

Светлана Викторовна Нотова¹, Алексей Николаевич Здоров²✉,
Максим Михайлович Маринчев³, Ольга Владимировна Маршинская⁴,
Татьяна Витальевна Казакова⁵

^{1,2,3,4,5}Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

¹snotova@mail.ru

²leha.zdorov.03@bk.ru

³maksimmarinchev@mail.ru

⁴m.olja2013@yandex.ru

⁵vaisvais13@mail.ru

НАНОЧАСТИЦЫ ОКСИДА ЦИНКА В ЖИВОТНОВОДСТВЕ: ОТ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ДО ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

*Цель исследования – всестороннее рассмотрение современных исследований о методах синтеза наночастиц оксида цинка и потенциальном использовании их в животноводстве. Методология систематического обзора проводилась в соответствии с международными рекомендациями PRISMA. Для выявления релевантных исследований был проведен электронный поиск в ведущих наукометрических базах PubMed, Web of Science и Scopus. В обзоре систематизированы современные данные о способах получения наночастиц оксида цинка, включая физико-химические и биологические методы синтеза; рассмотрены исследования по оценке безопасности используемых наночастиц в экспериментах *in vivo*; представлены результаты работ по применению данных наночастиц в рационах питания сельскохозяйственных животных в качестве минерального источника цинка. Разработка и внедрение альтернативных кормовых добавок в виде наночастиц микроэлементов является одним из перспективных подходов к оптимизации кормления сельскохозяйственных животных. Дефицит цинка представляет собой серьезную проблему в животноводстве, оказывая негативное влияние на обмен веществ, темпы и эффективность роста, репродуктивную систему животных. В связи с этим для профилактики дефицитных состояний, улучшения иммунитета и снижения восприимчивости к инфекционным заболеваниям, повышения продуктивных качеств животных учеными предлагается использование НЧ-ZnO. С одной стороны, перспективность использования НЧ-ZnO в качестве кормовых добавок подтверждается большим объемом накопленных данных. С другой стороны, до сих пор остаются вопросы о правильном выборе оптимальных дозировок, форм и размеров используемых наночастиц для различных видов сельскохозяйственных животных. Помимо этого необходимо проводить дальнейшие исследования по оценке долгосрочных эффектов и потенциальных рисков, связанных с использованием НЧ-ZnO.*

Ключевые слова: наночастицы, оксид цинка, сельское хозяйство, животноводство, метаболизм, продуктивность, безопасность

Для цитирования: Нотова С.В., Здоров А.Н., Маринчев М.М., и др. Наночастицы оксида цинка в животноводстве: от методов синтеза до практического применения // Вестник КрасГАУ. 2025. № 8. С. 117–129. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-8-117-129.

Финансирование: исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2024-550.

Svetlana Viktorovna Notova¹, Alexey Nikolaevich Zdorov^{2✉}, Maxim Mikhailovich Marinchev³,
Olga Vladimirovna Marshinskaya⁴, Tatyana Vitalievna Kazakova⁵

^{1,2,3,4,5}Orenburg State University, Orenburg, Russia

¹snotova@mail.ru

²leha.zdorov.03@bk.ru

³maksimmarinchev@mail.ru

⁴m.olja2013@yandex.ru

⁵vaisvais13@mail.ru

ZINC OXIDE NANOPARTICLES IN ANIMAL HUSBANDRY: FROM SYNTHESIS METHODS TO PRACTICAL APPLICATION

The aim of the study is a comprehensive review of modern research on the methods of synthesizing zinc oxide nanoparticles and their potential use in animal husbandry. The methodology of the systematic review was carried out in accordance with the international PRISMA recommendations. To identify relevant studies, an electronic search was conducted in the leading scientometric databases PubMed, Web of Science and Scopus. The review systematizes modern data on the methods of obtaining zinc oxide nanoparticles, including physicochemical and biological methods of synthesis; considers studies on the safety assessment of the used nanoparticles in in vivo experiments; presents the results of work on the use of these nanoparticles in the diets of farm animals as a mineral source of zinc. The development and implementation of alternative feed additives in the form of microelement nanoparticles is one of the promising approaches to optimizing the feeding of farm animals. Zinc deficiency is a serious problem in animal husbandry, having a negative impact on metabolism, growth rate and efficiency, and the reproductive system of animals. In this regard, scientists propose the use of NP-ZnO to prevent deficiency states, improve immunity and reduce susceptibility to infectious diseases, and increase the productive qualities of animals. On the one hand, the prospects of using NP-ZnO as feed additives are confirmed by a large volume of accumulated data. On the other hand, there are still questions about the correct choice of optimal dosages, shapes and sizes of nanoparticles used for various types of farm animals. In addition, further studies are needed to assess the long-term effects and potential risks associated with the use of NP-ZnO.

Keywords: nanoparticles, zinc oxide, agriculture, animal husbandry, metabolism, productivity, safety.

For citation: Notova SV, Zdorov AN, Marinchev MM, et al. Zinc oxide nanoparticles in animal husbandry: from synthesis methods to practical application. *Bulletin of KSAU*. 2025;(8):117-129. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-8-117-129.

Financing: the study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement № 075-15-2024-550.

Введение. Нанотехнология в широком смысле относится к области прикладной науки, объединяя в себе методы, применяющиеся при изучении, проектировании, производстве и использовании различных структур, устройств и систем, которые включают целенаправленный контроль и модификацию формы, размера, интеграции и взаимодействия составляющих наномасштабных элементов для получения объектов с новыми химическими, физическими, биологическими свойствами [1].

Данное современное направление связано с производством материалов, инструментов и систем с фундаментальными характеристиками

и новыми функциями. Размер наноматериалов обуславливает уникальные и различные физико-химические свойства [2]. Нанотехнологии широко применяются в разных областях, включая энергетику, физику, материаловедение, медицину, сельское хозяйство, электронику, фармацевтику и машиностроение. Благодаря обработке некоторых наноматериалов на атомарном уровне данные вещества приобретают уникальные свойства, что позволяет улучшить существующие или создать принципиально новые, не имеющие аналогов технологии [3].

Следует отметить, что нанотехнологии находят применение практически во всех областях

сельского хозяйства, а именно в растениеводстве, животноводстве, птицеводстве, рыбоводстве, ветеринарии и производстве сельхозтехники. Повышение качества и безопасности продуктов питания, сокращение сельскохозяйственных затрат, повышение устойчивости к неблагоприятным погодным условиям – все это лишь малая часть потенциальных преимуществ науки данной области. Также нанотехнологии перспективны в улучшении сельского хозяйства и пищевой промышленности за счет использования новых наноинструментов для быстрой диагностики заболеваний, а также в повышении способности поглощения растениями различных питательных веществ из почвы [4].

