

DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-3-833

УДК 57.043/ 57.044: 579.22



Научная статья

О ВЛИЯНИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ОКСИДА КРЕМНИЯ IV (SiO_2) И ЭКСТРАКТА КОРЫ ДУБА НА БАКТЕРИАЛЬНУЮ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ

Д.Е. Шошин, Е.А. Сизова, А.М. Камирова

Состояние вопроса. Фитобиотические добавки и ультрадисперсные частицы (УДЧ), в особенности металлической природы, находят все большее применение в сельском хозяйстве как удобрения и компоненты кормовых добавок. Однако о действии неметаллических УДЧ данных крайне мало. В частности, кремнийсодержащие УДЧ показали высокую эффективность как стимуляторы роста растений в стрессовых условиях, но могут ли они выступать как антибактериальные средства или в качестве протекторных агентов в микробиальных экосистемах неизвестно.

Цель работы – оценка позитивно-негативных реакций модельного люминесцирующего микроорганизма *Escherichia coli* K12 TGI при воздействии на него суспензий УДЧ оксида кремния IV (SiO_2) в различных концентрациях как в чистом виде, так и в сочетании с фитобиотической добавкой – экстрактом коры дуба.

Материалы и методы. В статье изучена интенсивность свечения рекомбинантного штамма *Escherichia coli* природного морского микроорганизма *Photobacterium leiognathi* с клонированными *luxCDABE*-генами при воздействии концентраций (0,5-0,00024 М) ультрадисперсных частиц SiO_2 и разведений водного экстракта коры дуба (2-1024 кратное).

Результаты. Установлено, что УДЧ в чистом виде стимулируют бактериальную люминесценцию на 252,2% в отношении контроля в стационарной фазе роста при 0,5 моль/л. Они же выступают как протекторы внутриклеточного метаболизма, снижая ингибирующее действие экстракта коры дуба. Последний в чистом виде подавляет более 50% свечения бактерий вплоть до 4-кратного разведения (12,5 мг/мл), что определяет возможность его использования в качестве альтернативы антибиотическим препаратам.

Заключение. УДЧ SiO_2 обладают выраженными защитными свойствами в отношении микробиального сообщества.

Ключевые слова: ультрадисперсные частицы; бактериальные клетки; биолюминесценция; оксид кремния; кора дуба

Для цитирования. Шошин Д.Е., Сизова Е.А., Камирова А.М. О влиянии ультрадисперсных частиц оксида кремния IV (SiO_2) и экстракта коры дуба на бактериальную люминесценцию // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024. Т. 16, №3. С. 317-357. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-3-833

Original article

INFLUENCE OF ULTRAFINE PARTICLES OF SILICON IV OXIDE (SiO_2) AND OAK BARK EXTRACT ON BACTERIAL LUMINESCENCE

D.E. Shoshin, E.A. Sizova, A.M. Kamirova

Background. *Phytobiotic additives and ultrafine particles (UFP), especially of metallic nature, are increasingly used in agriculture as fertilizers and components of feed additives. However, there is very little data about the effect of non-metallic UFP. In particular, silicon-containing UFP have shown high efficiency as plant growth stimulators under stress conditions, but whether they can act as antibacterial agents or as protective agents in microbial ecosystems is unknown.*

Therefore, the aim of the presented work is to evaluate positive and negative reactions of the model luminescent microorganism Escherichia coli K12 TGI when exposed to suspensions of silicon IV oxide (SiO_2) in various concentrations both in pure form and in combination with phytobiotic additive – oak bark extract.

Materials and methods. *The luminescence intensity of the recombinant strain of Escherichia coli of the natural marine microorganism Photobacterium leiognathi with cloned luxCDABE-genes under the influence of concentrations (0.5-0.00024 M) of UFP SiO_2 and aqueous extract of oak bark (2-1024 multiples) was studied.*

Results. *It was found that UFP in pure form stimulate bacterial luminescence by 252.2% with respect to the control in the stationary phase of growth at 0.5 mol/L. They also act as protectors of intracellular metabolism, reducing the inhibitory effect of oak bark extract. The latter in pure form suppresses more than 50 % of bacterial luminescence up to 4-fold dilution (12.5 mg/mL), which determines the possibility of its use as an alternative to antibiotic drugs.*

Conclusion. *UFP SiO_2 have pronounced protective properties with respect to microbial community.*

Keywords: *ultrafine particles; bacterial cells; bioluminescence; silicon oxide; oak bark*

For citation. *Shoshin D.E., Sizova E.A., Kamirova A.M. Influence of Ultrafine Particles of Silicon IV Oxide (SiO₂) and Oak Bark Extract on Bacterial Luminescence. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2024, vol. 16, no. 3, pp. 317-357. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-3-833*

Введение

Макрообъекты растительного и животного царства в своей жизнедеятельности прямо или косвенно зависят, от, казалось бы, наиболее примитивных существ – бактерий, грибов и простейших. Эти *animalcule* по Левенгуку [61] слагают уникальные экосистемы почвы [98], в частности ризосферное окружение [28], а также являются неотъемлемой составляющей пищеварительного тракта млекопитающих [60, 111], тем самым опосредуя урожайность и продуктивность сельскохозяйственных культур и пород [117, 32, 48, 120, 102]. Более того, микроорганизмы первыми реагируют на изменения, происходящие в окружающей среде, то есть являются универсальными индикаторами [5, 3].

Последнее обстоятельство позволяет использовать методы оценки биологической активности веществ, например, комплексных кормовых добавок, с использованием бактериальных штаммов [15, 16, 13]. Что особенно актуально в реалиях XXI века, в частности, при выборе формы внесения макро и микроэлементов в корма и почву [12, 74, 30, 91], а также при решении вопроса преодоления антибиотикорезистентности и стимуляции симбионтной микрофлоры [38, 29, 79]. Оба направления возникли на фоне экстенсивного ведения сельского хозяйства в последние десятилетия прошлого века – истощения почв и неконтролируемого применения антибиотиков.

Сегодня для их решения используют в первом случае различные минеральные комплексы – неорганические или органические соли, хелатируемые агенты или ультрадисперсные частицы (УДЧ) [84, 90, 74, 35, 91, 92]. Причем последние наиболее перспективны [2]. Они высокоселективны и эффективно взаимодействуют с элементами окружающей среды, включая микро- и макроорганизмы, на молекулярном уровне [34]. Более того, их свойства можно регулировать, меняя способ производства, размер, концентрацию и форму [85, 10]. Во втором – фитобиотические добавки, представленные растительными экстрактами или очищенными действующими веществами, поскольку они не только угнетают патогенную микрофлору, но и способствуют росту нормальной микробиоты [86].

Однако, при использовании подобных веществ, остаются опасения относительно потенциальной токсичности УДЧ в виду их высокой биологической доступности и лабильности [37], а также неполноты данных о синергетических или антагонистических эффектах УДЧ и фитобиотиков.

Поэтому цель представленной работы – оценка позитивно-негативных реакций модельного люминесцирующего микроорганизма *Escherichia coli* K12 TG1 при воздействии на него суспензий УДЧ на примере оксида кремния IV (SiO_2) в различных концентрациях как в чистом виде, так и в сочетании с фитобиотической добавкой – экстрактом коры дуба (КД).

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось в три этапа на базе центра «Нанотехнологии в сельском хозяйстве» ФГБУ ФНЦ БСТ РАН, г. Оренбург по схеме, представленной в таблице 1.

Таблица 1.

Схема эксперимента

Опыт 1 Ультрадисперсные частицы SiO_2 (УДЧ SiO_2)												
Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Концентрация (моль/л)	0,5	0,25	0,12	0,06	0,03	0,015	0,0078	0,0039	0,0019	0,0009	0,0004	0,0002
Опыт 2 Экстракт коры дуба (КД)												
Разведения	×2	×4	×8	×16	×32	×64	×128	×256	×512	×1024	×2048	×4096
Опыт 3 УДЧ SiO_2 + КД												
Концентрация (моль/л) УДЧ	0,25											
Разведения КД	×2	×4	×8	×16	×32	×64	×128	×256	×512	×1024	×2048	×4096
Контроль Дистиллированная вода												

При этом, опыты № 1 и 2 включали предварительную оценку УДЧ SiO_2 и КД с целью определения их ингибирующего или интенсифицирующего действия в отдельности. Опыт № 3 в свою очередь был направлен на выявление антагонистических или синергетических эффектов изучаемых веществ, для чего образцы УДЧ SiO_2 в концентрации, стимулирующей люминесценцию бактериального штамма смешивали с различными разведениями КД.

Чистые (99 %) УДЧ SiO₂ (ИП Хисамутдинов Р. А., Россия) в количестве 120,2 мг (весы лабораторные ВЛА, класс точности I, допускаемая погрешность ± 0,5 мг) диспергировали ультразвуком частотой 35 кГц в 2 мл дистиллированной воды в течение 30 минут при температуре 25 °С для получения однородной суспензии с концентрацией УДЧ SiO₂ 1 моль/л.

Одновременно проводили экстрагирование коры дуба массой 10 грамм (АО «Красногорсклексредства», Россия) на водяной бане в 200 мл дистиллированной воды (T=100°C; t=10 мин). Полученный экстракт процеживали и охлаждали до комнатной температуры.

Подготовку лиофилизированного люминесцентного штамма *Escherichia coli* K12 TG1, несущего гибридную плазмиду pUC19 с клонированными *luxCDABE* генами *P. leiognathi* 54D10, под коммерческим названием «Эколюм» («НВО ИММУНОТЕХ», Россия), осуществляли путем добавления 10 мл дистиллированной охлажденной до 4 °С воды, после чего выдерживали суспензию 30 минут при той же температуре [1].

Далее для опытов № 1 и 2 готовили серию двукратных разбавлений УДЧ SiO₂ и КД в трех повторностях объемом по 100 мкл с добавлением идентичного количества суспензии *Escherichia coli* K12 TG1. В опыте № 3 к КД в разведениях от 2 до 1024 раз объемом 50 мкл добавляли аналогичное количество суспензии УДЧ SiO₂ в концентрации 1 моль/л.

В этом пункте следует сделать оговорку о возможности некоторых УДЧ SiO₂ самопроизвольно испускать интенсивное сине-зеленое излучение [113], тем самым корродируя результаты эксперимента по биолюминесценции. В связи с чем требуется постановка дополнительных «чистых» проб с УДЧ SiO₂, но без индикаторных биообъектов. В представленной работе свечения УДЧ SiO₂ не выявлено.

Токсичность исследуемых образцов определяли на многофункциональном микропланшетном ридере TECAN Infinite F200 (Tecan Austria GmbH, Австрия), фиксируя значение люминесценции бактериального штамма *Escherichia coli* K12 TG1 («Эколюм») в среде с различным содержанием УДЧ SiO₂ и КД в течение трех часов с периодом 5 минут. В качестве контроля использовали дистиллированную воду. На основе полученных данных вычисляли относительное значение люминесценции по формуле:

$$A = I_o / I_k * 100\%$$

где I_k – светимость контрольной пробы, I_o – светимость опытной пробы

В сущности, это величина отражает различие в интенсивности свечения контрольной и опытной проб.

Достоверность различий между абсолютными значениями люминесценции определяли по *t*-критерию Стьюдента с требуемым уровнем значимости $p \leq 0,01$. В таблицах указаны относительные значения, соответствующие представленному порогу.

Результаты и их обсуждение

1. Распространение в природе и роль кремния в биологических системах. Земная кора на 27,7 % сложена из кремния – второго после кислорода химического элемента в ее составе [75]. Он же в виде оксида формирует до половины массы почвы [80]. Входя в подгруппу углерода Периодической системы Д. И. Менделеева, кремний имеет аналогичное строение внешнего энергетического уровня, четырехвалентен, но не склонен к образованию кратных связей или цепей, подобных тем, что лежат в основе биоорганических молекул [4]. Он обладает меньшим сродством к электрону и чаще всего представлен нерастворимыми формами, такими как кварц, полевой шпат, алюмосиликатные минералы. В виду последнего ранее кремнию не придавали большого значения в физиологических процессах, в частности потому, что многие растения способны нормально развиваться на питательных средах без силикатов.

