

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И КОРМОПРОИЗВОДСТВЕ

Научная статья

УДК 639.3.043

doi:10.33284/2658-3135-107-4-10

Использование препарата наночастиц SiO₂ в кормлении карпа

Елена Петровна Мирошникова¹, Мария Сергеевна Аринжанова², Азамат Ерсайнович Аринжанов³, Сергей Александрович Мирошников⁴

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

²Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹elenaakva@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3804-5151>

²marymiroshnikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1898-9307>

³arin.azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6534-7118>

⁴rector_osu@mail.osu.ru, <https://orcid.org/orcid.org/0000-0003-1173-1952>

Аннотация. Выполнена серия исследований на модели карпа по оценке биологических свойств и продуктивного действия препарата наночастиц (nanometers particles (NPS)) диоксида кремния (SiO₂). Использован препарат NPS SiO₂, полученный методом плазмохимического синтеза (d=126,5±9,7 нм, Z-потенциал – 29±0,1 мВ). Препарат NPS SiO₂ характеризовался отсутствием токсичности в диапазоне от 1,5•10⁻⁵ до 5•10⁻¹ г/л (модель биосенсора *Escherichia coli* K12 TG1). Изучено действие NPS SiO₂ в трёх дозировках (100, 200, 300 мг/кг корма) на продуктивность и обмен веществ в организме карпа. Установлена оптимальная дозировка NPS SiO₂, составившая 200 мг/кг. При включении NPS SiO₂ в полнорационный комбикорм с содержанием сырого протеина 23 % установлен факт повышения интенсивности роста карпа на величину 10,2-14,1 %. При этом зафиксировано увеличение содержания общего белка в сыворотке крови рыб, и рост содержания ряда аминокислот в печени карпа. Во втором эксперименте изучена продуктивность и обмен минеральных веществ у карпа при совместном скармливании NPS SiO₂ и аминокислот (лизин, митеонин, аргинин).

Ключевые слова: карп, кормление, наночастицы, кремнезем, химические элементы, аминокислоты

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект № 075-15-2024-550.

Для цитирования. Использование препарата наночастиц SiO₂ в кормлении карпа / Е.П. Мирошникова, М.С. Аринжанова, А.Е. Аринжанов, С.А. Мирошников // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 10-30. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-10>

NANOTECHNOLOGY IN ANIMAL HUSBANDRY AND FODDER PRODUCTION

Original article

Use of SiO₂ nanoparticles preparation in carp feeding

Elena P Miroshnikova¹, Maria S Arinzhanova², Azamat E Arinzhanov³, Sergey A Miroshnikov⁴

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

²Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

¹elenaakva@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3804-5151>

²marymiroshnikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1898-9307>

³arin.azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6534-7118>

⁴rector_osu@mail.osu.ru, <https://orcid.org/orcid.org/0000-0003-1173-1952>

Abstract. A series of studies were performed to evaluate the biological properties and productive action of a silicon dioxide nanoparticle preparation (NPS SiO₂) on a carp model. The NPS SiO₂ prepara-

tion obtained by plasma-chemical synthesis was used ($d=126.5\pm 9.7$ nm, Z-potential - 29 ± 0.1 mV). The NPS SiO₂ preparation was characterized by the absence of toxicity in the range from $1.5\cdot 10^{-5}$ to $5\cdot 10^{-1}$ g/l (*Escherichia coli* K12 TG1 biosensor model). The effect of NPS SiO₂ in three dosages (100, 200, 300 mg/kg of feed) on the productivity and metabolism in the carp body was studied. The optimal dosage of NPS SiO₂ was established, amounting to 200 mg/kg. When including NPS SiO₂ in a complete feed with a crude protein content of 23%, the fact of increasing the intensity of carp growth by 10.2 - 14.1% was established. At the same time, an increase in the content of total protein in the blood serum of fish and an increase in the content of a number of amino acids in the liver of carp were established. In the second experiment, the productivity and metabolism of mineral substances in carp were studied with joint feeding of NPS SiO₂ and amino acids (lysine, methionine, arginine).