Наночастицы оксида цинка (HЧ-ZnO) занимают третье место по ежегодному объему производства нанометаллов, уступая лишь наночастицам оксида титана и оксида кремния. Это связано с тем, что оксид цинка в наноформе представляет большой интерес для применения во многих областях науки благодаря особым физико-химическим свойствам, а именно – хорошей биодоступности и биосовместимости с другими молекулами, экологичности, низкой токсичности и высокой антибактериальной активности [5].

Цель исследования – всестороннее рассмотрение современных исследований о методах синтеза и потенциальном использовании наночастиц оксида цинка в животноводстве.

Объекты и методы. Методология систематического обзора использовалась в соответствии с международными рекомендациями PRISMA. Для выявления релевантных исследований был проведен электронный поиск в ведущих наукометрических базах PubMed, Web of Science и Scopus.

Результаты и их обсуждение

Физиологическая роль цинка. Цинк является незаменимым микроэлементом, который играет ключевую роль в различных физиологических процессах организма. Являясь кофактором, цинк необходим для функционирования десятков ферментов (инсулина поджелудочной железы, супероксиддисмутазы антиоксидантного фермента), синтеза белков (например коллагена), деления и дифференцировки клеток, формирования Т-клеточного иммунитета. Данный микроэлемент также образует комплексы с не-

которыми органическими соединениями неферментативной природы, в частности с нуклеиновыми кислотами, ответственными за хранение и передачу наследственной информации [6, 7].

Учеными были выявлены специфические изменения, возникающие при недостатке цинка у сельскохозяйственных животных (кур, перепелов, овец, свиней и крупного рогатого скота) [8]. Важность данного химического элемента в обменных процессах становится понятной при перечислении основных симптомов, описанных при развитии его дефицита: снижение массы тела, замедление роста и окостенения скелета, депигментация и огрубление шерсти, уменьшение роста волос и их выпадение, задержка развития вторичных половых признаков, снижение оплодотворяющей способности сперматозоидов, повреждение кожных покровов и медленное заживление ран, снижение Т-клеточного иммунитета и сопротивляемости к инфекциям, аномалии эмбрионов [9]. Следует отметить, что дефицит цинка может возникнуть не только при его недостатке в рационе, но и при нарушении усвоения желудочно-кишечным трактом. Сообщается, что повышенный уровень солей кальция, фосфора, а также фитиновой кислоты в рационе способствует снижению усвояемости цинка [10, 11]. В связи с этим для профилактики подобных состояний, повышения неспецифической резистентности и адаптивности организма, предотвращения массовой заболеваемости, а также обеспечения высокой продуктивности и воспроизводства учеными разрабатываются альтернативные кормовые добавки в виде HЧ-ZnO в качестве минерального источника цинка при кормлении сельскохозяйственных животных.

Способы получения HЧ-ZnO . В настоящее время для синтеза наночастиц используют различные методы. Выбор метода определяет морфометрические (размер и форма) и физико-химические свойства полученных частиц, что, в свою очередь, влияет на их функциональную активность.

Методы получения наночастиц, наноматериалов и наносистем условно можно классифицировать по различным признакам. По природе процесса синтеза выделяют физические (термические, механические), химические (термолиз, метод осаждения), гибридные (механохимические, плазмохимические, гидротермальные)

методы. В настоящее время широкое применение нашли биологические методы синтеза. Благодаря использованию определенных видов растений (растительный синтез) и бактерий (бактериальный синтез) удается получать определенные наночастицы с различными размерами и формой [12].

Гидротермальный метод. Данный метод синтеза характеризуется взаимодействием исходных химических веществ в водном растворе под высокими давлением и температурой. За счет пониженной температуры процесса, экологичности, низкой стоимости, высокой производительности и использования базового оборудования данный способ вызывает большой интерес со стороны потребителей. За счет регуляции температуры, продолжительности синтеза и изменения концентрации исходных веществ можно корректировать форму и размеры наночастиц. Однако из-за высокой тепловой инерции автоклава применение данного способа для быстрых химических синтезов невозможно [13, 14].

Существует множество видов гидротермального синтеза наночастиц, например совсем новый гидротермальный синтез Hf-ZnO с использованием импульсного реактора. Данное устройство позволяет получать продукты с очень высокой чистотой и плотностью при температуре около 25°C [15].

Метод осаждения. В данном методе исходный раствор солей цинка смешивают с подходящим реагентом. Реагентом может выступать основание или кислота в контролируемых условиях. В качестве исходных веществ, из которых будут производиться наночастицы при экстремальных температурах и давлении в герметичном водном растворе, могут использоваться нитрат цинка и мочевины. Данный метод является эффективным ввиду определенных преимуществ, таких как скорость синтеза, экономичность и простота методики.

В настоящее время интересным методом получения Hf-ZnO является метод плазменно-химического осаждения из паровой фазы. Плазменное инициирование позволяет исключить возможность загрязнения конечного продукта материалами оборудования и регулировать температуру зоны осаждения в более широком диапазоне, тем самым задавая условия

для роста структуры. Данный метод позволяет получать Hf-ZnO с заданными размерами и свойствами. Для этого необходимо либо повысить температуру синтеза для получения более вытянутых структур в одном направлении, либо повысить мощность плазменного разряда для уменьшения поперечного размера осаждаемых структур или понизить температуру реактора в зоне осаждения для уменьшения поперечного размера осаждаемых структур. Однако для широкого применения данный метод пока не подходит, так как необходимо фундаментально изучить влияние особенностей процесса на конечный продукт.

Методы биологического синтеза. Несмотря на наличие множества физических и химических методов синтеза, а также гибридных видов, самой перспективной формой синтеза является биологический, или «зеленый», синтез. В данном синтезе используются различные безопасные вещества (вода или натуральные экстракты). Именно поэтому использование «зеленого синтеза» для производства данных частиц является приоритетным [16].

Растительный синтез. Данный метод является выгодным в связи с доступностью, низкой стоимостью и, что наиболее важно, безопасностью для живых существ и окружающей среды. Растительные экстракты включают вторичные метаболиты (фитохимические вещества/биоактивные вещества), которые могут восстанавливать ионы металлов и стимулировать синтез наночастиц с различными свойствами. Фенолы, флавоноиды, алкалоиды, стероиды, сапонины действуют как восстанавливающие, так и покрывающие агенты для исходного раствора, что приводит к образованию наночастиц различных величин [17, 18].

Тем не менее даже в таком перспективном методе есть свои недостатки, а именно получение наночастиц определенных размеров. В данном случае физические и химические методы превосходят методы растительного синтеза [19, 20].

Для «зеленого» синтеза Hf-ZnO используется множество видов растений. Водный экстракт *Kalanchoe blossfeldiana* является одним из наиболее распространенных биогенных прекурсоров. Получаемые Hf-ZnO характеризуются гексагональной структурой и размерностью около 95 нм, вдобавок проявляют значительную анти-

бактериальную активность в отношении штаммов бактерий, таких как *E. coli*, *S. aureus* и *P. aeruginosa*, а также грибов *F. solani*, *A. alternat* и *Helmenthosporium sp* [21].

