросности по 21-й день лактации отмечено, что вес свиноматок опытной группы на 21-й день лактации был на 2,39 % больше, чем вес свиноматок контрольной группы, которые не получали активированного кремния. Вместе с тем свиноматки опытной группы вырабатывали на 5,05 % больше молока по сравнению с животными контрольной группы, а также у них наблюдались меньшие потери массы тела в период лактации.

У поросят-отъемышей, полученных от свиноматок опытной группы, отмечено увеличение массы тела на 4,43 % по сравнению с поросятами от свиноматок контрольной группы [18].

На базе исследовательской фермы Национального университета Чунгбук (Chungbuk National University, Республика Корея) изучено влияние силиката, содержащего 66,8 % SiO₂, на показатели массы тела, усвояемость питательных веществ, иммунные характеристики, фекальную микробиоту и наличие диареи у растущих свиней после введения липополисахарида *Escherichia coli*. Длительность эксперимента составила 14 недель. В рацион опытных животных вводили 0,1 % силиката. Результаты эксперимента показали, что прирост живой массы у поросят опытной группы был больше, чем у животных контрольной группы, их средний вес на конец эксперимента составил 79,23 и 75,39 кг соответственно. Также выявлено, что у поросят опытной группы усвояемость сырого протеина и сухого вещества корма выше по сравнению с поросятами контрольной группы. При этом силикат снижает стресс, маркером которого является кортизол. Концентрация гормона через 12 и 24 часа после введения липополисахарида *E. coli* у свиней, получавших силикат, была ниже по сравнению с контролем. При этом кормовая добавка снижала количество *Escherichia coli* в фекалиях поросят [19]. В исследовании с использованием препарата Evonik AG (Германия), целью которого была оценка влияния панкреатоподобных ферментов микробного происхождения и SiO₂ как антибактериального фактора на продуктивность поросят, установлено, что подобное сочетание компонентов способствует увеличению массы тела, снижению частоты возникновения диареи и сокращению смертности поросят в послеотъемный период [20].

Диоксид кремния обладает антибактериальным действием, а его наночастицы имеют более высокую бактерицидную активность, чем объемные аналоги, что продемонстрировано на примере *B. subtilis*, *E. coli* и *P. fluorescens* [21]. При этом частицы диоксида кремния могут быть использованы как матрица для модификации различными соединениями. Адресная доставка лекарственных соединений на основе наночастиц является одной из наиболее перспективных терапевтических стратегий, в том числе с применением антибактериальных препаратов для лечения инфекционных

заболеваний, осложненных развитием биопленок и выраженной антибактериальной устойчивостью возбудителей. Указанный подход обладает универсальностью и расширенной функциональностью для преодоления физиологических барьеров и вместе с этим позволяет предполагать применение более низких доз лекарственных средств [22]. При этом уже существуют подходы к разработке «интеллектуальных мезопористых наночастиц кремнезема», способных высвобождать противомикробные вещества в необходимой точке приложения в ответ на внутренние или внешние раздражители [23].

Получены данные об эффективности при альвеолярном эхинококкозе наночастиц кремнезема (NP), модифицированного дихлорофеном (DCP). В условиях *in vitro* полученный комплексный препарат NP-DCP продемонстрировал большую эффективность, чем дихлорофен в отдельности или альбендазол, который является препаратом выбора при данном виде паразитоза. Исследования *in vivo* показали, что препарат NP-DCP (4 мг/кг) имеет такую же эффективность, как альбендазол (25 мг/кг), и большую активность, чем свободный дихлорофен [24]. В целом такой подход рассматривается как перспективный метод эффективного лечения паразитарных заболеваний за счет повышения биодоступности и клеточной проницаемости, неспецифического распределения и быстрого выведения противопаразитарных препаратов из организма [25].

Применение диоксида кремния для иммобилизации лекарственных веществ с целью улучшения их фармакодинамических и фармакокинетических характеристик стало возможным благодаря низкой токсичности и биосовместимости. Весьма привлекательна способность сорбента легко изменять размер, форму и пористость частиц в процессе производства [26].