Keywords: carp, feeding, nanoparticles, silica, chemical elements, amino acids

Acknowledgments: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia, project No. 075-15-2024-550.

For citation: Miroshnikova EP, Arinzhanova MS, Arinzhanov AE, Miroshnikov SA. Use of SiO₂ nanoparticles preparation in carp feeding. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):10-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-10>

Введение.

Кремний (Si) – металлоид с атомной массой 28, является важным микроэлементом для организма человека, животных и растений. Термины «кремний» и «кремнезём» относятся к материалам природного или антропогенного происхождения, состоящим из диоксида кремния (SiO₂), который встречается в двух основных формах – кристаллической и аморфной. Частицы кремния существуют в природе в больших количествах, и признано, что на протяжении всей человеческой эволюции они были компонентами рациона питания (Jurkić LM et al., 2013; Мусабаева Л.Л. и Синова Е.А., 2022).

Интерес к кремнию в последние годы растёт всё больше и связан с его важностью для организма (Arthur-Ataam J et al., 2019; Камирова А.М. и др., 2024; Мусабаева Л.Л. и др., 2024). В 1970 году впервые на цыплятах и крысах было установлено, что Si необходим для нормального роста и развития, а дефицит Si может привести к дефектам в костной и соединительной тканях и нарушению минерального баланса (Martin KR, 2007; Jugdaohsingh R et al., 2008). В частности, у цыплят с недостатком кремния в рационе отмечались деформации черепа, а также более короткие, тонкие и гибкие кости конечностей, которые легко ломались. У крыс также наблюдались выпадение шерсти и потеря мышечного тонуса (Nieves JW et al., 1998; Francis RM et al., 2006).

Следует отметить, что впервые биологическая роль кремния была установлена Carlisle EM (1970, 1972) в исследованиях по оценке действия этого элемента на процесс минерализации костей. В последующем эти знания были дополнены данными о действии кремнесодержащих кормовых добавок на прочность и плотность костей цыплят-бройлеров и перепелов (Merkley JW and Miller ER, 1983; Sahin K et al., 2006). Биологическое действие кремния характеризуется снижением количества остеокластов, нивелированием резорбции и потери костной массы (Rodella LF et al., 2014). Кроме того, высказано предположение, что кремний участвует в формировании костей посредством синтеза и/или стабилизации коллагена. Было обнаружено, что высокие уровни Si прочно связаны с соединительными тканями и их компонентами, а именно гликоаминогликанами, полисахаридами и мукополисахаридами (Jugdaohsingh R et al., 2007).

В организме рыб функции кремния изучены ещё далеко не в полной мере. Известно о путях поступления и круговорота кремния в организме рыб, в литературе есть указания на токсичность этого элемента (Lall SP and Kaushik SJ, 2021). Описан механизм действия кремния на опорно-двигательную систему радужной форели (Küçükbay FZ et al., 2008).

Наукой накоплен значительный багаж знаний о биодоступности кремния из различных источников, в том числе минеральных и органических соединений. В последние годы вышли в свет работы о биодоступности этого элемента из нанодисперсий (NPS) кремния. Так, наибольшее рас-

пространение на практике получил препарат NPS кремния E551, который широко применяется в различных отраслях пищевой промышленности и сельского хозяйства для сохранения качества продукта, защиты от слеживания. Детальные исследования качественных характеристик E551 подтвердили его биологическую инертность или малотоксичность (Van der Zande M et al., 2014; US Food and Drug Administration, 2018).

Как следует из анализа литературных данных, наноматериалы в силу своих уникальных свойств найдут широкое применение в аквакультуре и животноводстве. Исследования показывают, что применение NPS в кормлении повышает продуктивность и иммунный статус животных (Pieszka M et al., 2019). Несмотря на огромный потенциал NPS кремния в аквакультуре, исследования по его использованию в качестве кормовых добавок проводились только на тилапии (Bashar A et al., 2021; Alandiyjany MN et al., 2022).