Для синтеза также используются:

- экстракты из плодов и листьев *Citrullus colocynthis*. НЧ-ZnO характеризуются преимущественно сферической формой и размерностью от 64 до 82 нм, проявляют ингибирующее воздействие на *B. subtilis*, *E. coli*, а также *K. pneumoniae* [22];

- водный экстракт семян *Mangifera indica*. НЧ-ZnO характеризуются сферической формой и размерностью от 40 до 60 нм. При этом данные частицы продемонстрировали значительный ингибирующий эффект против *B. subtilis* и *E. coli* [23];

- метанольный экстракт листьев *Viscum album*. НЧ-ZnO характеризуются квазисферической формой и размерностью около 50 нм и обладают высокой антибактериальной активностью в отношении *E. coli*, *S. aureus* и *P. aeruginosa* [24];

- смесь *Aspalathus linearis* и *Musa paradisiaca*. Согласно G.V. Lyimo, синтезированные НЧ-ZnO характеризуются гетерогенной структурой (как стержнеобразные, так и кристаллообразные наночастицы). В ходе ряда экспериментов было выяснено, что данные частицы обладают противогрибковой активностью в отношении *C. albicans* [25].

Аквакультурные морские макроводоросли могут быть надежным источником биомассы для «зеленого» производства наночастиц оксидов металлов, в т. ч. НЧ-ZnO. Вследствие вышесказанного эти растения являются одними из самых безопасных и стабильных природных материалов, используемых в нанотехнологии [26].

Натуральное вещество из водорослей действует как покрывающий или восстанавливающий и стабилизирующий агент при преобразовании солей металлов в металлические, оксидные или биметаллические наночастицы [27].

В настоящее время для синтеза НЧ-ZnO используется множество водорослей. Наиболее часто используется *Arthrospira platensis*. Размер полученных наночастиц находился в диапазоне от 30,0 до 55,0 нм. В то же время данные частицы оказали ингибирующее действие на рост

B. subtilis, *S. aureus*, *P. aeruginosa*, *E. coli* и *C. albicans* [28].

НЧ-ZnO, полученные с использованием *Spirogyra hyalina*, обладают сферической формой, диапазон размеров при этом составляет от 50 до 80 нм. При этом частицы показывают различную антибактериальную активность против *P. aeruginosa*, *B. pumilus*, *S. aureus* и *E. coli*, особенно высокую в отношении *S. aureus* [29].

Бактериальный синтез. «Зеленый синтез» наночастиц с использованием микроорганизмов имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными физико-химическими методами. В частности, данный способ предлагает быстрый, экономически эффективный, чистый, нетоксичный и экологически безопасный метод синтеза наночастиц с широким интервалом размеров, форм, составов и физико-химических свойств. Например, в настоящее время широко распространен биосинтез НЧ-ZnO с использованием *Enterobacter sp*. Диапазон размеров получаемых наночастиц составляет от 14,92 до 22,54 нм с агрегированной и гексагональной структурой [30].

Основные недостатки синтеза наночастиц на основе микроорганизмов включают сложные этапы, такие как отбор микробных проб, выделение, культивирование и хранение. Кроме того, восстановление наночастиц, полученных данным методом, требует последующей доработки [31].

Оценка влияния наночастиц цинка (НЧ-ZnO) в экспериментах in vivo. На НЧ-ZnO с каждым годом обращается все больше внимания благодаря их способности к биосовместимости, устойчивости и экономически эффективным свойствам. К тому же использование наночастиц экономически обосновано. В последнее десятилетие был проведен ряд масштабных исследований, дающих оценку воздействию НЧ-ZnO на функциональное состояние различных систем организма [32].

В первоначальных исследованиях особое внимание уделялось оценке токсических эффектов НЧ-ZnO. В работе G. Rahimi Kalateh Shah Mohammad et al. изучалось воздействие НЧ-ZnO на печень и селезенку крыс. В ходе гистопатологического анализа авторами было выявлено цитотоксическое воздействие НЧ-ZnO при пероральном введении наночастиц в дозировках 100, 200 и 300 мг/кг в течение 28 дней [33].

В исследовании авторов M.J. Al-Ragi и S.S. Karieb были проанализированы результаты воздействия НЧ-ZnO на печень мышей. В течение 7 и 14 дней животным перорально вводили НЧ-ZnO в дозировках 100 и 200 мг/кг массы тела. В ходе исследования были выявлены гистологические повреждения печени (некроз, разрушение мембран гепатоцитов, увеличение клеток Купфера). Помимо этого, активность ферментов глутамат-оксалоацетаттрансаминазы и глутамат-пируваттрансаминазы значительно превышала контрольные значения, что свидетельствовало о нарушении работы печени [34].

В опыте, проведенном специалистами из Египта, при пероральном введении НЧ-ZnO в дозировках 50 и 100 мг/кг в течение 3 недель отмечалось развитие окислительного стресса, повышение уровня малонового диальдегида и оксида азота в крови животных [35].

По мере накопления данных научное сообщество перешло к поиску оптимальных нетоксичных доз НЧ-ZnO, которые могли бы обладать профилактическим эффектом относительно воспалительных процессов и иммунитета, окислительного стресса, повышения продуктивных качеств животных. В эксперименте R.Z. Hamza и соавторов проводилась оценка эффективности использования НЧ-ZnO с целью снижения окислительного стресса на фоне воздействия глутамата натрия. Воздействие глутамата натрия приводило к снижению активности ферментов супероксиддисмутазы, каталазы, глутатионпероксидазы в коре головного мозга крыс. Однако 30-дневное пероральное введение НЧ-ZnO в дозе 10 мг/кг совместно с экстрактом зеленого чая способствовало восстановлению активности всех вышеперечисленных ферментов у лабораторных животных [36].

В опыте авторов A.A. Goma и A.R. Salama проводилась оценка воздействия НЧ-ZnO на поведенческие реакции, антиоксидантный и иммунный статус лабораторных животных. Результаты показали, что введение НЧ-ZnO в дозе 5 мг/кг способствовало улучшению когнитивных функций крыс. При этом отмечалось повышение активности антиоксидантных ферментов и снижение маркеров воспаления. Напротив, более высокая дозировка НЧ-ZnO (10 мг/кг) оказывала негативное влияние на поведение и обучаемость животных [37].

В эксперименте A.A. Goma и H.G. Tohamy оценивалось воздействие НЧ-ZnO на репродуктивную функцию. В ходе работы было установлено, что внутрибрюшинное введение НЧ-ZnO в дозировке 5 мг/кг (дважды в неделю в течение восьми последовательных недель) благоприятно повлияло на репродуктивную функцию животных – отмечалось восстановление функций фолликулостимулирующего гормона и лютеинизирующих гормонов [38].