Однако новые исследования в сфере биоэлектробиологии показали, что кремний играет важную роль в жизнедеятельности не только представителей царства флоры, но и фауны. Он придает растениям механическую прочность за счет отложений $\text{Si}(\text{OH})_4$ во внецеллюлярном пространстве или специализированных клетках [58, 77], предотвращает полегание зерновых, способствует лучшему обмену макро- и микроэлементов, стимулирует развитие корневой системы, повышает устойчивость к патогенам и прочим неблагоприятным условиям [18]. Поглощение и транспортировка кремния облегчаются специализированными Si-транспортерами (Lsi1, Lsi2, Lsi3 и Lsi6), присутствие которых определяется дифференциальной анатомией корня у однодольных и двудольных растений. Кремний опосредует осмотические, ионные стрессовые реакции, метаболические процессы, устьичную физиологию, фитогормональную деятельность и поглощение питательных веществ [21]. При этом растения в зависимости от способности накапливать Si-содержащие вещества в своих тканях классифицируются как гипераккумуляторы, аккумуляторы и неаккумуляторы [55]. Так однодольные, к примеру, имеют специфические фотосинтез-активирующие Si-клетки в эпидермисе листьев, известные как фитолит [101].

Кремний также способствует формированию соединительной ткани, а именно гликозаминогликанов, эластина и коллагена, укрепляет стенки сосу-

дов, снижает абсорбцию алюминия и его накопление в организме животных [6, 11]. При этом в качестве его источника чаще всего выступают монокремниевая кислота, силикаты натрия и калия, а также ультрадисперсные формы кремнезема [82]. Причем, применение последних в растениеводстве и животноводстве показало наибольший потенциал [45, 17, 9]. Так, например, УДЧ SiO₂ с диаметром 20-40 нм в большей степени чем объемистый кремнезем улучшали поглощение питательных веществ в семенах кукурузы (*Zea mays*) [110], они же, в сравнении с силикатом калия, показали больший стимулирующий эффект по отношению к устьичной проводимости, относительному содержанию воды и скорости фотосинтеза [50].

Было установлено также, что наноразмерные частицы SiO₂ повышают скорость прорастания семян [51], интенсифицируют процессы роста [69], метаболизм азота [105], фотосинтетическую активность и антиоксидантные свойства у растений [52], снижают концентрацию тяжелых металлов и увеличивают количество гемоглобина крови в организме цыплят-бройлеров [7], одновременно с ростом живой массы и доли аминокислот в мясной продукции [8].

2. *Фитобиотические добавки как альтернатива антибиотикам.* Фитобиотики – это сложная смесь биологически активных веществ растительного происхождения, состоящая из широкого комплекса химических соединений, среди которых гликозиды и алкалоиды (спирты, альдегиды, сложные и простые эфиры, кетоны, лактоны и т. д.), антоцианы, кумарины, флавоноиды, фенольные производные (дубильные вещества, танины), сапонины и терпеноиды (моно- и сесквитерпены, стероиды и т. д.) [46, 108]. Они обеспечивают защиту растений от патогенной микрофлоры и могут применяться как альтернатива антибиотикам стимуляторам роста в кормлении сельскохозяйственных животных [14]. При этом в отличие от последних, фитобиотики обладают рядом преимуществ. Они не только подавляют болезнетворные грамположительные и отрицательные микроорганизмы [104], например *Salmonella typhimurium* [25], *Escherichia coli* [59], *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* [73], *Streptococcus uberis*, *Enterobacter cloacae*, *Candida albicans*, *Proteus mirabilis* [72], *Bacillus cereus* [19], *Enterobacter aerogenes* [22], *Klebsiella pneumonia* [64], но также являются иммуностимуляторами [70], снижают окислительный стресс, модулируют показатели крови [39], повышают секрецию и ферментацию кишечника [118] совместно с продуктивными качествами животных [97].

В связи с чем фитобиотики находят все большее применение в птицеводстве [49], мясном и молочном скотоводстве [76], свиноводстве [93,

65], козоводстве [54], кролиководстве [107], аквакультуре [41] и т. д. В частности, относительно КД, установлено, что при введении его в рацион цыплят-бройлеров, улучшаются продуктивные показатели и иммунный статус: в крови повышается содержание лейкоцитов, моноцитов, гранулоцитов и лимфоцитов, активность супероксиддисмутазы и каталазы более чем на 10 % [53]. В то же время, исследования *in vitro* на искусственном рубце с применением КД свидетельствуют о увеличении ферментативной активности и усвояемости корма с 2,42 % ($P < 0,05$) до 7,13 % ($P < 0,01$), с максимумом в дозировке 3,3 мг/мл [31], на фоне модуляции профиля жирных кислот в связи с ингибированием начальных стадий биогидрирования [81], что позитивно сказывается на липидном обмене. КД также способствует выведению токсичных элементов из мышечной ткани [78] и подавлению патогенной микрофлоры [115].

3. УДЧ SiO_2 в тесте бактериальной люминесценции. Люминесценция бактериального штамма в опыте с чистыми УДЧ SiO_2 росла пропорционально повышению их содержания в среде. Так в стационарной фазе на 30 минуте она превышала контрольные значения в 3,52 раза в 0,5 моль/л; в 2,77 раза в 0,25 моль/л; в 2,42 раза в 0,12 моль/л; в 1,97 раза в 0,06 моль/л; в 1,76 раза в 0,03 моль/л; в 1,51 раза в 0,015 моль/л; в 1,33 раза в 0,007 моль/л; в 1,2 раза в 0,003 моль/л; в 1,14 раза в 0,0019 моль/л, что свидетельствует о положительном воздействии на инкубируемую культуру (Рисунок 1).

Последнее может быть обусловлено повышенным поглощением питательных веществ, смягчением окислительного стресса и активацией ряда ферментативных процессов, что отчетливо демонстрируется в экспериментах на растениях как в нативных, так и в стрессовых условиях, опосредованных биотическими и абиотическими факторами [45], как то: засоление, засуха, термическое воздействие, присутствие тяжелых металлов или насекомых-паразитов.

Так, нанесение суспензии УДЧ Si в концентрации 150 мг/л ($\approx 0,005$ моль/л) на листья лимонграсса (*Cymbopogon flexuosus*) улучшало газообменные модули и повышало активность фотосинтеза и ферментов, участвующих в метаболизме эфирных масел (гераниолдегидрогеназа) и азота (нитратредуктаза), а также в антиоксидантной системе (каталаза, пероксидаза и супероксиддисмутаза), что способствовало смягчению перекисного окисления липидов, снижению содержания H_2O_2 и повышению осмопротекции [87].

Внекорневое распыление УДЧ SiO_2 на засоленные почвы с *Phaseolus vulgaris* приводило к усиленному накоплению N, P, K, Ca, росту соотношения ионов калия и натрия (K / Na), устьичной проводимости и скоро-

сти ассимиляционных процессов [50]. Аналогично, в опыте с масличным рапсом (*Brassica napus*) в условиях засухи кремнезем способствовал накоплению аквапоринов VnPIP1, VnPIP2-1-7, VnTIP1;1 и экспрессии их генов, повышал уровень каталазы и активность супероксиддисмутазы, а также общие неферментативные антиоксидантные характеристики тканей листьев [99]. Он же значительно увеличивал вегетативный рост, интенсивность цветения и процент завязывания плодов, относительное содержание воды в листьях, общее количество хлорофиллов и растворимых белков, а также активность каталазы, супероксиддисмутазы, пероксидазы и полифенолоксидазы в *Cucurbita pepo L.* при различных уровнях орошения [100].

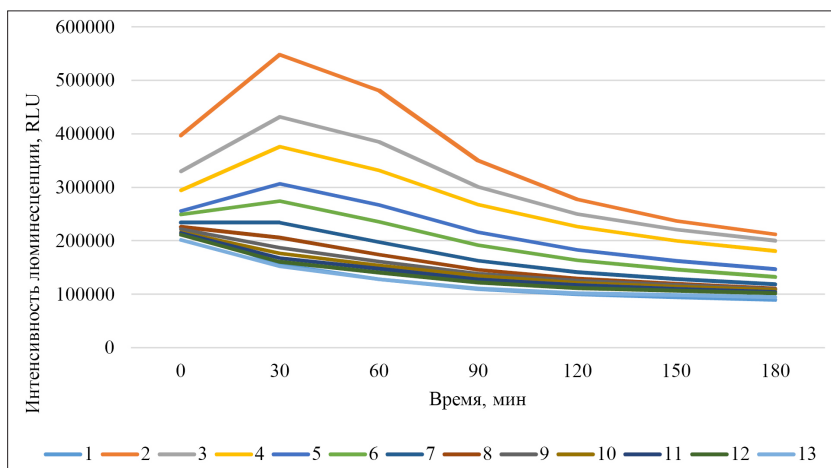


Рис. 1. Динамика интенсивности биолюминесценции бактериального штамма *Escherichia coli* K12 TG1 в среде с различным содержанием УДЧ SiO₂

Примечание: Кривые графика соответствуют следующим концентрациям УДЧ в суспензии: 1 – 0 моль/л; 2 – 0,5 моль/л; 3 – 0,25 моль/л; 4 – 0,125 моль/л; 5 – 0,0625 моль/л; 6 – 0,031 моль/л; 7 – 0,016 моль/л; 8 – 0,008 моль/л; 9 – 0,004 моль/л; 10 – 0,002 моль/л; 11 – 0,001 моль/л; 12 – $5 \cdot 10^{-4}$ моль/л; 13 – $2,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л

В то же время совместное применение УДЧ SiO₂ и PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) продемонстрировало синергетический эффект в отношении роста и урожайности пшеницы. Взаимодействие между УДЧ SiO₂ и PGPR улучшило биомассу (свежий и сухой вес) и содержание хлорофилла-а, б на 138,78 %, 65,70 %, 128,57 % и 283,33 % соответственно, по сравнению с необработанными, но подверженными засухе растениями. Отмечено также повышение относительного содержания воды (71,66 %),

газообменных свойств, поглощения питательных веществ и производство осмолитов. Выросла активность супероксиддисмутазы (60,49 %), пероксидазы (55,99 %) и каталазы (81,69 %) [23].

УДЧ SiO₂ при повышенной солености и дефиците воды стимулировали рост и продуктивность *Cucumis sativus*, что сопровождалось накоплением в корне, листе и стебле таких элементов как непосредственно Si (на 51, 57, 8 и 78 %), K (на 52, 41 и 75 %) и N (на 30 %) [26].

Примечательно также, что кремний способен снижать биодоступность тяжелых металлов в почве и их накопление в корнях растений, влияя на интенсивность связывания и поглощения последних при посредстве нескольких механизмов, среди которых: формирование Fe/Mn-бляшек, клеточной стенки и компартментов корневых клеток; образование комплексов с тяжелыми металлами и ограничение их транслокации и переноса; регуляция экспрессии соответствующих генов [68]. К примеру, кремний способствовал модуляции ферментного цикла AsA-GSH в томатах, что способствовало детоксикации мышьяка (накапливается в различных органах и тканях растений, присоединяется к сульфгидрильным группам тканевых белков и ферментов, тем самым ограничивая фотосинтетическую активность и изменяя водный потенциал) [67]. Он же совместно с оксидом азота и в чистом виде снижал токсичность меди в саженцах *Vigna radiata L.* и *Panicum maximum cv. Tanzania*, соответственно, за счет улучшения фотосинтетической активности и индукции антиоксидантной активности [56, 116]. Аналогичные эффекты выявлены в отношении Al, Cd, Zn и Cr [93]. Так, комбинация УДЧ Si и индоловой уксусной кислоты усиливала толерантность и защитные механизмы *Oryza sativa* в отношении Cr-стресса, что проявлялось в увеличении биомассы, эндогенного NO, фотосинтетических пигментов и уровня антиоксидантов. Также было отмечено, что они восстанавливают рост в фазе G2/M клеточного цикла, ингибируемого хромом [106].

Добавление Si в питательную среду увеличивало рост растений, выход биомассы, длину и диаметр корня, количество хлорофилла и интенсивность фотосинтетической ассимиляции, эффективность ион-транспортных процессов, активность антиоксидантных ферментов при ванадиевом стрессе в *Oryza sativa L.* Кроме того, Si защищал проростки риса от вредного воздействия метилглиоксала, повышая активность ферментов глиоксалазы. Он же увеличивал экспрессию многочисленных генов, участвующих в детоксикации активных форм кислорода (например, OsCuZnSOD1, OsCaTB, OsGPX1, OsAPX1, OsGR2 и OsGSTU37) и метилглиоксала (например, OsGLYI-1 и OsGLYII-2) [27].