Цель исследования.

Изучить биологическое и продуктивное воздействие NPS SiO₂ на модели карпа (*Cyprinus carpio*).

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Годовики карпа (*Cyprinus carpio*).

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов, протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Все экспериментальные методы и методики были одобрены Комитетом по этике Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий РАН.

Схема эксперимента. Экспериментальные исследования проведены в условиях аквариумного стенда (6 аквариумов по 300 литров), оборудованного системой жизнеобеспечения. В рамках первого эксперимента методом пар-аналогов были сформированы четыре группы годовиков карпа (n=30; m=15-25 г). Карпов кормили полнорационным комбикормами с содержанием 23 % сырого протеина. В рацион рыбы I, II и III опытных групп дополнительно вводили препарат наночастиц SiO₂, в дозировке 100; 200 и 300 мг/кг корма соответственно. В исследовании использовали NPS SiO₂, синтезированные методом плазмохимического синтеза (d=126,5±9,7 нм, Z-потенциал – 29±0,1 мВ). Водные лиозолы NPS SiO₂ подвергали ультразвуковой обработке частотой 35 кГц (мощность – 300 (450) Вт, амплитуда колебаний – 10 мкм) в течение 30 мин с последующим напылением на комбикорм.

Для проведения II эксперимента методом пар-аналогов из годовиков карпа (n=25; m=45-55 г) были сформированы 4 группы. Карпов кормили полноценным комбинированным кормом, идентичным по составу корму, использованному в I эксперименте. Карпы I опытной группы дополнительно получали NPS SiO₂ (200 мг/кг); II – аминокислоты (аргинин (25 г/кг)+лизин (21 г/кг)+метионин (10 г/кг)); III – NPS SiO₂ (200 мг/кг) и аминокислоты (аргинин (25 г/кг)+лизин (21 г/кг)+метионин (10 г/кг)).

Продолжительность каждого эксперимента составила 56 суток.

Контроль над интенсивностью роста рыбы в период исследований осуществлялся путём еженедельного индивидуального взвешивания утром, до кормления (±1 г) и определения линейно-массовых показателей.

Оборудование и технические средства. Аминокислотный состав биосубстратов рыбы, гематологические показатели крови оценивались в ЦКП БСТ РАН (г. Оренбург) (<https://цкп-бст.рф/>) по стандартным методикам с помощью капиллярного электрофореза «Капель-105 М», анализатора CS-T240 («Dirui Industrial Co., Ltd.», Китай), анализатора URIT-2900 Vet Plus, («URIT Medial

Electronic Co.», Китай) с использованием коммерческих биохимических наборов для ветеринарии («Randox Laboratories Ltd», Великобритания).

Анализ элементного состава мышечной ткани проведён в лаборатории АНО «Центр биотической медицины» (г. Москва) (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.22ПЯ05) методом атомно-эмиссионной и масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (Optima 2000 V, Elan 9000, «PerkinElmer» США).

Биологическая экспертиза NPS SiO₂ проводилась по Deryabin DG et al. (2012) на модели биосенсора *Escherichia coli K12 TG1*, на микропланшетном ридере TECAN Infinite F200 (Tecan Austria GmbH, Австрия).

Статистическая обработка. Данные выражены в виде средних значений ± стандартной ошибки среднего (M±m). Статистический анализ проводился с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» («Microsoft», США) с применением «Excel» («Microsoft», США) с обработкой данных в «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США). Значимость групповых различий оценивали с помощью t-критерия Стьюдента при P≤0,05, который считался значимым.

Результаты исследования.

В ходе исследований на модели биосенсора *Escherichia coli K12 TG1* установлено, что препарат NPS SiO₂ не проявлял токсического действия в диапазоне от 1,5•10⁻⁵ до 5•10⁻¹ г/л. При этом относительные значения биолуминесценции колебались в диапазоне допустимых нетоксичных показателей – в пределах от 82,4 до 104,8 %.