В исследовании специалистов T. Chen, L. Zhang и L. Yao оценивалось пероральное воздействие НЧ-ZnO в дозировках 7 и 350 мг/кг в течение 35 дней на ткани и клетки репродуктивной системы крыс линии Sprague Dawley. Наблюдалось заметное увеличение количества нарушений в структуре яичек при увеличении дозы НЧ-ZnO. Подвижность сперматозоидов в группе с высокой дозировкой наночастиц оказалась значительно ниже, чем в контрольной группе [39].

В исследовании ученых из Александрии было установлено потенциальное нейропротекторное действие НЧ-ZnO. Авторами было показано, что ежедневное пероральное введение НЧ-ZnO в дозировке 50 мг/кг массы тела крыс в течение шести недель способствовало подавлению нейроапоптоза, нейровоспаления, когнитивной дисфункции и амилоидогенеза, вызванных высокожировой диетой и стрептозотоцином (модель сахарного диабета 2-го типа), в гиппокампе крыс [40].

Использование НЧ-ZnO в кормлении сельскохозяйственных животных. Недостаток знаний определил особый интерес ученых к использованию НЧ-ZnO в животноводстве, в связи с чем синтезируемые наночастицы могут быть использованы в качестве различных противовоспалительных средств, специальных добавок в корма для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных [41].

В опыте W.M. Dosoky проводилась оценка влияния НЧ-ZnO на организм цыплят-бройлеров. Было выяснено, что использование НЧ-ZnO в дозировках 5 и 10 мг/кг рациона оказывает благоприятный эффект на иммунный статус птицы. Однако дозировки более 10 мг/кг НЧ-ZnO рациона не рекомендуются, поскольку это может привести к негативному воздействию на иммунный

статус и гистологическую структуру иммунных органов [42].

В исследовании A.A.A. Abdel-Wareth с соавторами оценивалось влияние НЧ-ZnO на организм кроликов. Результаты данной работы показали, что внесение в рацион 50 мг/кг НЧ-ZnO способствовало увеличению показателей роста, улучшению работы почек и печени, а также накоплению цинка в тканях [43].

В эксперименте Т. Xia проводилась оценка влияния НЧ-ZnO на организм поросят. Использование НЧ-ZnO в дозировке 600 мг/кг корма увеличило экспрессию мРНК антиоксидантных

ферментов в тощей кишке. Анализ последовательности генов 16S рРНК показал, что НЧ-ZnO не только увеличили *Streptococcus* и *Lactobacillus* в подвздошной кишке, но и уменьшили *Oscillospira* и *Prevotella* в толстой кишке. Авторы предположили, что использование НЧ-ZnO в дозировке 600 мг/кг корма может эффективно снизить заболеваемость диареей у поросят [44].

При этом было проведено множество исследований для изучения влияния НЧ-ZnO на продуктивные качества сельскохозяйственных животных (табл.).

**Обзор исследований влияния НЧ-ZnO
на продуктивные качества сельскохозяйственных животных
Review of studies on the effect of NP-ZnO on the productive qualities of farm animals**

Животные	Доза НЧ-ZnO, мг/кг	Эффекты	Литература
Бройлеры	60 и 90	Улучшилось потребление и продуктивность корма, а также прирост веса бройлеров в первые 21 день	Ahmadi F. et al., 2013 [45]
	20 и 60	Эффективность конверсии корма снизилась, но в то же время последовало увеличение прироста массы тела по сравнению с ZnO и НЧ-ZnO при дозировке 100 мг/г	Zhou Y., 2005 [46]
Самцы кроликов	20, 40, 60 и 80	Добавка может улучшить показатели роста, критерии тушки и качество мяса у самцов кроликов, выращенных в условиях жаркого климата	Abdel-Wareth A.A.A. et al., 2022 [47]
Поросята-отъемыши	500, 1000 или 2500 ppm Zn в виде НЧ-ZnO	Более высокий общий среднесуточный прирост	Oh S.M. et al., 2020 [48]

Заключение. Таким образом, разработка и внедрение альтернативных кормовых добавок в виде наночастиц микроэлементов является одним из перспективных подходов к оптимизации кормления сельскохозяйственных животных. Дефицит цинка представляет собой серьезную проблему в животноводстве, оказывая негативное влияние на обмен веществ, темпы и эффективность роста, репродуктивную систему животных. В связи с этим для профилактики дефицитных состояний, улучшения иммунитета и снижения восприимчивости к инфекционным заболеваниям, повышения продуктивных ка-

честв животных учеными предлагается использование НЧ-ZnO. С одной стороны, перспективность использования НЧ-ZnO в качестве кормовых добавок подтверждается большим объемом накопленных данных. С другой стороны, до сих пор остаются вопросы о правильном выборе оптимальных дозировок, форм и размеров используемых наночастиц для различных видов сельскохозяйственных животных. Помимо этого, необходимо проводить дальнейшие исследования по оценке долгосрочных эффектов и потенциальных рисков, связанных с использованием НЧ-ZnO.