Важно также, что кремний предохраняет растения от различных патогенов и заболеваний. Он способствует снижению яйцекладки, аппетита и усвояемости питательных веществ, приспособленности насекомых, но повышает активность агентов биологического контроля за счет различных физических, химических и молекулярных механизмов. [63, 66]. Так, кремний способствовал снижению внекорневых симптомов антракноза, вызванных *Colletotrichum sublineolum*, путем потенцирования защитных реакций и сохранения фотосинтетического аппарата, включая модификацию гормонального ответа. Клеточные оболочки у растений, обработанных Si были менее колонизированы грибковыми гифами из-за интенсивной продукции фенолов и осаждения лигнина, а также производства большого количества перекиси водорода [95]. Более того, УДЧ Si замедляли рост личинок *Helicoverpa armigera* [33] и оказывали энтомотоксическое действие против рисового долгоносика *Sitophilus oryzae* [42].

Все вышеперечисленное объясняется исходя гипотезы апопластической обструкции [40], подразумевающей формирование полимеризованных механических препятствий под кутикулой и в клеточных стенках, предотвращающих проникновение патогенов, нарушение осмотических и ион-транспортных процессов [20]; быстрым производством вторичных метаболитов, как агентов химической защиты, включая перекрестные помехи между фитогормонами (этилен, абсцизовая, гиббереллиновая, жасмоновая и салициловая кислоты) [103]; активацией антиоксидантной и фотосинтетической систем и регуляцией экспрессии генов через различные метаболические пути [47, 94].

Тем не менее, не смотря на такое обилие информации по воздействию кремния на растительные сообщества, данных о его непосредственном воздействии на прокариот крайне мало. Однако, исходя из того, что УДЧ SiO₂ могут адсорбироваться на поверхности *E. coli* и *S. aureus*, за счет формирования водородных связей с аминокислотными остатками мембранных белков [112], а силикагель способен длительное время поддерживать жизнеспособность прокариот [88], можно предположить, что кремний в наноформе также, как и в фитосреде, способствует регуляции метаболических путей бактерий, что согласуется с относительными значениями люминесценции *Escherichia coli* K12 TG1 (Таблица 2).

При этом интенсифицирующее действие может быть обусловлено реструктуризацией клеточной стенки и мембранно-опосредованных физиологических циклов, включая поглощение питательных веществ, или же усилением кворум-зависимых взаимодействий.

Таблица 2.

**Относительные значения люминесценции *Escherichia coli* K12 TG1
в среде с различным содержанием УДЧ SiO₂**

Время (мин)	Концентрация (моль/л)											
	0.5	0.25	0.12	0.06	0.03	0.015	0.0078	0.0039	0.0019	0.00097	0.00048	0.00024
0	178.3	148.1	132.3	115.1	111.9	105.0	101.6	99.6	97.3	96.3	94.8	90.6
30	352.2	277.6	242.0	197.1	176.4	150.6	132.6	120.3	113.7	107.9	103.4	98.0
60	374.4	299.7	258.3	207.5	183.4	154.0	135.7	125.6	119.9	114.6	109.4	99.8
90	320.3	275.1	244.6	198.0	175.9	149.1	133.7	126.8	122.1	116.7	111.2	101.0
120	278.3	251.2	227.5	183.8	164.7	142.0	129.8	125.6	121.6	117.0	111.7	102.2
150	250.9	233.4	211.5	171.6	154.0	135.6	126.3	123.6	120.4	115.5	112.3	104.0
180	236.3	222.3	201.2	163.5	147.2	131.8	123.3	121.4	119.9	115.7	113.2	104.8

Примечание: Числовые данные соответствуют величине относительного значения люминесценции А (%). Цветовая заливка – показателям ■ - NTOX³⁺, ■ - NTOX²⁺, ■ - NTOX⁺, ■ - NTOX, то есть концентрациям УДЧ, вызывающим интенсификацию люминесценции в диапазоне 250-500, 130-250, 105-130%, соответственно, и не имеющим значимого действия (80-105 %)

4. КД в тесте бактериальной люминесценции. КД, в отличие от УДЧ SiO₂, в 2 и 4-кратном разбавлении значительно лимитирует свечение бактериального штамма, подавляя, соответственно, до 80 и 50% люминесценции. Однако, уже при 8-кратном разведении показатели RLU за 3 часа экспозиции восстанавливаются от 18,4 до 108,2%, а далее превышают контрольные значения, достигая максимума в 64-кратной пробе – 203,6% (Таблица 3).

Таблица 3.

**Относительные значения люминесценции *Escherichia coli* K12TG1
в среде с различным разведением КД**

Время (мин)	Разведения исходного экстракта (кратность)									
	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024
0	1,1	4,4	18,4	40,0	64,1	82,2	92,7	90,4	95,1	100,1
30	0,7	7,5	30,6	55,2	73,8	97,1	110,0	112,9	120,7	125,2
60	1,7	13,1	38,7	69,0	87,1	118,1	123,7	109,5	112,6	102,2
90	3,8	23,9	58,7	99,5	127,6	165,3	145,4	150,2	136,6	120,5
120	6,2	34,4	78,5	130,1	163,7	168,0	182,9	162,5	142,7	107,9
150	9,2	41,1	94,8	150,4	181,3	181,3	192,3	148,8	112,6	108,8
180	13,7	45,9	108,2	168,2	171,5	203,6	176,6	118,4	115,4	113,6

Примечание: Числовые данные соответствуют величине относительного значения люминесценции А (%). Цветовая заливка – показателям ■ - Tox, ■ - EC₈₀, ■ - EC₅₀, ■ - EC₂₀, ■ - NTOX, ■ - NTOX⁺, ■ - NTOX²⁺, то есть концентрациям КД, ингибирующим свыше 95 %, 80 %, 50 %, 20 % люминесценции, а также нетоксичным (80-105 %) и стимулирующим дозам в диапазоне 105-130 %, 130-250 %.

При этом, относительный негативный эффект на первых минутах опыта сохраняется вплоть до 32-кратного разведения. Такое поведение можно связать с высокой летучестью полифенольных соединений, входящих в состав КД.

Но, стоит отметить, что абсолютное снижение светимости наблюдается во всех пробах (Рисунок 2), однако в опытных образцах оно протекает относительно медленно, в связи с чем в конце эксперимента все еще превышает контрольные значения. О низкой интенсивности гашения свидетельствует также и соотношение аналогичных величин RLU (O_n/O_o , где O_n – светимость пробы в конце опыта, а O_o – в начале), постепенно падающее от 0,64 в 2-кратном разбавлении к 0,06 в 1024-кратном, против контрольных 0,05.

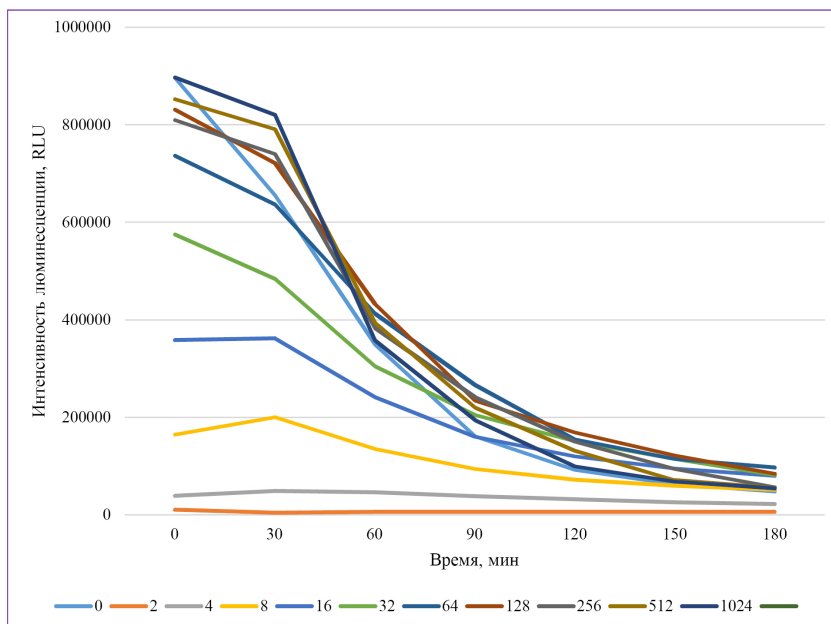


Рис. 2. Динамика интенсивности биолюминесценции бактериального штамма *Escherichia coli* K12 TG1 в среде с различным содержанием КД

Примечание: Кривые графика соответствуют кратности разведения исходного экстракта КД

Иными словами, нативный и слабозабавленный КД обладает выраженными бактерицидными свойствами, что согласуется с более ранними

исследованиями. Так, в частности, этаноловый и ацетоновый экстракты коры *Quercus robur* в различной степени были эффективны против клинических изолятов возбудителей мастита крупного рогатого скота *Escherichia coli*, *Streptococcus agalactiae*, *Streptococcus uberis*, *Serratia liquefaciens*, *Staphylococcus aureus* [109]. Установлено также, что совместное инкубация *Pectobacterium carotovorum*, продуцирующего ряд ферментов, разрушающих клеточную стенку растений, включая пектиназы, целлюлазы и протеазы, и как следствие, провоцирующего возникновение мягкой гнили у многих видов растений, с экстрактом коры дуба снижает продукцию ацилглюкозаминуронидов, и соответственно целлюлазную и протеазную активность бактерий, а также подавляет гены, связанные с кворум-сенсингом [115].

При этом в другой работе по изучению реакции эталонных штаммов *S. aureus* и *E. coli* на спиртовой и водный экстракты КД при семидневной экспозиции было установлено, что грамположительный штамм является более чувствительным, хотя минимальная ингибирующая концентрация в обоих случаях составила 100 мг/мл [24]. Последнее, однако превышает представленные нами значения в 12,5 мг/л, что может быть связано с длительностью эксперимента либо же экстрактивным химическим составом КД, в котором преобладают полифенолы и, в первую очередь, дубильные вещества и фенольные кислоты: вескалагин, касталагин, грандинин, робурин, эвгенол, сиригальдегид, кониферальдегид, ванилин, катехин, галлокатехин, лейкопеларгонидин, лейкоцианидин, лейкодельфинидин, галловая и эллаговая кислоты. Причем относительное содержание каждого из компонентов может существенно варьировать в зависимости от условий произрастания, возраста деревьев и экстрагируемого сырья [43], хотя именно присутствие каждого из этих веществ определяет антибиотические свойства КД.

Так галловая кислота эффективна против *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* и *Listeria monocytogenes* и ведет к необратимым модификациям свойств мембраны в результате изменений гидрофобности, снижения отрицательного поверхностного заряда и возникновения локального разрыва или образования пор с последующей утечкой существенных внутриклеточных составляющих [36].

В то же время у *Escherichia coli* в присутствии ванилина изменяется активность ряда транскрипционных факторов, ответственных, в частности, за развертывание потенциальных систем детоксикации, изменения в метаболизме углерода, активацию реакции на окислительный стресс и гомеостаз ионов металлов. Следствием этого становится смещение ко-

личественных соотношений отдельных компонентов протеома. Вызывая митохондриальную дисфункцию и окислительный стресс, ванилин также препятствует росту грибковых патогенов, таких как *Cryptococcus neoformans* [71] *Alternaria alternata* [96], представителей родов *Aspergillus*, *Penicillium* и *Fusarium*. Не остаются в стороне и бактерии порчи пищевых продуктов – *Pantoea agglomerans*, *Aeromonas enteropelogenes*, *Micrococcus lylae* и *Sphingobacterium spiritovorun* [89].

Аналогично, эвгенол продемонстрировал антибактериальные свойства против *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli*, что соотносится с его гидрофобностью, и как следствие способностью легко проникать через билипидный слой, а также наличием свободной гидроксильной группы в молекуле [114]. Последняя, в частности, ингибирует действие протеазы, гистидинкарбоксилазы и амилазы, связываясь с ними [83, 44].

Эвгенол потенциально подавляет активность мембраносвязанной АТФазы у *Escherichia coli* и *Listeria monocytogenes* [57], продуцирует внутриклеточные активные формы кислорода (АФК), провоцирующие подавление роста клеток, повреждения ДНК, деструкцию мембран и гибель [62]. Он же обладает и противогрибковой активностью *in vitro*, подавляет рост и развитие *Candida albicans*, *Aspergillus niger*, *Penicillium glabrum*, *Penicillium italicum*, *Fusaria oxysporum*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Trichophyton mentagrophytes*, *Lenzites betulina*, *Laetiporus sulphurous* и *Trichophyton rubrum*, за счет нарушения функций клеточных мембран, ингибирования факторов вирулентности и возможностей образования грибковой биопленки [114].

Таким образом, полифенольная структура КД позволяет интенсивно воздействовать на микробиологические сообщества, а также является важным ресурсом для поиска высокоэффективных альтернатив антибиотическим препаратам.