Введение препарата наночастиц кремнезёма в рацион карпов оказывает влияние на их продуктивность, что выражалось повышением живой массы рыбы при окончании эксперимента на 10,2 % (P≤0,05) в I, на 14,1 % (P≤0,05) – во II и на 11 % (P≤0,05) – в III опытных группах (рис. 1).

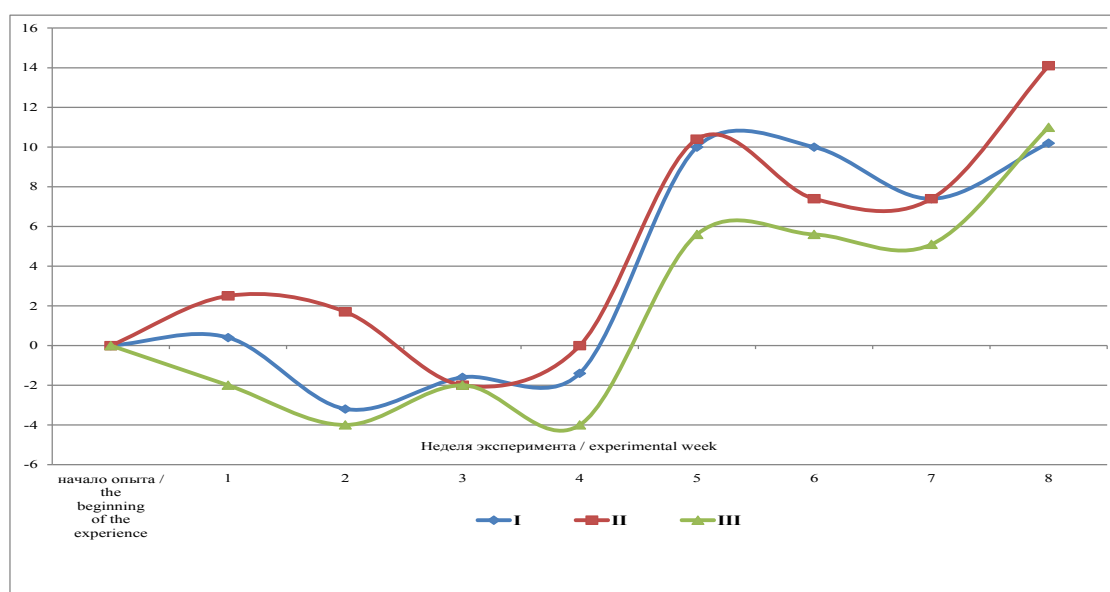


Рисунок 1. Разница по живой массе рыб опытных групп по сравнению с контрольной, % (I эксперимент)

Figure 1. Difference in live weight of fish of experimental groups compared to control group, % (I experiment)

Применение NPS SiO₂ сопровождалось изменениями уровня лимфоцитов с 83,3±3,0 в контроле до 99,8±5,3 (P≤0,05) в I опытной группе; 111,9±10,2 (P≤0,05) – во II и 95,7±9,5 10⁹/л (P≤0,05) – в III опытных группах; моноциты: 2,1±0,06; 2,2±0,2; 3,4±0,4 (P≤0,05); 2,7±0,35 10⁹/л (P≤0,05) соответственно.

В ходе исследований был установлен рост концентрации гемоглобина в крови карпов при применении NPS SiO₂ с 95±3,0 г/л в контроле до 102±3,5 (P≤0,05) в I опытной группе; 119±4,7 (P≤0,01) – во II и 113±2,8 (P≤0,05) – в III опытных группах.

Скармливание препарата наночастиц кремнезёма сопровождалось достоверным повышением содержания общего белка в сыворотке крови карпов I опытной группы на 6,89; II – на 5,44; III – на 4,13 г/л.

В печени подопытной рыбы нами отмечались достоверные изменения в содержании большинства аминокислот (табл. 1).