Заключение

Таким образом, диоксид кремния широко используется в свиноводстве как энтеросорбент при накоплении экзо- и эндотоксинов в организме животных. При этом он снижает нагрузку на органы экскреции и детоксикации, нормализует метаболический статус и гормональный фон, улучшает всасывание и усвояемость питательных веществ корма, повышает продуктивность животных. Специфическая фармакологическая активность диоксида кремния позволяет

существенно расширить спектр показаний к его применению в свиноводстве с перспективой создания новых лекарственных средств на его основе для лечения и профилактики инфекционных и паразитарных болезней животных.

1. Pulina G., Battacone G., Brambilla G., Cheli F., Danieli P. P., Masoero F., Pietri A., Ronchi B. An update on the safety of foods of animal origin and feeds // *Italian Journal of Animal Science. Sci.* 2014. Vol. 13. Pp. 845–856. DOI: <https://doi.org/10.4081/ijas.2014.3571>

2. Fumagalli F., Ottoboni M., Pinotti L., Cheli F. Integrated Mycotoxin Management System in the Feed Supply Chain: Innovative Approaches // *Toxins (Basel)*. 2021. Vol. 13. No. 8. Pp. 572. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins13080572>

3. Santos Pereira C., Cunha C. S., Fernandes J. O. Prevalent Mycotoxins in Animal Feed: Occurrence and Analytical Methods // *Toxins (Basel)*. 2019. Vol. 11. No. 5. Pp. 290. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins11050290>

4. Микотоксикологический мониторинг кормов и его роль в профилактике микотоксикозов животных / В. И. Дорожкин, Т. В. Герунов, И. А. Симонова, Л. К. Герунова, Я. О. Крючек, А. А. Тарасенко, Е. А. Чигринский // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*. 2022. Т. 17, № 4. С. 546–554. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-4-546-554>

5. Suvarna V. Ivermectin: A Critical Review on Characteristics, Properties, and Analytical Methods // *Journal of AOAC International*. 2023. Vol. 106. No. 3. Pp. 534–557. DOI: <https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsad031>

6. Ghimpețeanu O. M., Pogurschi E. N., Popa D. C., Dragomir N., Drăgoțoiu T., Mihai O. D., Petcu C. D. Antibiotic Use in Livestock and Residues in Food-A Public Health Threat: A Review // *Foods*. 2022. Vol. 11. No. 10. Pp. 1430. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11101430>

7. Yang Y., Zhang H., Zhou G., Zhang S., Chen J., Deng X., Qu X., Chen Q., Niu B. Risk Assessment of Veterinary Drug Residues in Pork on the Market in the People's Republic of China // *Journal of Food Protection*. 2022. Vol. 85. No. 5. Pp. 815–827. DOI: <https://doi.org/10.4315/JFP-21-411>

8. Конорев М. Р. Клиническая фармакология энтеросорбентов нового поколения // *Вестник фармации*. 2013. № 4 (62). С. 79–85. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klinicheskaya-farmakologiya-enterosorbentov-novogo-pokoleniya> (дата обращения: 20.09.2023).

9. Энтеросорбенты в ветеринарии: значение и перспективы создания новых препаратов / Т. В. Герунов, М. С. Дроздецкая, Л. К. Герунова, Л. Г. Пьянова // *Инновации и продовольственная безопасность*. 2017. № 3 (17). С. 17–24. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30708075&ysclid=lpwlas82ko409936570> (дата обращения: 20.09.2023).

10. Yu D. Y., Li X. L., Li W. F. Effect of montmorillonite superfine composite on growth performance and tissue lead level in pigs // *Biol Trace Elem Res*. 2008. Vol. 125. No. 3. Pp. 229–235. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-008-8173-0>

11. Islam M., Tabasum A. S., Seong-Gyun K., Hong-Seok M., Chul-Ju Y. Dietary effect of artificial zeolite on performance, immunity, faecal microflora concentration and noxious gas emissions in pigs // *Italian Journal of Animal Science*. 2014. Vol. 13. Pp. 830–835. DOI: <https://doi.org/10.4081/ijas.2014.3404>

12. Грехова О. Н., Позднякова Н. А. Жировой обмен поросят при потреблении бентонита // *Пермский аграрный вестник*. 2015. № 1 (9). С. 65–70. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zhirovoy-obmen-porosyat-pri-potreblenii-bentonita?ysclid=lpwls8glu7948639145> (дата обращения: 22.09.2023).