5. Комплекс SiO_2 и КД в тесте бактериальной люминесценции. При совместном внесении в бактериальную систему КД в различных разведениях и 0,25 моль/л УДЧ SiO_2 динамика свечения была схожа с аналогичной для второго компонента: постепенный рост до максимальных значений на 30 минуте с последующим снижением. Ингибирующий диапазон при этом был выявлен только в первой пробе с наибольшим содержанием КД, причем свечение достигало контрольных значений к 120 минуте. Далее люминесценция с каждым разведением усиливалась, достигнув пика в 693900 RLU в 64-кратном разбавлении (Рисунок 3).

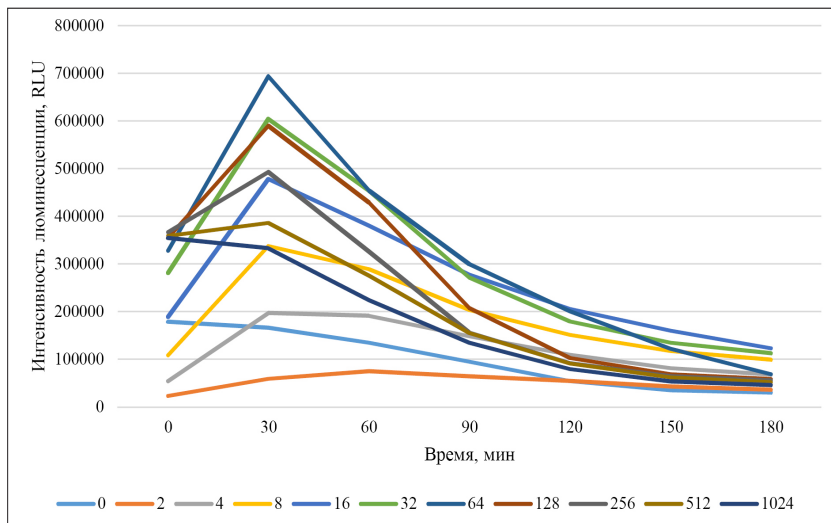


Рис. 3. Динамика интенсивности биолюминесценции бактериального штамма *Escherichia coli* K12 TG1 в среде с различным содержанием КД и 0,25 моль/л УДЧ SiO₂
Примечание: Кривые графика соответствуют кратности разведения исходного экстракта КД

Таблица 4.

Относительные значения люминесценции *Escherichia coli* K12 TG1 в среде с различным разведением КД и 0,25 моль/л УДЧ SiO₂

Время (мин)	Разведения исходного экстракта (кратность)									
	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024
0	13.1	30.8	60.9	106.0	157.7	183.8	198.9	205.6	201.4	198.6
30	36.0	118.6	203.6	288.2	364.1	417.8	355.3	296.9	232.8	200.3
60	55.5	141.4	213.7	280.9	335.4	335.9	316.9	241.0	203.9	166.1
90	68.2	157.0	215.4	293.5	286.9	316.5	219.1	165.0	163.6	142.9
120	99.7	201.8	278.8	377.6	330.4	369.3	188.8	169.8	168.3	146.5
150	122.3	231.1	332.7	453.2	381.9	346.1	196.0	183.2	176.4	152.8
180	121.2	226.7	331.0	412.2	376.3	231.9	194.8	184.9	171.8	153.0

Примечание: Числовые данные соответствуют величине относительного значения люминесценции А (%). Цветовая заливка – показателям ■ - EC₈₀, ■ - EC₅₀, ■ - EC₂₀, ■ - NTOX, ■ - NTOX⁺, ■ - NTOX²⁺, ■ - NTOX³⁺, то есть концентрациям КД, ингибирующим свыше 95%, 80%, 50%, 20% люминесценции, а также нетоксичным (80-105 %) и стимулирующим дозам в диапазоне 105-130%, 130-250%, 250-500%

При этом относительные значения люминесценции (Таблица 4), также как и во втором опыте говорят о более медленном снижении свечения в экспериментальных пробах по отношению к контролю, показатель O_n/O_0 падает от 1,56 в 2-кратном разбавлении к 0,16 в 128-кратном, аналогичном контролю.

Явное ингибирование негативных эффектов КД при участии УДЧ SiO_2 еще раз подтверждает, что кремний может выступать в качестве своеобразного протектора в метаболических реакциях прокариот на стрессорное воздействие, однако он фактически не препятствует стимулирующим эффектам. Это подкрепляется высокой интенсивностью свечения при использовании комплекса с малым содержанием КД (64-кратное разбавление): в чистом виде УДЧ SiO_2 (0,25 моль/л) соответствовало 432000 RLU, а в смеси – 693900 RLU.

Заключение

УДЧ SiO_2 , изучаемые в области биологии и сельского хозяйства, как основа для создания удобрений, гербицидов, пестицидов, сенсоров и целевых систем доставки молекул питательных веществ и фитогормонов, повышающие производительность и устойчивость растений к различным стрессам, также эффективно могут воздействовать на микробиальные системы, что подтверждается интенсификацией люминесценции *Escherichia coli* K12 TG1 на 252,2 % в отношении контроля в стационарной фазе роста при 0,5 моль/л. Они же выступают как протекторы внутриклеточного метаболизма, снижая ингибирующее действие КД. Последний в чистом виде подавляет более 50 % свечения свечение вплоть до 4-кратного разведения (12,5 мг/мл), что определяет возможность его использования в качестве альтернативы антибиотическим препаратам.

Заключение комитета по этике. Неприменимо.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта президента РФ (Проект № 075-15-2022-682/1).

Список литературы

1. Алешина Е. С. Методы биолюминесцентного тестирования: Методические указания к лабораторному практикуму / Е. С. Алешина, И. Ф. Каримов, Д. Г. Дерябин. Оренбург: Оренбургский государственный университет; ЭБС АСВ, 2011. 56 с.

2. Аринжанов А. Е., Мирошникова Е. П., Кияжкова Ю. В. Перспективы использования наночастиц в животноводстве (обзор) // Вестник мясного скотоводства. 2014. № 2(85). С. 7-12.
3. Гречихин И. В. Микроорганизмы как индикатор биологической стабильности экосистем // К вершинам науки: сборник статей по результатам Всероссийского конкурса, Елец, 23 ноября 2020 года. Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2020. С. 5-8.
4. Карманова А. А. Геохимическая характеристика элемента кремния // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2021. № 1.
5. Косумов Р. С., Оказова З. П. Микроорганизмы как индикаторы качества почв // Вестник Биомедицина и социология. 2021. Т. 6. № 2. С. 45-50. <https://doi.org/10.26787/nydha-2618-8783-2021-6-2-45-50>
6. Мансурова Л. А. и др. Физиологическая роль кремния // Сибирский медицинский журнал (Иркутск). 2009. Т. 90. № 7. С. 16-18.
7. Мустафина А. С. Влияние наноразмерного оксида кремния на концентрацию тяжелых металлов в организме сельскохозяйственной птицы // Перспективные аграрные и пищевые инновации: Материалы Международной научно-практической конференции, Волгоград, 06–07 июня 2019 года / Под общей редакцией И.Ф. Горлова. Волгоград: СФЕРА, 2019. С. 180-183.
8. Мустафина А. С. Влияние ультрадисперсного диоксида кремния на аминокислотный состав мяса и печени цыплят-бройлеров // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 3. С. 8-15. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-3-8>
9. Мустафина А. С., Никулин В. Н., Мустафин Р. З. Изменение продуктивных качеств бройлеров под действием ультрадисперсного кремния // Актуальные вопросы управления производством растениеводческой и животноводческой продукции АПК и здоровьем сельскохозяйственных животных : материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции, пос. Персиановский, 20 декабря 2019 года. Персиановский: Донской государственный аграрный университет, 2019. С. 270-278.
10. Петросян А. Д. и др. Влияния наночастиц металлов (НЧМ) разных размеров на рост и развитие семян гороха // Экология и природопользование: тенденции, модели, прогнозы, прикладные аспекты: Материалы Национальной научно-практической конференции, Рязань, 27 марта 2020 года. Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2020. С. 108-111.
11. Рахманин Ю. А. и др. Кремний, его биологическое действие при энтеральном поступлении в организм и гигиеническое нормирование в питьевой

- воде. Обзор литературы // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96. № 5. С. 492-498. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-5-492-498>
12. Рогозинникова И. В. Органический источник меди в кормлении цыплят-бройлеров – альтернатива неорганической соли // Инновационные направления и разработки для эффективного сельскохозяйственного производства: материалы международной научно-практической конференции, посвящённой памяти члена-корреспондента РАН В.И. Левахина: в 2-х частях, Оренбург, 27–28 октября 2016 года. Оренбург: Всероссийский научно-исследовательский институт мясного скотоводства, 2016. С. 171-174.
 13. Родичева Э. К., Кузнецов А. М., Медведева С. Е. БиOLUMиНесцентные биотесты на основе светящихся бактерий для экологического мониторинга // Вестник Оренбургского государственного университета. 2004. № 5. С. 96-100.
 14. Рязанов В. А. Фитобиотики как альтернатива антибиотикам в животноводстве // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104. № 4. С. 108-123. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-104-4-108>
 15. Самолюк В. В., Кацев А. М Биосенсоры на основе природных люминесцентных бактерий для анализа экотоксичности лекарственных веществ // Молодежный инновационный вестник. 2021. Т. 10. № S1. С. 227-229.
 16. Свиридова Д. А. Изучение механизма генотоксичности диоксидина с помощью lux-биосенсоров *Escherichia coli* // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Т. 60. № 6. С. 595-603. <https://doi.org/10.31857/S0869803120060223>
 17. Сизова Е. А., Макаева А. М. Влияние высокодисперсных препаратов на обмен веществ и продуктивность молодняка крупного рогатого скота // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2020. № 12(185). С. 22-33. <https://doi.org/10.33920/sel-05-2012-03>
 18. Шелкова А. О., Новикова Н. Е. Физиологическая роль кремния в жизни растений // Russian Agricultural Science Review. 2015. Т. 5. № 5-1. С. 187-190.
 19. Abdulhussein J. M. et al. The phytobiotic potential of hydro-alcoholic extract of *Allium porrum* against *Bacillus cereus*: A computational sight into PlcR protein as a putative target // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2021. Vol. 35, 102062. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102062>
 20. Ahammed G. J., Yang Y. Mechanisms of silicon-induced fungal disease resistance in plants // Plant Physiology and Biochemistry. 2021. Vol. 165. P. 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.031>
 21. Ahire M. L. et al. Multifaceted roles of silicon in mitigating environmental stresses in plants // Plant Physiology and Biochemistry. 2021. Vol. 169. P. 291-310. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.010>

22. Ahmad B. et al. Evaluation of *in-vitro* and *in-vivo* antimicrobial potential of *Typha elephantina* leaves extracts using *Cyprinus carpio* as a research model // Pak. J. Pharm. Sci. 2022. Vol. 35. № 1. P. 323-333. <https://doi.org/10.36721/PJPS.2022.35.1.SUP.323-333.1>
23. Akhtar N. et al. Synergistic effects of plant growth promoting rhizobacteria and silicon dioxide nanoparticles for amelioration of drought stress in wheat // Plant Physiology and Biochemistry. 2021. Vol. 166. P. 160-176. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.039>
24. Al Hawani I. A. A., Aldhaher A. H. S., Abdalzahra I. M. A biological study on *Quercus* bark as antimicrobial agent // Annals of Tropical Medicine and Public Health. 2020. Vol. 23. <https://faculty.uobasrah.edu.iq/uploads/publications/1632339350.pdf>
25. Aljumaah M. R. et al. Effects of phytobiotic feed additives on growth traits, blood biochemistry, and meat characteristics of broiler chickens exposed to *Salmonella typhimurium* // Poultry Science. 2020. Vol. 99. № 11. P. 5744-5751. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.07.033>
26. Alsaeedi A. et al. Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake // Plant Physiology and Biochemistry. 2019. Vol. 139. P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.008>
27. Altaf M. M. et al. Silicon-mediated metabolic upregulation of ascorbate glutathione (AsA-GSH) and glyoxalase reduces the toxic effects of vanadium in rice // Journal of Hazardous Materials. 2022. Vol. 436. P. 129145. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129145>
28. Andrade G. Role of functional groups of microorganisms on the rhizosphere microcosm dynamics // Plant surface microbiology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. P. 51-69. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74051-3_4
29. Apata D. F. et al. Antibiotic resistance in poultry // International Journal of Poultry Science. 2009. Vol. 8. № 4. P. 404-408. <https://doi.org/10.3923/ijps.2009.404.408>
30. Ashmead H. D. W. et al. Foliar feeding of plants with amino acid chelates. Noyes publications, 1986.
31. Atlanderova K. N. et al. Stimulation of ruminal digestion of young cattle with oak bark extract (*Quercus cortex*) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. Vol. 341. № 1, 012059. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012059>
32. Avis T. J. et al. Multifaceted beneficial effects of rhizosphere microorganisms on plant health and productivity // Soil biology and biochemistry. 2008. Vol. 40. № 7. P. 1733-1740. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.02.013>