Таблица 1. Концентрация аминокислот в печени подопытных карпов, % (I эксперимент)
Table 1. Concentration of amino acids in the liver of experimental carps, % (I experiment)

Аминокислота / Amino acid	Группа / Group			
	опытная / experimental			контроль / control
	I	II	III	
Аргинин / Arginine	1,00 ± 0,01	0,98 ± 0,006	0,88 ± 0,006	1,04 ± 0,02
Гистидин / Histidine	0,81 ± 0,03*	0,78 ± 0,03*	0,69 ± 0,02	0,71 ± 0,02
Глицин / Glycine	2,12 ± 0,06*	2,16 ± 0,07*	1,99 ± 0,05	1,96 ± 0,05
Лейцин + изолейцин / Leucine + Isoleucine	4,88 ± 0,3*	4,93 ± 0,3*	4,52 ± 0,2	4,28 ± 0,1
Лизин / Lysine	0,93 ± 0,01	1,00 ± 0,02	0,87 ± 0,01	0,89 ± 0,01
Валин / Valine	2,34 ± 0,04*	2,40 ± 0,05**	2,22 ± 0,03	2,13 ± 0,03
Тирозин / Tyrosine	1,19 ± 0,02***	1,22 ± 0,03***	1,09 ± 0,04	1,03 ± 0,01
Метионин / Methionine	1,04 ± 0,04**	1,03 ± 0,03**	0,97 ± 0,01*	0,88 ± 0,01
Пролин / Proline	1,69 ± 0,02*	1,67 ± 0,01*	1,65 ± 0,01*	1,56 ± 0,01
Фенилаланин/Phenylalanine	1,54 ± 0,03**	1,57 ± 0,04**	1,42 ± 0,03	1,35 ± 0,03

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – P≤0,05; ** – P≤0,01; *** – P≤0,001

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – P≤0.05; ** – P≤0.01; *** – P≤0.001

Введение NPS SiO₂ в рацион оказало влияние на содержание химических элементов в филе карпов (табл. 2).

Таблица 2. Содержание макроэлементов в филе карпов, мкг/г (I эксперимент)
Table 2. Macronutrient content in carp fillets, mcg/g (I experiment)

Элемент / Element	Группа / Group			
	опытная / experimental			контроль / control
	I	II	III	
Ca	285 ± 29*	297 ± 20*	428 ± 53***	209 ± 21
K	4849 ± 485	4991 ± 500	4708 ± 468	5565 ± 556
Na	521 ± 52	589 ± 57	442 ± 46*	574 ± 55
Mg	160 ± 16	171 ± 17	172 ± 18	185 ± 18
P	1661 ± 165*	1895 ± 190	2273 ± 221	2139 ± 214

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – P≤0,05; *** – P≤0,001

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – P≤0.05; *** – P≤0.001

В филе карпов I опытной группы констатировали достоверное повышение содержание кальция на 36,4 %, что имело место на фоне снижения пула фосфора на 22,4 % относительно контроля. В филе карпов III опытной группы зафиксировано повышение содержания кальция в 2 раза. Действующий фактор оказал непосредственное влияние и на обмен жизненно необходимых и условно-жизненно необходимых химических микроэлементов (табл. 3).

Таблица 3. Концентрация жизненно необходимых и условно-жизненно необходимых химических микроэлементов в филе подопытных карпов, мкг/г (I эксперимент)
Table 3. Concentration of vital and conditionally vital chemical trace elements in fillets of experimental carps, mcg/g (I experiment)

Элемент / Element	Группа / Group			
	опытная / experimental			контроль / control
	I	II	III	
Si	1,4 ± 0,14	1,53 ± 0,11*	1,55 ± 0,12*	1,32 ± 0,13
Se	0,13 ± 0,006*	0,13 ± 0,005*	0,15 ± 0,018	0,16 ± 0,009
Zn	12,1 ± 0,22**	13,01 ± 0,05*	13,22 ± 0,43	13,82 ± 0,10
Cu	0,94 ± 0,12	1,08 ± 0,11	0,95 ± 0,11	1,15 ± 0,11
Fe	6,01 ± 0,6*	4,98 ± 0,5	4,7 ± 0,5	4,55 ± 0,46
Co	0,002 ± 0,0003	0,002 ± 0,0004	0,002 ± 0,0004	0,002 ± 0,0005
Mn	0,31 ± 0,037*	0,25 ± 0,030	0,39 ± 0,047**	0,22 ± 0,026
I	0,05 ± 0,007**	0,05 ± 0,006**	0,06 ± 0,008	0,07 ± 0,001
B	0,76 ± 0,091	0,82 ± 0,098	0,77 ± 0,092	0,67 ± 0,08
V	0,003 ± 0,0006	0,003 ± 0,0005	0,005 ± 0,001*	0,003 ± 0,0005