13. Позднякова Н. А. Повышение качества мяса свиней с помощью природной минеральной добавки // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2014. № 3. С. 78–85. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-kachestva-myasa-sviney-s-pomoschyu-prirodnoy-mineralnoy-dobavki?ysclid=lpwlg1zy2629907611> (дата обращения: 22.09.2023).

14. Изучение сорбционной активности потенциальных средств профилактики микотоксикозов в отношении афлатоксинов / Е. Ю. Тарасова, Э. И. Семенов, Л. Е. Матросова, Н. Н. Мишина, А. З. Мухарлямова // *Ветеринарный врач*. 2020. № 2. С. 51–58. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-sorbtsionnoy-aktivnosti-potentsialnyh-sredstv-profilaktiki-mikotoksikozov-v-otnoshenii-aflatoksinov?ysclid=lpwm6lfhv8327239777> (дата обращения: 22.09.2023).

15. Грекова А. А. Влияние препарата «ПолисORB ВП» на обмен веществ у свиней при микотоксикозах // *Сельскохозяйственный журнал*. 2009. № 1–1. С. 139–142. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-preparata-polisorb-vp-na-obmen-veschestv-u-sviney-pri-mikotoksikozah> (дата обращения: 21.09.2023).

16. Грекова А. А. Антиоксидантный эффект препарата «ПолисORB ВП» при микотоксикозах свиней // *Сельскохозяйственный журнал*. 2009. № 1–1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/antioksidantnyy-effekt-preparata-polisorb-vp-pri-mikotoksikozah-sviney> (дата обращения: 21.09.2023).

17. Decaux C. Activated silicon dioxide to achieve a synergistic effect in pigs // *Int. Pig Topics*. 2017. Vol. 32. No 1. P. 25. URL: <https://ceresconutrition.com/wp-content/uploads/2017/02/Intl-Pig-Topics-Activated-Silicon-Dioxide-to-achieve-a-synergistic-effect-in-pigs.pdf> (дата обращения: 15.09.2023).

18. Araujo L. F., Vitagliano L. A., Decaux C., Janssen F. T., de Almeida Sartore Y. G., Granghelli C. A., Tse M. L. P., Carvalho R. S. B., Martins S. M. M. K., da Silva Araujo C. S. Activated crystalline silicon dioxide mitigates weight loss in lactating sows // *Italian Journal of Animal Science*. 2021. Vol. 21. No. 1. Pp. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.1080/1828051X.2021.2020692>

19. Effects of silicate derived from quartz porphyry supplementation in the health of weaning to growing pigs after lipopolysaccharide challenge / J. Lee, M. Song, W. Yun, S. Liu, H. Oh, J. An, Y. Kim, C. Lee, H. Kim, J. Cho // *Journal of Applied Animal Research*. 2020. Vol. 48. Pp. 440–447. DOI: <https://doi.org/10.1080/09712119.2020.1817748>
20. Szczurek P., Kamyczek M., Pierzynowski S. G., Goncharova K., Michałowski P., Weström B., Prykhodko O., Grabowski T., Pieszka M. Effects of dietary supplementation with pancreatic-like enzymes of microbial origin (PLEM) and silicon dioxide (SiO₂) on the performance of piglets fed creep feed // *J. Anim. Sci.* 2016. Vol. 94. Iss. 3, Pp. 62–65. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9607>
21. Jiang W., Mashayekhi H., Xing B. Bacterial toxicity comparison between nano- and micro-scaled oxide particles // *Environmental Pollution*. 2009. Vol. 157. No. 5. Pp. 1619–1625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.025>
22. Selvarajan V., Obuobi S., Ee P. L. R. Silica Nanoparticles-A Versatile Tool for the Treatment of Bacterial Infections // *Front Chem*. 2020. Vol. 8. Pp. 602. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00602>
23. Colilla M., Vallet-Regí M. Targeted Stimuli-Responsive Mesoporous Silica Nanoparticles for Bacterial Infection Treatment // *Int J Mol Sci*. 2020. Vol. 21. No. 22. Pp. 8605. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21228605>
24. Fabbri J., Pensel P. E., Albani C. M., Arce V. B., Mártire D. O., Elisondo M. C. Drug repurposing for the treatment of alveolar echinococcosis: in vitro and in vivo effects of silica nanoparticles modified with dichlorophen // *Parasitology*. 2019. Vol. 146. No. 13. Pp. 1620–1630. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0031182019001057>
25. Sun Y., Chen D., Pan Y., Qu W., Hao H., Wang X., Liu Z., Xie S. Nanoparticles for antiparasitic drug delivery // *Drug Deliv*. 2019. Vol. 26. No. 1. Pp. 1206–1221. DOI: <https://doi.org/10.1080/10717544.2019.1692968>
26. Pieszka M., Bederska-Łojewska D., Szczurek P., Pieszka M. The Membrane Interactions of Nano-Silica and Its Potential Application in Animal Nutrition // *Animals (Basel)*. 2019. No. 12. Pp. 1041. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani9121041>