33. Bapat G., Zinjarde S., Tamhane V. Evaluation of silica nanoparticle mediated delivery of protease inhibitor in tomato plants and its effect on insect pest *Helicoverpa armigera* // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2020. Vol. 193, 111079. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.111079>
34. Bayda S. et al. The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical-physical applications to nanomedicine // Molecules. 2019. Vol. 25. № 1, 112. <https://doi.org/10.3390/molecules25010112>
35. Bobrenko I. et al. Efficiency of foliar feeding with zinc and copper chelates of spring soft wheat in the conditions of the southern forest-steppe of the Omsk Irtysh region // International Scientific Conference The Fifth Technological Order: Prospects for the Development and Modernization of the Russian Agro-Industrial Sector (TFTS 2019). Atlantis Press, 2020. P. 227-230. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.200113.175>
36. Borges A. et al. Antibacterial activity and mode of action of ferulic and gallic acids against pathogenic bacteria // Microbial drug resistance. 2013. Vol. 19. № 4. P. 256-265. <https://doi.org/10.1089/mdr.2012.0244>
37. Chen M. et al. Toxicity of carbon nanomaterials to plants, animals and microbes: Recent progress from 2015-present // Chemosphere. 2018. Vol. 206. P. 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.020>
38. Cheng G. et al. Antibiotic alternatives: the substitution of antibiotics in animal husbandry? // Frontiers in microbiology. 2014. Vol. 5. P. 217. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00217>
39. Chodkowska K. A. et al. Effect of Phytobiotic Composition on Production Parameters, Oxidative Stress Markers and Myokine Levels in Blood and Pectoral Muscle of Broiler Chickens // Animals. 2022. Vol. 12. № 19, 2625. <https://doi.org/10.3390/ani12192625>
40. Coskun D. et al. The controversies of silicon's role in plant biology // New Phytologist. 2019. Vol. 221. № 1. P. 67-85. <https://doi.org/10.1111/nph.15343>
41. Cristea V. et al. The use of phytobiotics in aquaculture // Lucrări Științifice-Seria Zootehnie. 2012. Vol. 57. P. 250-255.
42. Debnath N. et al. Entomotoxic effect of silica nanoparticles against *Sitophilus oryzae* (L.) // Journal of Pest Science. 2011. Vol. 84. P. 99-105. <https://doi.org/10.1007/s10340-010-0332-3>
43. Dedrie M. et al. Oak barks as raw materials for the extraction of polyphenols for the chemical and pharmaceutical sectors: A regional case study // Industrial Crops and Products. 2015. Vol. 70. P. 316-321. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.071>
44. Devi K. P. et al. Eugenol (an essential oil of clove) acts as an antibacterial agent against *Salmonella typhi* by disrupting the cellular membrane // Journal of eth-

- nopharmacology. 2010. Vol. 130. № 1. P. 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.04.025>
45. Dhakate P. et al. Silicon nanoforms in crop improvement and stress management // *Chemosphere*. 2022. Vol. 305, 135165. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135165>
46. Dhama K. et al. Evidence based antibacterial potentials of medicinal plants and herbs countering bacterial pathogens especially in the era of emerging drug resistance: An integrated update // *Int J pharmacol*. 2014. Vol. 10. № 1. 3. 1-43. <https://doi.org/10.3923/ijp.2014.1.43>
47. Dhiman P. et al. Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview // *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021. Vol. 162. P. 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.023>
48. Diaz Carrasco J. M., Casanova N. A., Fernández Miyakawa M. E. Microbiota, gut health and chicken productivity: what is the connection? // *Microorganisms*. 2019. Vol. 7. № 10. P. 374. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7100374>
49. El-Ghany A. et al. Phytobiotics in poultry industry as growth promoters, antimicrobials and immunomodulators – A review // *Journal of World's Poultry Research*. 2020. Vol. 10. № 4. P. 571-579. <https://dx.doi.org/10.36380/jwpr.2020.65>
50. El-Saadony M. T. et al. Biological silicon nanoparticles improve *Phaseolus vulgaris L.* yield and minimize its contaminant contents on a heavy metals-contaminated saline soil // *Journal of Environmental Sciences*. 2021. Vol. 106. P. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.012>
51. Emamverdian A. et al. The Effect of Silicon Nanoparticles on the Seed Germination and Seedling Growth of Moso Bamboo (*Phyllostachys edulis*) under Cadmium Stress // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2021. Vol. 30. № 4. <https://doi.org/10.15244/pjoes/129683>
52. Fatemi H., Pour B. E., Rizwan M. Isolation and characterization of lead (Pb) resistant microbes and their combined use with silicon nanoparticles improved the growth, photosynthesis and antioxidant capacity of coriander (*Coriandrum sativum L.*) under Pb stress // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 266. № 114982. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114982>
53. Fisinin V. I. et al. Mixtures of biologically active substances of oak bark extracts change immunological and productive indicators of broilers // *Agricultural biology*. 2018. Vol. 53. № 2. P. 385-92. <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2018.2.385eng>
54. Foksowicz-Flaczyk J. et al. The Effect of Herbal Feed Additives in the Diet of Dairy Goats on Intestinal Lactic Acid Bacteria (LAB) Count // *Animals*. 2022. Vol. 12. № 3. P. 255. <https://doi.org/10.3390/ani12030255>

55. Frew A. et al. The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach // *Annals of botany*. 2018. Vol. 121. № 7. P. 1265-1273. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>
56. Gaur S. et al. Silicon and nitric oxide interplay alleviates copper induced toxicity in mung bean seedlings // *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021. Vol. 167. P. 713-722. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.08.011>
57. Gill A. O., Holley R. A. Inhibition of membrane bound ATPases of *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes* by plant oil aromatics // *International journal of food microbiology*. 2006. Vol. 111. № 2. P. 170-174. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2006.04.046>
58. Guerriero G., Hausman J. F., Legay S. Silicon and the plant extracellular matrix // *Frontiers in plant science*. 2016. Vol. 7. P. 463. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00463>
59. Hassirian N., Karimi E., Oskoueian E. Nanoliposome-encapsulated phenolic-rich fraction from *Alcea rosea* as a dietary phytobiotic in mice challenged by *Escherichia coli* // *Annals of Microbiology*. 2022. Vol. 72. № 1. P. 1-11. <https://doi.org/10.1186/s13213-022-01665-9>
60. Heinken A. et al. Systems-level characterization of a host-microbe metabolic symbiosis in the mammalian gut // *Gut microbes*. 2013. Vol. 4. № 1. P. 28-40. <https://doi.org/10.4161/gmic.22370>
61. Hughes E., Pierson R. The animalcules of Antoni van Leeuwenhoek // *Journal of Obstetrics and Gynaecology Canada*. 2013. Vol. 35. № 10. P. 960. [https://doi.org/10.1016/S1701-2163\(15\)30820-3](https://doi.org/10.1016/S1701-2163(15)30820-3)
62. Hyldgaard M., Mygind T., Meyer R. L. Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components // *Frontiers in microbiology*. 2012. Vol. 3. P. 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00012>
63. Islam W. et al. Silicon-mediated plant defense against pathogens and insect pests // *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 2020. Vol. 168. P. 104641. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104641>
64. Ismail A. et al. Prevalence of some Enteric Bacterial Infections Causing Rabbit Enteritis and Attempts to Control Rabbit Coli Enteritis with Phytobiotics // *Zagazig Veterinary Journal*. 2017. Vol. 45. № Supplementary 1. P. 91-101. <https://doi.org/10.21608/zvjz.2017.29244>
65. Jukna V. et al. The effect of probiotics and phytobiotics on meat properties and quality in pigs // *Veterinarija ir zootechnika*. 2005. Vol. 29. № 51. <https://vetzoo.lsmuni.lt/data/vols/2005/29/pdf/jukna2.pdf>
66. Kalleshwaraswamy C. M., Kannan M., Prakash N. B. Silicon as a natural plant guard against insect pests // *Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress*

- Management and Crop Quality Improvement. Academic Press, 2022. P. 219-227. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91225-9.00004-2>
67. Kaya C., Ashraf M. Sodium hydrosulfite together with silicon detoxifies arsenic toxicity in tomato plants by modulating the AsA-GSH cycle // Environmental Pollution. 2022. Vol. 294. P. 118608. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118608>
68. Khan I. et al. Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review // Ecotoxicology and environmental safety. 2021. Vol. 222. P. 112510. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112510>
69. Khan Z. S. et al. Effects of silicon nanoparticles on growth and physiology of wheat in cadmium contaminated soil under different soil moisture levels // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. № 5. P. 4958-4968. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06673-y>
70. Kiczorowska B. et al. The natural feed additives as immunostimulants in monogastric animal nutrition – a review // Annals of animal science. 2017. Vol. 17. № 3. P. 605-625. <https://doi.org/10.1515/aoas-2016-0076>
71. Kim J. H. et al. A vanillin derivative causes mitochondrial dysfunction and triggers oxidative stress in *Cryptococcus neoformans* // PloS one. 2014. Vol. 9. № 2. P. e89122. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089122>
72. Krivonogova A. et al. Inhibitory effect of plant metabolites of *Nigella sativa* on conditionally pathogenic microflora of productive animals // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. Vol. 282. P. 04014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128204014>
73. Krivonogova A. et al. The influence of phytobiotic based on essential oils of *Salvia sclarea*, *Mentha canadensis*, *Mentha piperita* and *Coriandrum sativum* on pathogenic microorganisms of lactating cow udder // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. Vol. 282. P. 04013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128204013>
74. Kropyvka Y., Bomko V. Efficiency of use of premixes on the basis of metal chelates in feeding cows in the first 100 days of lactation // Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences. 2017. Vol. 19. № 79. P. 154-158.
75. Kuhlmann A. M. The second most abundant element in the earth's crust // Jom. 1963. Vol. 15. № 7. P. 502-505. <https://doi.org/10.1007/BF03378936>
76. Kumar N. et al. Phytobiotics and Reproductive Performance of Livestock // Phytobiotics & Animal Production. International books and periodicals supply services. 2019. Vol. 97. P. 108.
77. Kumar S., Soukup M., Elbaum R. Silicification in grasses: variation between different cell types // Frontiers in Plant Science. 2017. Vol. 8. P. 438. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00438>

78. Kvan O. et al. Changes in the content of chemical elements in the muscle tissue of broilers on the background of plant extract and tetracyclines // International Journal of Environmental Science and Development. 2019. Vol. 10. № 12. P. 419-423. <https://pdfs.semanticscholar.org/7f78/c519a0e5fe5b15c31187cdf12a5be66e65c7.pdf>
79. Low C. X. et al. Unveiling the impact of antibiotics and alternative methods for animal husbandry: A review // Antibiotics. 2021. Vol. 10. № 5. P. 578. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10050578>
80. Ma J. F. Plant root responses to three abundant soil minerals: silicon, aluminum and iron // Critical Reviews in Plant Sciences. 2005. Vol. 24. № 4. P. 267-281. <https://doi.org/10.1080/07352680500196017>
81. Majewska M. P. et al. Comparison of the Effect of Synthetic (Tannic Acid) or Natural (Oak Bark Extract) Hydrolysable Tannins Addition on Fatty Acid Profile in the Rumen of Sheep // Animals. 2022. Vol. 12. № 6. P. 699. <https://doi.org/10.3390/ani12060699>
82. Mantovani C. et al. Silicon toxicity induced by different concentrations and sources added to *in vitro* culture of epiphytic orchids // Scientia Horticulturae. 2020. Vol. 265. P. 109272. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109272>
83. Marchese A. et al. Antimicrobial activity of eugenol and essential oils containing eugenol: A mechanistic viewpoint // Critical reviews in microbiology. 2017. Vol. 43. № 6. P. 668-689. <https://doi.org/10.1080/1040841X.2017.1295225>
84. Mion B. et al. Effects of replacing inorganic salts of trace minerals with organic trace minerals in pre- and postpartum diets on feeding behavior, rumen fermentation, and performance of dairy cows // Journal of Dairy Science. 2022. Vol. 105. № 8. P. 6693-6709. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21908>
85. Miroshnikov S. et al. Comparative Toxicity of CuZn Nanoparticles with Different Physical and Chemical Characteristics // Oriental journal of Chemistry. 2019. Vol. 35. № 3. P. 973. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/350308>
86. Mohammadi Gheisar M., Kim I. H. Phytobiotics in poultry and swine nutrition – a review // Italian journal of animal science. 2018. Vol. 17. № 1. P. 92-99. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1350120>
87. Mukarram M., Khan M. M. A., Corpas F. J. Silicon nanoparticles elicit an increase in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus* (Steud.) Wats) agronomic parameters with a higher essential oil yield // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol. 412. P. 125254. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125254>
88. Nassif N. et al. Living bacteria in silica gels // Nature materials. 2002. Vol. 1. № 1. P. 42-44. <https://doi.org/10.1038/nmat709>
89. Ngarmsak M. et al. Antimicrobial activity of vanillin against spoilage microorganisms in stored fresh-cut mangoes // Journal of food protection. 2006. Vol. 69. № 7. P. 1724-1727. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-69.7.1724>