Список источников

1. Banerjee HN., Verma M. Application of nanotechnology in cancer // *Technol Cancer Res Treat*. 2008. Vol. 7, N 2. P. 149–154. DOI: 10.1177/153303460800700208.
2. Abaszadeh F., Ashoub M.H., Khajouie G., et al. Nanotechnology development in surgical applications: recent trends and developments // *Eur J Med Res*. 2023. Vol. 28, N 1. P. 537. DOI: 10.1186/s40001-023-01429-4. EDN: JWWXGB.
3. Duhan J.S., Kumar R., Kumar N., et al. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture // *Biotechnol Rep (Amst)*. 2017. Vol. 15. P. 11–23. DOI: 10.1016/j.btre.2017.03.002. EDN: YGMYBG.
4. Prasad R., Bhattacharyya A., Nguyen Q.D. Nanotechnology in Sustainable Agriculture: Recent Developments, Challenges, and Perspectives // *Front Microbiol*. 2017. Vol. 8. P. 1014. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01014.
5. Ahmed S., Annu, Chaudhry S.A., et al. A review on biogenic synthesis of ZnO nanoparticles using plant extracts and microbes: a prospect towards green chemistry // *J. Photochem*. 2017. Vol. 166. P. 272–284. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2016.12.011.
6. Скальный А.В., Рудаков И.А. Биозлементы в медицине. М.: ОНИКС 21 век; Мир, 2004. EDN: WQRZFT.
7. Тутельян В.А., Спиричев В.Б., Суханов Б.П., и др. Микронутриенты в питании здорового и больного человека. М.: Колос, 2002. EDN: SBNRSR.
8. Hill G.M., Shannon M.C. Copper and zinc nutritional issues for agricultural animal production // *Biol Trace Elem Res*. 2019. Vol. 188, N 1. P. 148–159. DOI: 10.1007/s12011-018-1578-5. EDN: ZVLRFK.
9. Оберлис Д., Харланд Б.Ф., Скальный А.В. Биологическая роль макро- и микроэлементов у человека и животных. СПб.: Наука, 2008. EDN: QKRRQX.
10. Gupta R.K., Gangoliya S.S., Singh N.K. Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains // *J Food Sci Technol*. 2015. Vol. 52, N 2. P. 676–684. DOI: 10.1007/s13197-013-0978-y. EDN: DPGQCY.
11. Wood R.J., Zheng J.J. High dietary calcium intakes reduce zinc absorption and balance in humans // *Am J Clin Nutr*. 1997. Vol. 65, N 6. P. 1803–1809. DOI: 10.1093/ajcn/65.6.1803.
12. Michalak I., Dziergowska K., Alagawany M., et al. The effect of metal-containing nanoparticles on the health, performance and production of livestock animals and poultry // *Vet Q*. 2022. Vol. 42, N 1. P. 68–94. DOI: 10.1080/01652176.2022.2073399. EDN: WLKILY.
13. Zhou X., Hayat Z., Zhang D.D., et al. Zinc oxide nanoparticles: synthesis, characterization, modification, and applications in food and agriculture // *Processes*. 2023. Vol. 11, N 4. 11193. DOI: 10.3390/pr11041193. EDN: EPLXEZ.
14. Sabir S., Arshad M., Chaudhari S.K. Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: synthesis and applications // *Scientific World Journal*. 2014. Vol. 1-8. 925494. DOI: 10.1155/2014/925494.
15. Strachowski T., Baran M., Malek M., et al. Hydrothermal synthesis of zinc oxide nanoparticles using different chemical reaction stimulation methods and their influence on process kinetics // *Materials (Basel)*. 2022. Vol. 15, N 21. 7661. DOI: 10.3390/ma15217661. EDN: NHMCNB.
16. Sazanova T.S., Mochalov L.A., Logunov A.A., et al. Influence of temperature parameters on morphological characteristics of plasma deposited zinc oxide nanoparticles // *Nanomaterials (Basel)*. 2022. Vol. 12, N 11. 1838. DOI: 10.3390/nano12111838. EDN: OWZULO.
17. Ehsan M., Waheed A., Ullah A., et al. Plant-based bimetallic silver-zinc oxide nanoparticles: a comprehensive perspective of synthesis, biomedical applications, and future trends // *BioMed Research International*. 2022. Vol. 20. 1215183. DOI: 10.1155/2022/1215183. EDN: PHVJRY.
18. Jafarirad S., Mehrabi M., Divband B., et al. Biofabrication of zinc oxide nanoparticles using fruit extract of *Rosa canina* and their toxic potential against bacteria: A mechanistic approach // *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2016. Vol. 59. P. 296–302. DOI: 10.1016/j.msec.2015.09.089.
19. Sharma P., Urfan M., Anand R., et al. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Eucalyptus lanceolata* leaf litter: characterization, antimicrobial and agricultural efficacy in maize // *Physiol Mol Biol Plants*. 2022. Vol. 28, N 2. P. 363–381. DOI: 10.1007/s12298-022-01136-0. EDN: ZOAILD.

20. Basnet P., Chanu T.I., Samanta D., et al. A review on bio-synthesized zinc oxide nanoparticles using plant extracts as reductants and stabilizing agents // J Photochem Photobiol B. 2018. Vol. 183. P. 201–221. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2018.04.036.
21. Aldalbahi A., Alterary S., Almoghim R.A.A., et al. Greener synthesis of zinc oxide nanoparticles: characterization and multifaceted applications // Molecules. 2020. Vol. 25, N 18. 4198. DOI: 10.3390/molecules25184198. EDN: XCBPML.
22. Kiani B.H., Ajmal Q., Akhtar N., et al. Biogenic synthesis of zinc oxide nanoparticles using citrullus colocynthis for potential biomedical // Plants (Basel). 2023. Vol. 12, N 2. P. 362. DOI: 10.3390/plants12020362. EDN: LYFQKA.
23. Rajeshkumar S., Parameswari R.P., Sandhiya D., et al. Green synthesis, characterization and bioactivity of mangifera indica seed-wrapped zinc oxide nanoparticles // Molecules. 2023. Vol. 28, N 6. P. 2806–2818. DOI: 10.3390/molecules28062818. EDN: FGYNLE.
24. Mushtaq W., Ishtiaq M., Maqbool M., et al. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using viscum album extracts: unveiling bioactive compounds, antibacterial potential, and antioxidant activities // Plants (Basel). 2023. Vol. 12, N 11. 2130. DOI: 10.3390/plants12112130. EDN: CKAWEH.
25. Lyimo G.V., Ajayi R.F., Maboza E., et al. A green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Musa Paradisiaca and Rooibos extracts // MethodsX. 2022. Vol. 9. 101892. DOI: 10.1016/j.mex.2022.101892. EDN: QTORIG.
26. Alprol A.E., Mansour A.T., El-Beltagi H.S., et al. Algal extracts for green synthesis of zinc oxide nanoparticles: promising approach for algae bioremediation // Materials (Basel). 2023. Vol. 16, N 7. P. 2819. DOI: 10.3390/ma16072819. EDN: RGFUJT.
27. Al-Nadhari S., Al-Enazi N.M., Alshehrei F., et al. A review on biogenic synthesis of metal nanoparticles using marine algae and its applications // Environ Res. 2021. Vol. 194. 110672. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110672. EDN: XELLLP.
28. El-Beley E.F., Farag M.M.S., Said H.A., et al. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) using *Arthrospira platensis* (class: *Cyanophyceae*) and evaluation of their biomedical activities // Nanomaterials (Basel). 2021. Vol. 11, N 1. P. 95. DOI: 10.3390/nano11010095. EDN: WMQDBO.
29. Hameed H., Waheed A., Sharif M.S., et al. Green synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles from green algae and their assessment in various biological applications // Micromachines (Basel). 2023. Vol. 14, N 5. P. 928. DOI: 10.3390/mi14050928. EDN: IBJEXT.
30. Elsilk S.E., El-Shenody R.A., Affi S.S., et al. Green-synthesized zinc oxide nanoparticles by *Enterobacter* sp.: unveiling characterization, antimicrobial potency, and alleviation of copper stress in *Vicia faba* (L.) plants // BMC Plant Biol. 2024. Vol. 24, N 1. P. 474. DOI: 10.1186/s12870-024-05150-0. EDN: BEXHLO.
31. Bahrulolum H., Nooraei S., Javanshir N., et al. Green synthesis of metal nanoparticles using microorganisms and their application in the agrifood sector // J Nanobiotechnology. 2021. Vol. 19, N 1. P. 86. DOI: 10.1186/s12951-021-00834-3. EDN: DMRLHC.
32. Sutunkova M.P., Privalova L.I., Minigalieva I.A., et al. The most important inferences from the Ekaterinburg nanotoxicology team's animal experiments assessing adverse health effects of metallic and metal oxide nanoparticles // Toxicology reports. 2018. Vol. 5. P. 363–376. DOI: 10.1016/j.toxrep.2018.03.008. EDN: XXWRBZ.
33. Mohammad R.K.Sh., Seyedi S.M.R., Karimi E., et al. The cytotoxic properties of zinc oxide nanoparticles on the rat liver and spleen, and its anticancer impacts on human liver cancer cell lines // J Biochem Mol Toxicol. 2019. Vol. 33, N 7. e22324. DOI: 10.1002/jbt.22324.
34. Al-Ragi M.J., Karieb S.S., Fathallah N., et al. Effect of zinc oxide nanoparticles on liver functions in albino mice // Cureus. 2024. Vol. 16, N 2. e54822. DOI: 10.7759/cureus.54822. EDN: OTNJTC.
35. Hassan M.E., Hassan R.R., Diab K.A., et al. Nanoencapsulation of thyme essential oil: a new avenue to enhance its protective role against oxidative stress and cytotoxicity of zinc oxide nanoparticles in rats // Environmental science and pollution research international. 2021. Vol. 28, N 37. P. 52046–52063. DOI: 10.1007/s11356-021-14427-y. EDN: PRPLEQ.