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – P≤0,05; ** – P≤0,01

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – P≤0.05; ** – P≤0.01

Как следует из полученных результатов в филе карпов I опытной группы отмечалось достоверное повышение содержание марганца на 40,9 % и железа – на 32,1 %. При этом в этой группе происходило трудно объяснимое уменьшение концентрации йода, селена и цинка на 28,6; 18,8 и 9,16 % соответственно. Аналогичное снижение пулов этих элементов в филе карпов II опытной группы составило 28,6; 18,8 и 2,3 %.

Анализ содержания токсических элементов в филе не выявил негативного воздействия действующего фактора на рыб (табл. 4).

Таблица 4. Концентрация токсических элементов в филе подопытных карпов, мкг/г (I эксперимент)

Table 4. Concentration of toxic elements in fillets of experimental carps, mcg/g (I experiment)

Элемент / Element	Группа / Group			
	опытная / experimental			контроль / control
	I	II	III	
As	0,01 ± 0,002	0,01 ± 0,001	0,01 ± 0,002	0,01 ± 0,002
Al	1,7 ± 0,17	2,33 ± 0,24	1,39 ± 0,14	1,56 ± 0,16
Sn	0,008 ± 0,0017	0,005 ± 0,0009	0,005 ± 0,0008	0,005 ± 0,0001
Sr	0,71 ± 0,085	0,54 ± 0,065	1,38 ± 0,33*	0,73 ± 0,088
Cd	0,002 ± 0,0004	0,001 ± 0,0002	0,003 ± 0,0006*	0,001 ± 0,0003
Hg	0,05 ± 0,007	0,04 ± 0,006	0,04 ± 0,005	0,03 ± 0,004
Pb	0,02 ± 0,003	0,01 ± 0,002*	0,007 ± 0,0014**	0,03 ± 0,006

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – P≤0,05; ** – P≤0,01

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – P≤0.05; ** – P≤0.01

В ходе второго эксперимента наибольшая живая масса карпа, на 13,7 % (P≤0,05) превышающая уровень контроля, установлена при скармливании препарата наночастиц кремнезёма в дозе 200 мг/кг корма (рис. 2).

Живая масса при совместном использовании комплекса аминокислот и NPS SiO₂ только на 6,6 % (P≤0,05) превзошла контроль.