90. Nollet L. et al. The effect of replacing inorganic with organic trace minerals in broiler diets on productive performance and mineral excretion // *Journal of Applied Poultry Research*. 2007. Vol. 16. № 4. P. 592-597. <https://doi.org/10.3382/japr.2006-00115>
91. Patra A., Lalhriatpuii M. Progress and prospect of essential mineral nanoparticles in poultry nutrition and feeding – A review // *Biological Trace Element Research*. 2020. Vol. 197. № 1. P. 233-253. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01959-1>
92. Qasim M. et al. Potential role of nanoparticles in Plants Protection // *Life Sci J*. 2022. Vol. 19. № 2. P. 31-38. http://www.lifesciencesite.com/ljsj/lsj190222/05_37743lsj190222_31_38.pdf
93. Rabelo-Ruiz M. et al. Allium extract implements weaned piglet's productive parameters by modulating distal gut microbiota // *Antibiotics*. 2021. Vol. 10. № 3. P. 269. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10030269>
94. Ranjan A. et al. Silicon-mediated abiotic and biotic stress mitigation in plants: Underlying mechanisms and potential for stress resilient agriculture // *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021. Vol. 163. P. 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.044>
95. Resende R. S. et al. New insights into the hormonal regulation of silicon-supplied sorghum plants challenged with *Colletotrichum sublineolum* // *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2021. Vol. 115. P. 101682. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101682>
96. Romero-Cortes T. et al. Antifungal activity of vanilla juice and vanillin against *Alternaria alternata* // *CyTA-Journal of Food*. 2019. Vol. 17. № 1. P. 375-383. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1586776>
97. Ruesga-Gutiérrez E. et al. Allium-Based Phytobiotic for Laying Hens' Supplementation: Effects on Productivity, Egg Quality, and Fecal Microbiota // *Microorganisms*. 2022. Vol. 10. № 1. P. 117. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010117>
98. Saccá M. L. et al. Ecosystem services provided by soil microorganisms // *Soil biological communities and ecosystem resilience*. Springer International Publishing, 2017. P. 9-24. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63336-7_2
99. Saja-Garbarz D. et al. Silicon-induced alterations in the expression of aquaporins and antioxidant system activity in well-watered and drought-stressed oilseed rape // *Plant Physiology and Biochemistry*. 2022. Vol. 174. P. 73-86. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.033>
100. Salim B. B. M. et al. Impact of silicon foliar application in enhancing antioxidants, growth, flowering and yield of squash plants under deficit irrigation condition // *Annals of Agricultural Sciences*. 2021. Vol. 66. № 2. P. 176-183. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2021.12.003>

101. Sangster A. G., Hodson M. J., Tubb H. J. Silicon deposition in higher plants // Studies in plant science. Elsevier, 2001. Vol. 8. P. 85-113. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80009-4](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80009-4)
102. Santra A., Karim S. A. Rumen manipulation to improve animal productivity // Asian-australasian journal of animal sciences. 2003. Vol. 16. № 5. P. 748-763. <https://doi.org/10.5713/ajas.2003.748>
103. Sarkar M. M., Mathur P., Roy S. Silicon and nano-silicon: New frontiers of bio-stimulants for plant growth and stress amelioration // Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement. Academic Press, 2022. P. 17-36. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91225-9.00010-8>
104. Senthamil Pandian C. et al. Antimicrobial activity of selected phytobiotics individually and in combination against gram positive and gram negative bacteria. 2021. <https://www.entomoljournal.com/archives/2021/vol9issue1/PartAF/9-1-378-490.pdf>
105. Shabbaj I. I. et al. Silicon dioxide nanoparticles orchestrate carbon and nitrogen metabolism in pea seedlings to cope with broomrape infection // Environmental Science: Nano. 2021. Vol. 8. № 7. P. 1960-1977. <https://doi.org/10.1039/D0EN01278E>
106. Sharma A. et al. Synergistic action of silicon nanoparticles and indole acetic acid in alleviation of chromium (CrVI) toxicity in *Oryza sativa* seedlings // Journal of Biotechnology. 2022. Vol. 343. P. 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.005>
107. Silvana N. et al. Use of vulgar oregano (*Origanum vulgare*) as phytobiotic in fattening rabbits // Cuban Journal of Agricultural Science. 2011. Vol. 45. № 2. <http://cjascience.com/index.php/CJAS/article/view/136>
108. Singh J., Gaikwad D. S. Phyto-genic feed additives in animal nutrition // Natural bioactive products in sustainable agriculture. Springer, Singapore, 2020. P. 273-289. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3024-1_13
109. Šukele R. et al. Antibacterial effects of oak bark (*Quercus robur*) and heather herb (*Calluna vulgaris* L.) extracts against the causative bacteria of bovine mastitis // Veterinary World. 2022. Vol. 15. № 9. P. 2315-2322. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2022.2315-2322>
110. Suriyaprabha R. et al. Silica nanoparticles for increased silica availability in maize (*Zea mays*. L) seeds under hydroponic conditions // Current Nanoscience. 2012. Vol. 8. № 6. P. 902-908. <https://doi.org/10.2174/157341312803989033>
111. Tellez G. et al. Digestive physiology and the role of microorganisms // Journal of Applied Poultry Research. 2006. Vol. 15. № 1. P. 136-144. <https://doi.org/10.1093/japr/15.1.136>

112. Tian B., Liu Y., Chen D. Adhesion behavior of silica nanoparticles with bacteria: Spectroscopy measurements based on kinetics, and molecular docking // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 343. P. 117651. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117651>
113. Tiwari A. et al. One-pot green synthesis of highly luminescent silicon nanoparticles using *Citrus limon* (L.) and their applications in luminescent cell imaging and antimicrobial efficacy // *Materials Today Communications*. 2019. Vol. 19. P. 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.12.005>
114. Ulanowska M., Olas B. Biological Properties and prospects for the application of eugenol – A review // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22. № 7. P. 3671. <https://doi.org/10.3390/ijms22073671>
115. Vasilchenko A. S. et al. Oak bark (*Quercus sp.* cortex) protects plants through the inhibition of quorum sensing mediated virulence of *Pectobacterium carotovorum* // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2022. Vol. 38. № 11. P. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03366-6>
116. Vieira-Filho L. O., Monteiro F. A. Silicon improves photosynthetic activity and induces antioxidant enzyme activity in Tanzania Guinea grass under copper toxicity // *Plant Stress*. 2022. Vol. 3. P. 100045. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100045>
117. Watt M., Kirkegaard J. A., Passioura J. B. Rhizosphere biology and crop productivity – a review // *Soil Research*. 2006. Vol. 44. № 4. P. 299-317. <https://doi.org/10.1071/SR05142>
118. Windisch W., Kroismayr A. The effects of phytobiotics on performance and gut function in monogastrics // *World nutrition forum: The future of animal nutrition*. 2006. P. 85-90. <https://www.efeedlink.com/shared/pdffiles/Biomin-EffectOfPhytobioticsOnPerformance.pdf>
119. Zhao K. et al. Silicon-based additive on heavy metal remediation in soils: Toxicological effects, remediation techniques, and perspectives // *Environmental Research*. 2022. Vol. 205. P. 112244. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112244>
120. Ziablitseva M. et al. Study of the effect of EM (effective microorganisms) technology on the productivity of broiler chickens // *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020. Vol. 29. № 2. P. 1964-1974.

References

1. Aleshina E. S. Bioluminescence testing methods: Methodical instructions for laboratory practical / E. S. Alyoshina, I. F. Karimov, D. G. Deryabin. *Methods of bioluminescence testing: Methodological instructions for laboratory practical*. Orenburg: Orenburg State University; EBS ASV, 2011, 56 p.

2. Arinzhanov A. E., Miroshnikova E. P., Kilyakova Y. V. Prospects for the use of nanoparticles in animal husbandry (review). *Bulletin of beef cattle breeding*. 2014. № 2(85). P. 7-12.
3. Grechikhin I. V. Microorganisms as an indicator of biological stability of ecosystems. *To the heights of science: a collection of articles based on the results of the All-Russian competition, Elets, November 23, 2020*. Elets: Elets State University named after I.A. Bunin. I.A. Bunin, 2020. P. 5-8.
4. Karmanova A. A. Geochemical characterization of the element silicon. *International Journal of Applied Sciences and Technologies Integral*. 2021. № 1.
5. Kosumov R. S., Okazova Z. P. Microorganisms as indicators of soil quality. *Vestnik Biomedicine and Sociology*. 2021. Vol. 6. № 2. P. 45-50. <https://doi.org/10.26787/nydha-2618-8783-2021-6-2-45-50>
6. Mansurova L. A. et al. Physiologic role of silicon. *Siberian Medical Journal (Irkutsk)*. 2009. Vol. 90. № 7. P. 16-18.
7. Mustafina A. P. Effect of nanosized silicon oxide on the concentration of heavy metals in the body of poultry. *Perspective agrarian and food innovations: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Volgograd, June 06-07, 2019* / Under the general editorship of I.F. Gorlov. Volgograd: SFERA, 2019. P. 180-183.
8. Mustafina A. P. Effect of ultradisperse silica on the amino acid composition of meat and liver of broiler chickens. *Animal husbandry and fodder production*. 2020. Vol. 103. № 3. P. 8-15. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-3-8>
9. Mustafina A. S., Nikulin V. N., Mustafin R. Z. Changes in productive qualities of broilers under the action of ultradisperse silicon. *Actual issues of management of crop and livestock production of AIC and health of farm animals : proceedings of the All-Russian (national) scientific-practical conference, Persianovsky settlement, December 20, 2019*. Persianovsky: Don State Agrarian University, 2019. P. 270-278.
10. Petrosyan A. D. et al. Effects of metal nanoparticles (MNP) of different sizes on the growth and development of pea seeds. *Ecology and Nature Management: trends, models, forecasts, applied aspects: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference, Ryazan, March 27, 2020*. Ryazan: Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. P.A. Kostychev, 2020. P. 108-111.
11. Rakhmanin Yu. A. et al. Silicon, its biological effect at enteral intake into the body and hygienic rationing in drinking water. Literature review. *Hygiene and sanitation*. 2017. Vol. 96. № 5. P. 492-498. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-5-492-498>