36. Hamza R.Z., Al-Salmi F.A., El-Shenawy N.S., et al. Evaluation of the effects of the green nanoparticles zinc oxide on monosodium glutamate-induced toxicity in the brain of rats // *PeerJ*. 2019. Vol. 7. e7460. DOI: 10.7717/peerj.7460.
37. Goma A.A., Salama A.R., Tohamy H.G., et al. Examining the Influence of zinc oxide nanoparticles and bulk zinc oxide on rat brain functions: a comprehensive neurobehavioral, antioxidant, gene expression, and histopathological investigation // *Biol Trace Elem Res*. 2024. Vol. 22, N 10. P. 4654–4673. DOI: 10.1007/s12011-023-04043-x. EDN: GYFHTH.
38. Goma A.A., Tohamy H.G., El-Kazaz S.E., et al. Insight study on the comparison between zinc oxide nanoparticles and its bulk impact on reproductive performance, antioxidant levels, gene expression, and histopathology of testes in male rats // *Antioxidants (Basel)*. 2020. Vol. 10, N 1. P. 41. DOI: 10.3390/antiox10010041. EDN: JMUUVQE.
39. Chen T., Zhang L., Yao L., et al. Zinc oxide nanoparticles-induced testis damage at single-cell resolution: Depletion of spermatogonia reservoir and disorder of Sertoli cell homeostasis // *Environ Int*. 2023. Vol. 181. 108292. DOI: 10.1016/j.envint.2023.108292. EDN: DPILOQ.
40. Abdulmalek S., Nasef M., Awad D., et al. protective effect of natural antioxidant, curcumin nanoparticles, and zinc oxide nanoparticles against type 2 diabetes-promoted hippocampal neurotoxicity in rats // *Pharmaceutics*. 2021. Vol. 13, N 11. 1937. DOI: 10.3390/pharmaceutics13111937. EDN: RAYGPV.
41. Jabri H.A., Saleem M.H., Rizwan M., et al. Zinc oxide nanoparticles and their biosynthesis: overview // *Life (Basel)*. 2022. Vol. 12, N 4. P. 594. DOI: 10.3390/life12040594. EDN: PEPUZK.
42. Dosoky W.M., Al-Banna A.A., Zahran S.M., et al. Zinc oxide nanoparticles induce dose-dependent toxicosis in broiler chickens reared in summer season // *Environmental science and pollution research international*. 2022. Vol. 29, N 36. P. 54088–54107. DOI: 10.1007/s11356-022-19156-4. EDN: XCYEEC.
43. Abdel-Wareth A.A.A., El-Sayed H.G.M., Abdel-Warith A.-W.A., et al. Effects of dietary acacia nilotica fruit, zinc oxide nanoparticles and their combination on productive performance, zinc retention, and blood biochemistry of rabbits // *Animals*. 2023. Vol. 13, N 20. 3296. DOI: 10.3390/ani13203296. EDN: HBMDNO.
44. Xia T., Lai W., Han M., et al. Dietary ZnO nanoparticles alters intestinal microbiota and inflammation response in weaned piglets // *Oncotarget*. 2017. Vol. 8, N 39. P. 64878–64891. DOI: 10.18632/oncotarget.17612.
45. Ahmadi F., Ebrahimnezhad Y., Sis N.M., et al. The effects of zinc oxide nanoparticles on performance, digestive organs and serum lipid concentrations in broiler chickens during starter period // *Int J Biosci*. 2013. Vol. 3, N 7. P. 23–29. DOI: 10.3382/ps/pez093.
46. Zhou Y. Recent Advances in Ionic Liquids for Synthesis of Inorganic Nanomaterials // *Current Nanoscience*. 2005. Vol. 1, N 1. P. 65–74. DOI: 10.2174/1573413052953174.
47. Abdel-Wareth A.A.A., Amer S.A., Mobashar M., et al. Use of zinc oxide nanoparticles in the growing rabbit diets to mitigate hot environmental conditions for sustainable production and improved meat quality // *BMC veterinary research*. 2022. Vol. 18, N 1. P. 354. DOI: 10.1186/s12917-022-03451-w. EDN: UPGBKK.
48. Oh S.M., Kim M.Ju., Hosseindoust A., et al. Hot melt extruded-based nano zinc as an alternative to the pharmacological dose of ZnO in weanling piglets // *Asian-Australasian journal of animal sciences*. 2020. Vol. 33, № 6. P. 992–1001. DOI: 10.5713/ajas.19.0140.

References

1. Banerjee HN, Verma M. Application of nanotechnology in cancer. *Technol Cancer Res Treat*. 2008;7(2):149-54. DOI: 10.1177/153303460800700208.
2. Abaszadeh F, Ashoub MH, Khajouie G, et al. Nanotechnology development in surgical applications: recent trends and developments. *Eur J Med Res*. 2023;28(1):537. DOI: 10.1186/s40001-023-01429-4. EDN: JWWXGB.
3. Duhan JS, Kumar R, Kumar N, et al. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnol Rep (Amst)*. 2017;15:11-23. DOI: 10.1016/j.btre.2017.03.002. EDN: YGMYBG.