Статья поступила в редакцию 04.10.2023 г.; одобрена после рецензирования 02.11.2023 г.; принята к публикации 08.11.2023 г.

Об авторах

Герунов Тарас Владимирович

доктор биологических наук, доцент, заместитель директора по учебно-научной работе, Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина (644008, Российская Федерация, г. Омск, Институтская площадь, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5594-2666>, tv.gerunov@omgau.org

Герунова Людмила Карповна

доктор ветеринарных наук, профессор, профессор кафедры диагностики, внутренних незаразных болезней, фармакологии, хирургии и акушерства, Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина (644008, Российская Федерация, г. Омск, Институтская площадь, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0835-9352>, lk.gerunova@omgau.org

Смоленцев Сергей Юрьевич

доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры технологии производства продукции животноводства, Марийский государственный университет (424000, Российская Федерация, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6086-1369>, Smolentsev82@mail.ru

Лапухова Виктория Александровна

аспирант кафедры диагностики, внутренних незаразных болезней, фармакологии, хирургии и акушерства, Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина (644008, Российская Федерация, г. Омск, Институтская площадь, д. 1), va.lapukhova1721@omgau.org

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

1. Pulina G., Battacone G., Brambilla G., Cheli F., Danieli P. P., Masoero F., Pietri A., Ronchi B. An update on the safety of foods of animal origin and feeds. *Italian Journal of Animal Science*, 2014, vol. 13, pp. 845–856. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.4081/ijas.2014.3571>
2. Fumagalli F., Ottoboni M., Pinotti L., Cheli F. Integrated mycotoxin management system in the feed supply chain: innovative approaches. *Toxins (Basel)*, 2021, vol. 13, no. 8, pp. 572. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins13080572>
3. Santos Pereira C., Cunha C. S., Fernandes J. O. Prevalent mycotoxins in animal feed: occurrence and analytical methods. *Toxins (Basel)*, 2019, vol. 11, no. 5, pp. 290. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins11050290>
4. Dorozhkin V. I., Gerunov T. V., Simonova I. A., Gerunova L. K., Kryuchek Ya. O., Tarasenko A. A., Chigrinski E. A. Mikotoksikologicheskii monitoring kormov i ego rol' v profilaktike mikotoksikozov zhivotnykh [Mycotoxicological monitoring of

feed and its role in prevention of animal mycotoxicoses]. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo* = RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries, 2022, vol. 17, no. 4, pp. 546–554. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-4-546-554>

5. Suvarna V. Ivermectin: a critical review on characteristics, properties, and analytical methods. *Journal of AOAC International*, 2023, vol. 106, no. 3, pp. 534–557. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsad031>

6. Ghimpețeanu O. M., Pogurschi E. N., Popa D. C., Dragomir N., Drăgoteiu T., Mihai O. D., Petcu C. D. Antibiotic use in livestock and residues in food - a public health threat: a review. *Foods*, 2022, vol. 11, no. 10, pp. 1430. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11101430>

7. Yang Y., Zhang H., Zhou G., Zhang S., Chen J., Deng X., Qu X., Chen Q., Niu B. Risk assessment of veterinary drug residues in pork on the market in the People's Republic of China. *Journal of Food Protection*, 2022, vol. 85, no. 5, pp. 815–827. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.4315/JFP-21-411>

8. Konorev M. R. Klinicheskaya farmakologiya enterosorbentov novogo pokoleniya [Clinical pharmacology of enterosorbents of new generation]. *Vestnik farmatsii* = Pharmacy Newsletter, 2013, no. 4 (62), pp. 79–85. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/klinicheskaya-farmakologiya-enterosorbentov-novogo-pokoleniya> (accessed 20.09.2023). (In Russ.).