12. Rogozinnikova I. V. Organic source of copper in the feeding of broiler chickens - an alternative to inorganic salt. *Innovative directions and developments for effective agricultural production: proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the memory of corresponding member of the Russian Academy of Sciences V.I. Levakhin: in 2 parts, Orenburg, October 27-28, 2016*. Orenburg: All-Russian Research Institute of Meat Cattle Breeding, 2016. P. 171-174.
13. Rodicheva E. K., Kuznetsov A. M., Medvedeva S. E. Bioluminescent biotests based on luminous bacteria for environmental monitoring. *Vestnik of Orenburg State University*. 2004. № 5. P. 96-100.
14. Ryazanov V. A. Phytobiotics as an alternative to antibiotics in animal husbandry. *Animal husbandry and fodder production*. 2021. Vol. 104. № 4. P. 108-123. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-104-4-108>
15. Samolyuk V. V., Katsev A. M. Biosensors based on natural luminescent bacteria to analyze the ecotoxicity of drugs. *Youth Innovation Bulletin*. 2021. Vol. 10. № S1. P. 227-229.
16. Sviridova D. A. Study of the mechanism of dioxidine genotoxicity using lux-biosensors of Escherichia coli. *Radiation Biology. Radioecology*. 2020. Vol. 60. № 6. P. 595-603. <https://doi.org/10.31857/S0869803120060223>
17. Sizova E. A., Makayeva A. M. Effect of highly dispersed preparations on metabolism and productivity of young cattle. *Feeding of farm animals and fodder production*. 2020. № 12(185). P. 22-33. <https://doi.org/10.33920/sel-05-2012-03>
18. Shelkova A. O., Novikova N. E. Physiological role of silicon in plant life. *Russian Agricultural Science Review*. 2015. T. 5. № 5-1. P. 187-190.
19. Abdulhussein J. M. et al. The phytobiotic potential of hydro-alcoholic extract of *Allium porrum* against *Bacillus cereus*: A computational sight into PlcR protein as a putative target. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2021. Vol. 35, 102062. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102062>
20. Ahammed G. J., Yang Y. Mechanisms of silicon-induced fungal disease resistance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021. Vol. 165. P. 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.031>
21. Ahire M. L. et al. Multifaceted roles of silicon in mitigating environmental stresses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021. Vol. 169. P. 291-310. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.010>
22. Ahmad B. et al. Evaluation of *in-vitro* and *in-vivo* antimicrobial potential of *Typha elephantina* leaves extracts using *Cyprinus carpio* as a research model. *Pak. J. Pharm. Sci.* 2022. Vol. 35. № 1. P. 323-333. <https://doi.org/10.36721/PJPS.2022.35.1.SUP.323-333.1>

23. Akhtar N. et al. Synergistic effects of plant growth promoting rhizobacteria and silicon dioxide nanoparticles for amelioration of drought stress in wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021. Vol. 166. P. 160-176. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.039>
24. Al Hawani I. A. A., Aldhaher A. H. S., Abdalzahra I. M. A biological study on *Quercus* bark as antimicrobial agent. *Annals of Tropical Medicine and Public Health*. 2020. Vol. 23. <https://faculty.uobasrah.edu.iq/uploads/publications/1632339350.pdf>
25. Aljumaah M. R. et al. Effects of phytobiotic feed additives on growth traits, blood biochemistry, and meat characteristics of broiler chickens exposed to *Salmonella typhimurium*. *Poultry Science*. 2020. Vol. 99. № 11. P. 5744-5751. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.07.033>
26. Alsaeedi A. et al. Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2019. Vol. 139. P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.008>
27. Altaf M. M. et al. Silicon-mediated metabolic upregulation of ascorbate glutathione (AsA-GSH) and glyoxalase reduces the toxic effects of vanadium in rice. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 436. P. 129145. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129145>
28. Andrade G. Role of functional groups of microorganisms on the rhizosphere microcosm dynamics. *Plant surface microbiology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. P. 51-69. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74051-3_4
29. Apata D. F. et al. Antibiotic resistance in poultry. *International Journal of Poultry Science*. 2009. Vol. 8. № 4. P. 404-408. <https://doi.org/10.3923/ijps.2009.404.408>
30. Ashmead H. D. W. et al. Foliar feeding of plants with amino acid chelates. Noyes publications, 1986.
31. Atlanderova K. N. et al. Stimulation of ruminal digestion of young cattle with oak bark extract (*Quercus cortex*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019. Vol. 341. № 1, 012059. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012059>
32. Avis T. J. et al. Multifaceted beneficial effects of rhizosphere microorganisms on plant health and productivity. *Soil biology and biochemistry*. 2008. Vol. 40. № 7. P. 1733-1740. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.02.013>
33. Bapat G., Zinjarde S., Tamhane V. Evaluation of silica nanoparticle mediated delivery of protease inhibitor in tomato plants and its effect on insect

- pest *Helicoverpa armigera*. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2020. Vol. 193, 111079. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.111079>
34. Bayda S. et al. The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical-physical applications to nanomedicine. *Molecules*. 2019. Vol. 25. № 1, 112. <https://doi.org/10.3390/molecules25010112>
35. Bobrenko I. et al. Efficiency of foliar feeding with zinc and copper chelates of spring soft wheat in the conditions of the southern forest-steppe of the Omsk Irtysh region. *International Scientific Conference The Fifth Technological Order: Prospects for the Development and Modernization of the Russian Agro-Industrial Sector (TFTS 2019)*. Atlantis Press, 2020. P. 227-230. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.200113.175>
36. Borges A. et al. Antibacterial activity and mode of action of ferulic and gallic acids against pathogenic bacteria. *Microbial drug resistance*. 2013. Vol. 19. № 4. P. 256-265. <https://doi.org/10.1089/mdr.2012.0244>
37. Chen M. et al. Toxicity of carbon nanomaterials to plants, animals and microbes: Recent progress from 2015-present. *Chemosphere*. 2018. Vol. 206. P. 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.020>
38. Cheng G. et al. Antibiotic alternatives: the substitution of antibiotics in animal husbandry? *Frontiers in microbiology*. 2014. Vol. 5. P. 217. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00217>
39. Chodkowska K. A. et al. Effect of Phytobiotic Composition on Production Parameters, Oxidative Stress Markers and Myokine Levels in Blood and Pectoral Muscle of Broiler Chickens. *Animals*. 2022. Vol. 12. № 19, 2625. <https://doi.org/10.3390/ani12192625>
40. Coskun D. et al. The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist*. 2019. Vol. 221. № 1. P. 67-85. <https://doi.org/10.1111/nph.15343>
41. Cristea V. et al. The use of phytobiotics in aquaculture. *Lucrări Științifice-Seria Zootehnie*. 2012. Vol. 57. P. 250-255.
42. Debnath N. et al. Entomotoxic effect of silica nanoparticles against *Sitophilus oryzae* (L.). *Journal of Pest Science*. 2011. Vol. 84. P. 99-105. <https://doi.org/10.1007/s10340-010-0332-3>
43. Dedrie M. et al. Oak barks as raw materials for the extraction of polyphenols for the chemical and pharmaceutical sectors: A regional case study. *Industrial Crops and Products*. 2015. Vol. 70. P. 316-321. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.071>
44. Devi K. P. et al. Eugenol (an essential oil of clove) acts as an antibacterial agent against *Salmonella typhi* by disrupting the cellular membrane. *Journal of ethnopharmacology*. 2010. Vol. 130. № 1. P. 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.04.025>

45. Dhakate P. et al. Silicon nanoforms in crop improvement and stress management. *Chemosphere*. 2022. Vol. 305, 135165. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135165>
46. Dhama K. et al. Evidence based antibacterial potentials of medicinal plants and herbs countering bacterial pathogens especially in the era of emerging drug resistance: An integrated update. *Int J Pharmacol*. 2014. Vol. 10. № 1. P. 1-43. <https://doi.org/10.3923/ijp.2014.1.43>
47. Dhiman P. et al. Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021. Vol. 162. P. 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.023>
48. Diaz Carrasco J. M., Casanova N. A., Fernández Miyakawa M. E. Microbiota, gut health and chicken productivity: what is the connection? *Microorganisms*. 2019. Vol. 7. № 10. P. 374. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7100374>
49. El-Ghany A. et al. Phytobiotics in poultry industry as growth promoters, antimicrobials and immunomodulators – A review. *Journal of World's Poultry Research*. 2020. Vol. 10. № 4. P. 571-579. <https://dx.doi.org/10.36380/jwpr.2020.65>
50. El-Saadony M. T. et al. Biological silicon nanoparticles improve *Phaseolus vulgaris L.* yield and minimize its contaminant contents on a heavy metals-contaminated saline soil. *Journal of Environmental Sciences*. 2021. Vol. 106. P. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.012>
51. Emamverdian A. et al. The Effect of Silicon Nanoparticles on the Seed Germination and Seedling Growth of Moso Bamboo (*Phyllostachys edulis*) under Cadmium Stress. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2021. Vol. 30. № 4. <https://doi.org/10.15244/pjoes/129683>
52. Fatemi H., Pour B. E., Rizwan M. Isolation and characterization of lead (Pb) resistant microbes and their combined use with silicon nanoparticles improved the growth, photosynthesis and antioxidant capacity of coriander (*Coriandrum sativum L.*) under Pb stress. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 266. № 114982. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114982>
53. Fisinin V. I. et al. Mixtures of biologically active substances of oak bark extracts change immunological and productive indicators of broilers. *Agricultural biology*. 2018. Vol. 53. № 2. P. 385-92. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.2.385eng>
54. Foksowicz-Flaczyk J. et al. The Effect of Herbal Feed Additives in the Diet of Dairy Goats on Intestinal Lactic Acid Bacteria (LAB) Count. *Animals*. 2022. Vol. 12. № 3. P. 255. <https://doi.org/10.3390/ani12030255>

55. Frew A. et al. The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach. *Annals of botany*. 2018. Vol. 121. № 7. P. 1265-1273. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>
56. Gaur S. et al. Silicon and nitric oxide interplay alleviates copper induced toxicity in mung bean seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021. Vol. 167. P. 713-722. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.08.011>
57. Gill A. O., Holley R. A. Inhibition of membrane bound ATPases of *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes* by plant oil aromatics. *International journal of food microbiology*. 2006. Vol. 111. № 2. P. 170-174. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2006.04.046>
58. Guerriero G., Hausman J. F., Legay S. Silicon and the plant extracellular matrix. *Frontiers in plant science*. 2016. Vol. 7. P. 463. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00463>
59. Hassirian N., Karimi E., Oskoueian E. Nanoliposome-encapsulated phenolic-rich fraction from *Alcea rosea* as a dietary phytobiotic in mice challenged by *Escherichia coli*. *Annals of Microbiology*. 2022. Vol. 72. № 1. P. 1-11. <https://doi.org/10.1186/s13213-022-01665-9>
60. Heinken A. et al. Systems-level characterization of a host-microbe metabolic symbiosis in the mammalian gut. *Gut microbes*. 2013. Vol. 4. № 1. P. 28-40. <https://doi.org/10.4161/gmic.22370>
61. Hughes E., Pierson R. The animalcules of Antoni van Leeuwenhoek. *Journal of Obstetrics and Gynaecology Canada*. 2013. Vol. 35. № 10. P. 960. [https://doi.org/10.1016/S1701-2163\(15\)30820-3](https://doi.org/10.1016/S1701-2163(15)30820-3)
62. Hyldgaard M., Mygind T., Meyer R. L. Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. *Frontiers in microbiology*. 2012. Vol. 3. P. 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00012>
63. Islam W. et al. Silicon-mediated plant defense against pathogens and insect pests. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 2020. Vol. 168. P. 104641. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104641>
64. Ismail A. et al. Prevalence of some Enteric Bacterial Infections Causing Rabbit Enteritis and Attempts to Control Rabbit Coli Enteritis with Phyto-biotics. *Zagazig Veterinary Journal*. 2017. Vol. 45. № Supplementary 1. P. 91-101. <https://doi.org/10.21608/zvzj.2017.29244>
65. Jukna V. et al. The effect of probiotics and phytobiotics on meat properties and quality in pigs. *Veterinarija ir zootechnika*. 2005. Vol. 29. № 51. <https://vetzoo.lsmuni.lt/data/vols/2005/29/pdf/jukna2.pdf>
66. Kalleshwaraswamy C. M., Kannan M., Prakash N. B. Silicon as a natural plant guard against insect pests. Silicon and Nano-silicon in Environmental

- Stress Management and Crop Quality Improvement. Academic Press, 2022. P. 219-227. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91225-9.00004-2>
67. Kaya C., Ashraf M. Sodium hydrosulfite together with silicon detoxifies arsenic toxicity in tomato plants by modulating the AsA-GSH cycle. *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 294. P. 118608. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118608>
68. Khan I. et al. Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2021. Vol. 222. P. 112510. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112510>
69. Khan Z. S. et al. Effects of silicon nanoparticles on growth and physiology of wheat in cadmium contaminated soil under different soil moisture levels. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. № 5. P. 4958-4968. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06673-y>
70. Kiczorowska B. et al. The natural feed additives as immunostimulants in monogastric animal nutrition – a review. *Annals of animal science*. 2017. Vol. 17. № 3. P. 605-625. <https://doi.org/10.1515/aoas-2016-0076>
71. Kim J. H. et al. A vanillin derivative causes mitochondrial dysfunction and triggers oxidative stress in *Cryptococcus neoformans*. *PloS one*. 2014. Vol. 9. № 2. P. e89122. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089122>
72. Krivonogova A. et al. Inhibitory effect of plant metabolites of *Nigella sativa* on conditionally pathogenic microflora of productive animals. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*, 2021. Vol. 282. P. 04014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128204014>
73. Krivonogova A. et al. The influence of phytobiotic based on essential oils of *Salvia sclarea*, *Mentha canadensis*, *Mentha piperita* and *Coriandrum sativum* on pathogenic microorganisms of lactating cow udder. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*, 2021. Vol. 282. P. 04013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128204013>
74. Kropyvka Y., Bomko V. Efficiency of use of premixes on the basis of metal chelates in feeding cows in the first 100 days of lactation. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences*. 2017. Vol. 19. № 79. P. 154-158.
75. Kuhlmann A. M. The second most abundant element in the earth's crust. *Jom*. 1963. Vol. 15. № 7. P. 502-505. <https://doi.org/10.1007/BF03378936>
76. Kumar N. et al. Phytobiotics and Reproductive Performance of Livestock. *Phytobiotics & Animal Production. International books and periodicals supply services*. 2019. Vol. 97. P. 108.
77. Kumar S., Soukup M., Elbaum R. Silicification in grasses: variation between different cell types. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. P. 438. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00438>