4. Prasad R, Bhattacharyya A, Nguyen QD. Nanotechnology in sustainable agriculture: recent developments, challenges, and perspectives. *Front Microbiol.* 2017;8:1014. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01014.
5. Ahmed S, Annu, Chaudhry SA, et al. A review on biogenic synthesis of ZnO nanoparticles using plant extracts and microbes: a prospect towards green chemistry. *J Photochem.* 2017;166:272-284. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2016.12.011.
6. Skal'nyj AV, Rudakov IA. *Bioelementy v medicine*. Moscow: ONIKS 21 vek; Mir; 2004. (In Russ.). EDN: WQRZFT.
7. Tutelian VA, Spirichev VB, Sukhanov BP, et al. *Mikronutrienty v pitanii zdorovykh i bol'nykh lyudei*. Moscow: Kolos, 2002. (In Russ.). EDN: SBNRSR.
8. Hill GM, Shannon MC. Copper and zinc nutritional issues for agricultural animal production. *Biol Trace Elem Res.* 2019;188(1):148-159. DOI: 10.1007/s12011-018-1578-5. EDN: ZVLRFK.
9. Oberlis D, Harland BF, Skal'nyj AV. *Biologicheskaya rol' makro- i mikroelementov u cheloveka i zhivotnyh*. Saint-Petersburg: Nauka; 2008. (In Russ.). EDN: QKRRQX.
10. Gupta RK, Gangoliya SS, Singh NK. Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains. *J Food Sci Technol.* 2015;52(2):676-684. DOI: 10.1007/s13197-013-0978-y. EDN: DPGQCY.
11. Wood RJ, Zheng JJ. High dietary calcium intakes reduce zinc absorption and balance in humans. *Am J Clin Nutr.* 1997;65(6):1803-1809. DOI: 10.1093/ajcn/65.6.1803.
12. Michalak I, Dziargowska K, Alagawany M, et al. The effect of metal-containing nanoparticles on the health, performance and production of livestock animals and poultry. *Vet Q.* 2022;42(1):68-94. DOI: 10.1080/01652176.2022.2073399. EDN: WLKILY.
13. Zhou X, Hayat Z, Zhang DD, et al. Zinc oxide nanoparticles: synthesis, characterization, modification, and applications in food and agriculture. *Processes.* 2023;11(4):11193. DOI: 10.3390/pr11041193. EDN: EPLXEZ.
14. Sabir S, Arshad M, Chaudhari SK. Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: synthesis and applications. *Scientific World Journal.* 2014;1-8:925494. DOI: 10.1155/2014/925494.
15. Strachowski T, Baran M, Malek M, et al. Hydrothermal synthesis of zinc oxide nanoparticles using different chemical reaction stimulation methods and their influence on process kinetics. *Materials (Basel).* 2022;15(21):7661. DOI: 10.3390/ma15217661. EDN: NHMCNB.
16. Sazanova TS, Mochalov LA, Logunov AA, et al. Influence of temperature parameters on morphological characteristics of plasma deposited zinc oxide nanoparticles. *Nanomaterials (Basel).* 2022;12(11):1838. DOI: 10.3390/nano12111838. EDN: OWZULO.
17. Ehsan M, Waheed A, Ullah A, et al. Plant-based bimetallic silver-zinc oxide nanoparticles: a comprehensive perspective of synthesis, biomedical applications, and future trends. *BioMed Research International.* 2022;20:1215183. DOI: 10.1155/2022/1215183. EDN: PHVJRY.
18. Jafarirad S, Mehrabi M, Divband B, et al. Biofabrication of zinc oxide nanoparticles using fruit extract of *Rosa canina* and their toxic potential against bacteria: A mechanistic approach. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl.* 2016;59:296-302. DOI: 10.1016/j.msec.2015.09.
19. Sharma P, Urfan M, Anand R, et al. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Eucalyptus lanceolata* leaf litter: characterization, antimicrobial and agricultural efficacy in maize. *Physiol Mol Biol Plants.* 2022;28(2):363-381. DOI: 10.1007/s12298-022-01136-0. EDN: ZOAILD.
20. Basnet P, Chanu TI, Samanta D, et al. A review on bio-synthesized zinc oxide nanoparticles using plant extracts as reductants and stabilizing agents. *J Photochem Photobiol B.* 2018;183:201-221. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2018.04.036.
21. Aldalbahi A, Alterary S, Almoghim RAA, et al. Greener synthesis of zinc oxide nanoparticles: characterization and multifaceted applications. *Molecules.* 2020;25(18):4198. DOI: 10.3390/molecules25184198. EDN: XCBPML.
22. Kiani BH, Ajmal Q, Akhtar N, et al. Biogenic Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using *Citrullus colocynthis* for Potential Biomedical. *Plants (Basel).* 2023;12(2):362. DOI: 10.3390/plants12020362. EDN: LYFQKA.