9. Gerunov T. V., Drozdetskaya M. S., Gerunova L. K., Piyanova L. G. Enterosorbenty v veterinarii: znachenie i perspektivy sozdaniya novykh preparatov [Enterosorbents in veterinary: significance and prospects of new medicinal products for animal use]. *Innovatsii i prodovol'stvennaya bezopasnost'* = Innovations and Food Safety, 2017, no. 3 (17), pp. 17–24. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30708075&ysclid=lpwlas82ko409936570> (accessed 20.09.2023). (In Russ.).

10. Yu D. Y., Li X. L., Li W. F. Effect of montmorillonite superfine composite on growth performance and tissue lead level in pigs. *Biol Trace Elem Res*. 2008, vol. 125, no. 3, pp. 229–235. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-008-8173-0>

11. Islam M., Tabasum A. S., Seong-Gyun K., Hong-Seok M., Chul-Ju Y. Dietary effect of artificial zeolite on performance, immunity, faecal microflora concentration and noxious gas emissions in pigs. *Italian Journal of Animal Science*, 2014, vol. 13, pp. 830–835. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.4081/ijas.2014.3404>

12. Grekhova O. N., Pozdnyakova N. A. Zhirovoi obmen porosyat pri potreblenii bentonita [Lipid metabolism in pigs consuming bentonite]. *Permskii agrarnyi vestnik* = Perm Agrarian Journal, 2015, no. 1 (9), pp. 65–70. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/zhirovoy-obmen-porosyat-pri-potreblenii-bentonita?ysclid=lpwls8gly7948639145> (accessed 22.09.2023). (In Russ.).

13. Pozdnyakova N. A. Povyshenie kachestva myasa svinei s pomoshch'yu prirodnoi mineral'noi dobavki [The increase of pork quality with the help of natural mineral additive]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pishchevye i biotekhnologii* = Bulletin of the South Ural State University. Series: "Food and Biotechnology", 2014, no. 3, pp. 78–85. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-kachestva-myasa-sviney-s-pomoschyu-prirodnoy-mineralnoy-dobavki?ysclid=lpwlg1zy2629907611> (accessed 22.09.2023). (In Russ.).

14. Tarasova E. Yu., Semenov E. I., Matrosova L. E., Mishina N. N., Mukharlyamova A. Z. Izuchenie sorbtionnoi aktivnosti potentsial'nykh sredstv profilaktiki mikotoksikozov v otnoshenii aflatoksinov [Study of sorption activity of potential means of prevention of mycotoxicosis against aflatoxins]. *Veterinarnyi vrach* = The Veterinarian, 2020, no. 2, pp. 51–58. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-sorbtsionnoy-aktivnosti-potentsialnyh-sredstv-profilaktiki-mikotoksikozov-v-otnoshenii-aflatoksinov?ysclid=lpwm6lfhv8327239777> (accessed 22.09.2023). (In Russ.).

15. Grekova A. A. Vliyanie preparata "Polisorb VP" na obmen veshchestv u svinei pri mikotoksikozakh [Influence of the drug "Polysorb VP" on metabolism in pigs with mycotoxicosis]. *Sel'skokhozyaystvennyi zhurnal* = Agricultural Magazine, 2009, no. 1-1, pp. 139–142. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-preparata-polisorb-vp-na-obmen-veschestv-u-sviney-pri-mikotoksikozakh> (accessed 21.09.2023). (In Russ.).

16. Grekova A. A. Antioksidantnyi effekt preparata "Polisorb VP" pri mikotoksikozakh svinei [Antioxidant effect of the drug "Polysorb VP" for mycotoxicosis of pigs]. *Sel'skokhozyaystvennyi zhurnal* = Agricultural magazine, 2009, no. 1–1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/antioksidantnyy-effekt-preparata-polisorb-vp-pri-mikotoksikozakh-sviney> (accessed 21.09.2023). (In Russ.).