78. Kvan O. et al. Changes in the content of chemical elements in the muscle tissue of broilers on the background of plant extract and tetracyclines. *International Journal of Environmental Science and Development*. 2019. Vol. 10. № 12. P. 419-423. <https://pdfs.semanticscholar.org/7f78/c519a0e5fe5b-15c31187cdf12a5be66e65c7.pdf>
79. Low C. X. et al. Unveiling the impact of antibiotics and alternative methods for animal husbandry: A review. *Antibiotics*. 2021. Vol. 10. № 5. P. 578. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10050578>
80. Ma J. F. Plant root responses to three abundant soil minerals: silicon, aluminum and iron. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2005. Vol. 24. № 4. P. 267-281. <https://doi.org/10.1080/07352680500196017>
81. Majewska M. P. et al. Comparison of the Effect of Synthetic (Tannic Acid) or Natural (Oak Bark Extract) Hydrolysable Tannins Addition on Fatty Acid Profile in the Rumen of Sheep. *Animals*. 2022. Vol. 12. № 6. P. 699. <https://doi.org/10.3390/ani12060699>
82. Mantovani C. et al. Silicon toxicity induced by different concentrations and sources added to *in vitro* culture of epiphytic orchids. *Scientia Horticulturae*. 2020. Vol. 265. P. 109272. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109272>
83. Marchese A. et al. Antimicrobial activity of eugenol and essential oils containing eugenol: A mechanistic viewpoint. *Critical reviews in microbiology*. 2017. Vol. 43. № 6. P. 668-689. <https://doi.org/10.1080/1040841X.2017.1295225>
84. Mion B. et al. Effects of replacing inorganic salts of trace minerals with organic trace minerals in pre- and postpartum diets on feeding behavior, rumen fermentation, and performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2022. Vol. 105. № 8. P. 6693-6709. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21908>
85. Miroshnikov S. et al. Comparative Toxicity of CuZn Nanoparticles with Different Physical and Chemical Characteristics. *Oriental journal of Chemistry*. 2019. Vol. 35. № 3. P. 973. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/350308>
86. Mohammadi Gheisar M., Kim I. H. Phytobiotics in poultry and swine nutrition – a review. *Italian journal of animal science*. 2018. Vol. 17. № 1. P. 92-99. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1350120>
87. Mukarram M., Khan M. M. A., Corpas F. J. Silicon nanoparticles elicit an increase in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus* (Steud.) Wats) agronomic parameters with a higher essential oil yield. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 412. P. 125254. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125254>
88. Nassif N. et al. Living bacteria in silica gels. *Nature materials*. 2002. Vol. 1. № 1. P. 42-44. <https://doi.org/10.1038/nmat709>

89. Ngarmasak M. et al. Antimicrobial activity of vanillin against spoilage microorganisms in stored fresh-cut mangoes. *Journal of food protection*. 2006. Vol. 69. № 7. P. 1724-1727. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-69.7.1724>
90. Nollet L. et al. The effect of replacing inorganic with organic trace minerals in broiler diets on productive performance and mineral excretion. *Journal of Applied Poultry Research*. 2007. Vol. 16. № 4. P. 592-597. <https://doi.org/10.3382/japr.2006-00115>
91. Patra A., Lalhriatpuii M. Progress and prospect of essential mineral nanoparticles in poultry nutrition and feeding – A review. *Biological Trace Element Research*. 2020. Vol. 197. № 1. P. 233-253. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01959-1>
92. Qasim M. et al. Potential role of nanoparticles in Plants Protection. *Life Sci J*. 2022. Vol. 19. № 2. P. 31-38. http://www.lifesciencesite.com/ljs/lj-190222/05_37743lsj190222_31_38.pdf
93. Rabelo-Ruiz M. et al. Allium extract implements weaned piglet's productive parameters by modulating distal gut microbiota. *Antibiotics*. 2021. Vol. 10. № 3. P. 269. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10030269>
94. Ranjan A. et al. Silicon-mediated abiotic and biotic stress mitigation in plants: Underlying mechanisms and potential for stress resilient agriculture. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021. Vol. 163. P. 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.044>
95. Resende R. S. et al. New insights into the hormonal regulation of silicon-supplied sorghum plants challenged with *Colletotrichum sublineolum*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2021. Vol. 115. P. 101682. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101682>
96. Romero-Cortes T. et al. Antifungal activity of vanilla juice and vanillin against *Alternaria alternata*. *CyTA-Journal of Food*. 2019. Vol. 17. № 1. P. 375-383. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1586776>
97. Ruesga-Gutiérrez E. et al. Allium-Based PhytoBiotic for Laying Hens' Supplementation: Effects on Productivity, Egg Quality, and Fecal Microbiota. *Microorganisms*. 2022. Vol. 10. № 1. P. 117. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010117>
98. Saccá M. L. et al. Ecosystem services provided by soil microorganisms. Soil biological communities and ecosystem resilience. Springer International Publishing, 2017. P. 9-24. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63336-7_2
99. Saja-Garbarz D. et al. Silicon-induced alterations in the expression of aquaporins and antioxidant system activity in well-watered and drought-stressed oilseed rape. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2022. Vol. 174. P. 73-86. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.033>

100. Salim B. B. M. et al. Impact of silicon foliar application in enhancing antioxidants, growth, flowering and yield of squash plants under deficit irrigation condition. *Annals of Agricultural Sciences*. 2021. Vol. 66. № 2. P. 176-183. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2021.12.003>
101. Sangster A. G., Hodson M. J., Tubb H. J. Silicon deposition in higher plants. *Studies in plant science*. Elsevier, 2001. Vol. 8. P. 85-113. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80009-4](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80009-4)
102. Santra A., Karim S. A. Rumen manipulation to improve animal productivity. *Asian-australasian journal of animal sciences*. 2003. Vol. 16. № 5. P. 748-763. <https://doi.org/10.5713/ajas.2003.748>
103. Sarkar M. M., Mathur P., Roy S. Silicon and nano-silicon: New frontiers of biostimulants for plant growth and stress amelioration. *Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement*. Academic Press, 2022. P. 17-36. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91225-9.00010-8>
104. Senthamil Pandian C. et al. Antimicrobial activity of selected phytobiotics individually and in combination against gram positive and gram negative bacteria. 2021. <https://www.entomoljournal.com/archives/2021/vol9issue1/PartAF/9-1-378-490.pdf>
105. Shabbaj I. I. et al. Silicon dioxide nanoparticles orchestrate carbon and nitrogen metabolism in pea seedlings to cope with broomrape infection. *Environmental Science: Nano*. 2021. Vol. 8. № 7. P. 1960-1977. <https://doi.org/10.1039/D0EN01278E>
106. Sharma A. et al. Synergistic action of silicon nanoparticles and indole acetic acid in alleviation of chromium (CrVI) toxicity in *Oryza sativa* seedlings. *Journal of Biotechnology*. 2022. Vol. 343. P. 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.005>
107. Silvana N. et al. Use of vulgar oregano (*Origanum vulgare*) as phytobiotic in fattening rabbits. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 2011. Vol. 45. № 2. <http://cjascience.com/index.php/CJAS/article/view/136>
108. Singh J., Gaikwad D. S. Phytogenic feed additives in animal nutrition. *Natural bioactive products in sustainable agriculture*. Springer, Singapore, 2020. P. 273-289. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3024-1_13
109. Šukele R. et al. Antibacterial effects of oak bark (*Quercus robur*) and heather herb (*Calluna vulgaris* L.) extracts against the causative bacteria of bovine mastitis. *Veterinary World*. 2022. Vol. 15. № 9. P. 2315-2322. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2022.2315-2322>
110. Suriyaprabha R. et al. Silica nanoparticles for increased silica availability in maize (*Zea mays*. L) seeds under hydroponic conditions.

- Current Nanoscience*. 2012. Vol. 8. № 6. P. 902-908. <https://doi.org/10.2174/157341312803989033>
111. Tellez G. et al. Digestive physiology and the role of microorganisms. *Journal of Applied Poultry Research*. 2006. Vol. 15. № 1. P. 136-144. <https://doi.org/10.1093/japr/15.1.136>
 112. Tian B., Liu Y., Chen D. Adhesion behavior of silica nanoparticles with bacteria: Spectroscopy measurements based on kinetics, and molecular docking. *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 343. P. 117651. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117651>
 113. Tiwari A. et al. One-pot green synthesis of highly luminescent silicon nanoparticles using *Citrus limon* (L.) and their applications in luminescent cell imaging and antimicrobial efficacy. *Materials Today Communications*. 2019. Vol. 19. P. 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.12.005>
 114. Ulanowska M., Olas B. Biological Properties and prospects for the application of eugenol – A review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22. № 7. P. 3671. <https://doi.org/10.3390/ijms22073671>
 115. Vasilchenko A. S. et al. Oak bark (*Quercus sp.* cortex) protects plants through the inhibition of quorum sensing mediated virulence of *Pectobacterium carotovorum*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2022. Vol. 38. № 11. P. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03366-6>
 116. Vieira-Filho L. O., Monteiro F. A. Silicon improves photosynthetic activity and induces antioxidant enzyme activity in Tanzania Guinea grass under copper toxicity. *Plant Stress*. 2022. Vol. 3. P. 100045. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100045>
 117. Watt M., Kirkegaard J. A., Passioura J. B. Rhizosphere biology and crop productivity – a review. *Soil Research*. 2006. Vol. 44. № 4. P. 299-317. <https://doi.org/10.1071/SR05142>
 118. Windisch W., Kroismayr A. The effects of phytobiotics on performance and gut function in monogastrics. World nutrition forum: The future of animal nutrition. 2006. P. 85-90. <https://www.efeedlink.com/shared/pdffiles/BiomIn-EffectOfPhytobioticsOnPerformance.pdf>
 119. Zhao K. et al. Silicon-based additive on heavy metal remediation in soils: Toxicological effects, remediation techniques, and perspectives. *Environmental Research*. 2022. Vol. 205. P. 112244. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112244>
 120. Ziablitseva M. et al. Study of the effect of EM (effective microorganisms) technology on the productivity of broiler chickens. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020. Vol. 29. № 2. P. 1964-1974.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Шошин Даниил Евгеньевич, магистр, лаборант-исследователь центра «Нанотехнологии в сельском хозяйстве»

ФГБНУ Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет

ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; пр. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
daniilshoshin@mail.ru

Сизова Елена Анатольевна, доктор биологических наук, руководитель центра «Нанотехнологии в сельском хозяйстве», профессор кафедры биологии и почвоведения

ФГБНУ Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет

ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; пр. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
sizova.178@yandex.ru

Камирова Айна Маратовна, кандидат биологических наук, научный сотрудник центра «Нанотехнологии в сельском хозяйстве»

ФГБНУ Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук

ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
atlander-ka@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Daniil E. Shoshin, Master's Degree, Research Laboratory Assistant at the Center «Nanotechnology in Agriculture»

Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation
daniilshoshin@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

SPIN-code: 7444-9999

Elena A. Sizova, Doctor of Biological Sciences, Head of the Center «Nanotechnology in Agriculture», Professor of the Department of Biology and Soil Science

Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation

sizova.178@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3086-681X>

SPIN-code: 9819-1051

Aina M. Kamirova, PhD of Biological Sciences, Researcher of the Center «Nanotechnology in Agriculture»

Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation

atlander-kn@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1474-8223>

SPIN-code: 7991-3950

Поступила 28.09.2023

После рецензирования 30.10.2023

Принята 12.11.2023

Received 28.09.2023

Revised 30.10.2023

Accepted 12.12.2023