23. Rajeshkumar S, Parameswari RP, Sandhiya D, et al. Green synthesis, characterization and bioactivity of mangifera indica seed-wrapped zinc oxide nanoparticles. *Molecules*. 2023;28(6):2806-2818. DOI: 10.3390/molecules28062818.
24. Mushtaq W, Ishtiaq M, Maqbool M, et al. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using viscum album extracts: unveiling bioactive compounds, antibacterial potential, and antioxidant activities. *Plants (Basel)*. 2023;12(11):2130. DOI: 10.3390/plants12112130. EDN: CKAWEH.
25. Lyimo GV, Ajayi RF, Maboza E, et al. A green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Musa Paradisiaca and Rooibos extracts. *MethodsX*. 2022;9:101892. DOI: 10.1016/j.mex.2022.101892. EDN: QTORIG.
26. Alprol AE, Mansour AT, El-Beltagi HS, et al. Algal extracts for green synthesis of zinc oxide nanoparticles: promising approach for algae bioremediation. *Materials (Basel)*. 2023;16(7):2819. DOI: 10.3390/ma16072819. EDN: RGFUJT.
27. Al-Nadhari S, Al-Enazi NM, Alshehrei F, et al. A review on biogenic synthesis of metal nanoparticles using marine algae and its applications. *Environ Res*. 2021;194:110672. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110672. EDN: XELLLP.
28. El-Belely EF, Farag MMS, Said HA, et al. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) using *Arthrospira platensis* (class: *Cyanophyceae*) and evaluation of their biomedical activities. *Nanomaterials (Basel)*. 2021;11(1):95. DOI: 10.3390/nano11010095. EDN: WMQDBO.
29. Hameed H., Waheed A., Sharif M.S., et al. Green Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles from Green Algae and Their Assessment in Various Biological Applications. *Micromachines (Basel)*. 2023;14(5):928. DOI: 10.3390/mi14050928. EDN: IBJEXT.
30. Elsilk SE, El-Shenody RA, Afifi SS, et al. Green-synthesized zinc oxide nanoparticles by *Enterobacter* sp.: unveiling characterization, antimicrobial potency, and alleviation of copper stress in *Vicia faba* (L.) plants. *BMC Plant Biol*. 2024;24(1):474. DOI: 10.1186/s12870-024-05150-0. EDN: BEXHLO.
31. Bahrulolum H, Nooraei S, Javanshir N, et al. Green synthesis of metal nanoparticles using microorganisms and their application in the agrifood sector. *J Nanobiotechnology*. 2021;19:86. DOI: 10.1186/s12951-021-00834-3. EDN: DMRLHC.
32. Sutunkova MP, Privalova LI, Minigalieva IA, et al. The most important inferences from the Ekaterinburg nanotoxicology team's animal experiments assessing adverse health effects of metallic and metal oxide nanoparticles. *Toxicology reports*. 2018;5:363-376. DOI: 10.1016/j.toxrep.2018.03.008. EDN: XXWRBZ.
33. Mohammad R.K.Sh., Seyedi S.M.R., Karimi E., et al. The cytotoxic properties of zinc oxide nanoparticles on the rat liver and spleen, and its anticancer impacts on human liver cancer cell lines. *J Biochem Mol Toxicol*. 2019;33(7):e22324. DOI: 10.1002/jbt.22324.
34. Al-Ragi MJ, Karieb SS, Fathallah N, et al. Effect of zinc oxide nanoparticles on liver functions in albino mice. *Cureus*. 2024;16(2):e54822. DOI: 10.7759/cureus.54822. EDN: OTNJTC.
35. Hassan ME, Hassan RR, Diab KA, et al. Nanoencapsulation of thyme essential oil: a new avenue to enhance its protective role against oxidative stress and cytotoxicity of zinc oxide nanoparticles in rats. *Environmental science and pollution research international*. 2021;28(37):52046-52063. DOI: 10.1007/s11356-021-14427-y. EDN: PRPLEQ.
36. Hamza RZ, Al-Salmi FA, El-Shenawy NS, et al. Evaluation of the effects of the green nanoparticles zinc oxide on monosodium glutamate-induced toxicity in the brain of rats. *PeerJ*. 2019;7:20. DOI: 10.7717/peerj.7460.
37. Goma AA, Salama AR, Tohamy HG, et al. Examining the influence of zinc oxide nanoparticles and bulk zinc oxide on rat brain functions: a comprehensive neurobehavioral, antioxidant, gene expression, and histopathological investigation. *Biol Trace Elem Res*. 2023;20:4654-4673. DOI: 10.1007/s12011-023-04043-x. EDN: GYFHTH.
38. Goma AA, Tohamy HG, El-Kazaz SE, et al. Insight Study on the Comparison between Zinc Oxide Nanoparticles and Its Bulk Impact on Reproductive Performance, Antioxidant Levels, Gene Expression, and Histopathology of Testes in Male Rats. *Antioxidants (Basel)*. 2020;10(41):19. DOI: 10.3390/antiox10010041. EDN: JMUVEQ.

39. Chen T, Zhang L, Yao L, et al. Zinc oxide nanoparticles-induced testis damage at single-cell resolution: Depletion of spermatogonia reservoir and disorder of Sertoli cell homeostasis. *Environ Int.* 2023;181:108292. DOI: 10.1016/j.envint.2023.108292. EDN: DPILOQ.
40. Abdulmalek S, Nasef M, Awad D, et al. Protective effect of natural antioxidant, curcumin nanoparticles, and zinc oxide nanoparticles against type 2 diabetes-promoted hippocampal neurotoxicity in rats. *Pharmaceutics*. 2021;13(11):1937. DOI: 10.3390/pharmaceutics13111937. EDN: RAYGPV.
41. Jabri HA, Saleem MH, Rizwan M, et al. Zinc Oxide Nanoparticles and Their Biosynthesis: Overview. *Life (Basel)*. 2022;12(4):594. DOI: 10.3390/life12040594. EDN: PEPUZK.
42. Dosoky WM, Al-Banna AA, Zahran SM, et al.. Zinc oxide nanoparticles induce dose-dependent toxicosis in broiler chickens reared in summer season. *Environmental science and pollution research international*. 2022;29(36):54088-54107. DOI: 10.1007/s11356-022-19156-4. EDN: XCYEEC.
43. Abdel-Wareth AAA, El-Sayed HGM, Abdel-Warith A-WA, et al. Effects of dietary acacia nilotica fruit, zinc oxide nanoparticles and their combination on productive performance, zinc retention, and blood biochemistry of rabbits. *Animals*. 2023;13(20):3296. DOI: 10.3390/ani13203296. EDN: HBMDNO.
44. Xia T, Lai W, Han M, et al. Dietary ZnO nanoparticles alters intestinal microbiota and inflammation response in weaned piglets. *Oncotarget*. 2017;8(39):64878-64891. DOI: 10.18632/oncotarget.17612.
45. Ahmadi F, Ebrahimnezhad Y, Sis NM, et al. The effects of zinc oxide nanoparticles on performance, digestive organs and serum lipid concentrations in broiler chickens during starter period. *Int J Biosci*. 2013;3(7):23-29. DOI: 0.12692/ijb/3.7.23-29.
46. Zhou Y. Recent Advances in ionic liquids for synthesis of inorganic nanomaterials. *Current Nanoscience*. 2005;1(1):65-74. DOI: 10.2174/1573413052953174.
47. Abdel-Wareth AAA, Amer SA, Mobashar M, El-Sayed HGM. Use of zinc oxide nanoparticles in the growing rabbit diets to mitigate hot environmental conditions for sustainable production and improved meat quality. *BMC veterinary research*. 2022;18(1):354. DOI: 10.1186/s12917-022-03451-w. EDN: UPGBKK.
48. Oh SM, Kim MJu, Hosseindoust A, et al. Hot melt extruded-based nano zinc as an alternative to the pharmacological dose of ZnO in weanling piglets. *Asian-Australasian journal of animal sciences*. 2020;33(6):992-1001. DOI: 10.5713/ajas.19.0140.

Статья принята к публикации 11.06.2025 / The article accepted for publication 11.06.2025.

Информация об авторах:

Светлана Викторовна Нотова¹, профессор кафедры биохимии и микробиологии, доктор медицинских наук, профессор

Алексей Николаевич Здоров², лаборант-исследователь лаборатории металломики

Максим Михайлович Маринчев³, лаборант-исследователь лаборатории металломики

Ольга Владимировна Маршинская⁴, младший научный сотрудник лаборатории металломики

Татьяна Витальевна Казакова⁵, младший научный сотрудник лаборатории металломики

Information about the authors:

Svetlana Viktorovna Notova¹, Professor at the Department of Biochemistry and Microbiology, Doctor of Medical Sciences, Professor

Alexey Nikolaevich Zdorov², Laboratory Research Assistant at the Metallomics Laboratory

Maxim Mikhailovich Marinchev³, Laboratory Research Assistant at the Metallomics Laboratory

Olga Vladimirovna Marshinskaya⁴, Junior Researcher at the Metallomics Laboratory

Tatyana Vitalievna Kazakova⁵, Junior Researcher at the Metallomics Laboratory