17. Decaux C. Activated silicon dioxide to achieve a synergistic effect in pigs. *Int. Pig Topics*, 2017, vol. 32, no. 1, pp. 25. Available at: <https://ceresconutrition.com/wp-content/uploads/2017/02/Intl-Pig-Topics-Activated-Silicon-Dioxide-to-achieve-a-synergistic-effect-in-pigs.pdf> (accessed 15.09.2023). (In Eng.).

18. Araujo L. F., Vitagliano L. A., Decaux C., Janssen F. T., de Almeida Sartore Y. G., Granghelli C. A., Tse M. L. P., Carvalho R. S. B., Martins S. M. M. K., da Silva C.S. Araujo Activated crystalline silicon dioxide mitigates weight loss in lactating sows. *Italian Journal of Animal Science*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 123–128. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1080/1828051X.2021.2020692>

19. Lee J., Song M., Yun W., Liu S., Oh H., An J., Kim Y., Lee C., Kim H., Cho J. Effects of silicate derived from quartz porphyry supplementation in the health of weaning to growing pigs after lipopolysaccharide challenge. *Journal of Applied Animal Research*, 2020, vol. 48, pp. 440–447. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1080/09712119.2020.1817748>

20. Szcurek P., Kamyczek M., Pierzynowski S. G., Goncharova K., Michałowski P., Weström B., Prykhodko O., Grabowski T., Pieszka M. Effects of dietary supplementation with pancreatic-like enzymes of microbial origin (PLEM) and silicon dioxide (SiO₂) on the performance of piglets fed creep feed. *J. Anim. Sci.*, 2016, vol. 94, issue 3, pp. 62–65. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9607>

21. Jiang W., Mashayekhi H., Xing B. Bacterial toxicity comparison between nano- and micro-scaled oxide particles. *Environmental Pollution*, 2009, vol. 157, no. 5, pp. 1619–1625. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.025>

22. Selvarajan V., Obuobi S., Ee P.L.R. Silica nanoparticles-a versatile tool for the treatment of bacterial infections. *Front Chem*, 2020, vol. 8, pp. 602. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00602>
23. Colilla M., Vallet-Regí M. Targeted stimuli-responsive mesoporous silica nanoparticles for bacterial infection treatment. *Int J Mol Sci*, 2020, vol. 21, no. 22, pp. 8605. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21228605>
24. Fabbri J., Pensel P. E., Albani C. M., Arce V. B., Mártire D. O., Elissondo M. C. Drug repurposing for the treatment of alveolar echinococcosis: *in vitro* and *in vivo* effects of silica nanoparticles modified with dichlorophen. *Parasitology*, 2019, vol. 146, no. 13, pp. 1620–1630. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1017/S0031182019001057>
25. Sun Y., Chen D., Pan Y., Qu W., Hao H., Wang X., Liu Z., Xie S. Nanoparticles for antiparasitic drug delivery. *Drug Deliv*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 1206-1221. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1080/10717544.2019.1692968>
26. Pieszka M., Bederska-Łojewska D., Szczurek P., Pieszka M. The membrane interactions of nano-silica and its potential application in animal nutrition. *Animals (Basel)*, 2019, no. 12, pp. 1041. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.3390/ani9121041>

The article was submitted 04.10.2023; approved after reviewing 02.11.2023; accepted for publication 08.11.2023.

About the authors

Taras V. Gerunov

Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Deputy Director for Educational and Scientific Work, Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5594-2666>, tv.gerunov@omgau.org

Lyudmila K. Gerunova

Dr. Sci. (Veterinary), Professor, Professor of the Department of Diagnostics, Internal Non-Contagious Diseases, Pharmacology, Surgery and Obstetrics, Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0835-9352>, gerliud@mail.ru

Sergey Yu. Smolentsev

Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Professor of the Department of Livestock Production Technology, Mari State University (1 Lenin Sq., Yoshkar-Ola 424000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6086-1369>, Smolentsev82@mail.ru

Viktoriya A. Lapukhova

Postgraduate student of the of the Department of Diagnostics, Internal Non-Contagious Diseases, Pharmacology, Surgery and Obstetrics, Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russian Federation), va.lapukhova1721@omgau.org

All authors have read and approved the final manuscript.