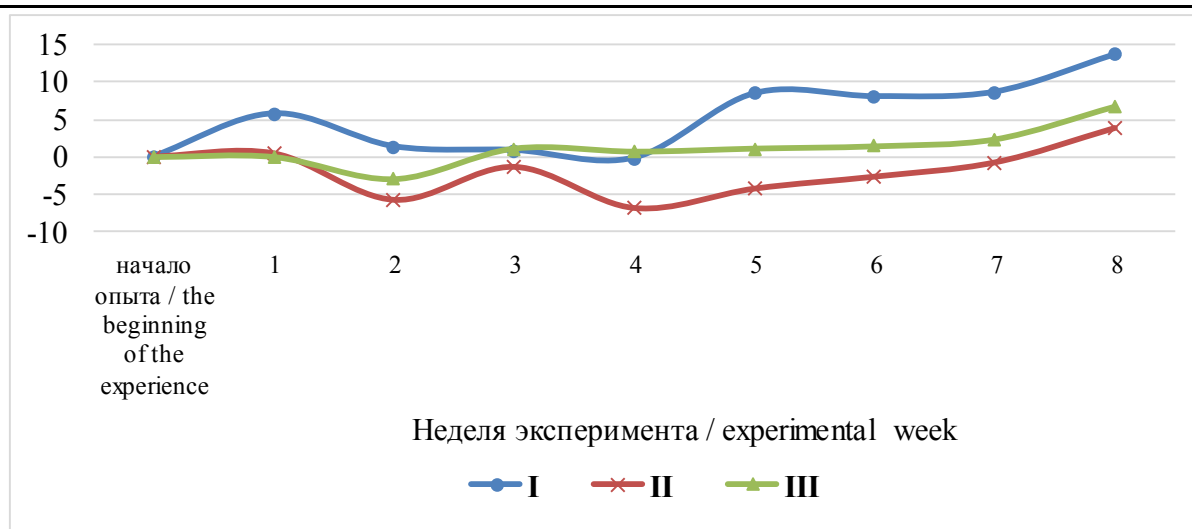


Рисунок 2. Разница по живой массе рыб опытных групп по сравнению с контрольной, % (II эксперимент)
Figure 2. Difference in live weight of fish of experimental groups compared to control group, % (II experiment)

Скармливание наночастиц кремнезёма сопровождалось повышением концентрации гемоглобина в крови карпов I, II и III опытных групп на 26,5 ($P \leq 0,001$), 20,9 ($P \leq 0,001$) и 12,7 % ($P \leq 0,01$) соответственно.

В ходе исследований нами констатировано повышение концентрации общего белка в сыворотке крови карпов опытных групп на 19,4 % ($P \leq 0,01$) в I; 4,0 – во II и 6,8 % – в III опытных группах.

Анализ аминокислотного состава печени подопытных карпов во II эксперименте в целом подтвердил выявленный в I эксперименте факт повышения уровня незаменимых и заменимых аминокислот (табл. 5).

Таблица 5. Концентрация аминокислот в печени подопытных карпов (II эксперимент), %
Table 5. Concentration of amino acids in the liver of experimental carps (II experiment), %

Аминокислота / <i>Amino acid</i>	Группа / <i>Group</i>			
	опытная / <i>experimental</i>			контроль / <i>control</i>
	I	II	III	
Аргинин / <i>Arginine</i>	1,02 ± 0,01	1,48 ± 0,03***	1,25 ± 0,03***	1,01 ± 0,01
Гистидин / <i>Histidine</i>	0,81 ± 0,04*	0,73 ± 0,03	0,82 ± 0,04*	0,69 ± 0,02
Глицин / <i>Glycine</i>	2,19 ± 0,06*	2,23 ± 0,08*	2,25 ± 0,09*	1,93 ± 0,04
Лейцин + изолейцин / <i>Leucine + Isoleucine</i>	4,96 ± 0,28*	4,67 ± 0,33	4,98 ± 0,42*	4,25 ± 0,12
Лизин / <i>Lysine</i>	0,98 ± 0,02	1,23 ± 0,03***	1,15 ± 0,02***	0,87 ± 0,02
Метионин / <i>Methionine</i>	1,05 ± 0,03**	1,03 ± 0,03**	1,06 ± 0,04**	0,86 ± 0,02
Валин / <i>Valine</i>	2,45 ± 0,04**	2,50 ± 0,05**	2,44 ± 0,04**	2,11 ± 0,05
Тирозин / <i>Tyrosine</i>	1,73 ± 0,05*	1,14 ± 0,02***	1,22 ± 0,04***	1,01 ± 0,01
Треонин / <i>Threonine</i>	1,26 ± 0,04***	1,88 ± 0,06**	1,91 ± 0,07**	1,61 ± 0,05
Фенилаланин / <i>Phenylalanine</i>	1,59 ± 0,05**	1,44 ± 0,04	1,60 ± 0,05**	1,34 ± 0,04
Пролин / <i>Proline</i>	1,71 ± 0,05*	1,83 ± 0,04**	1,86 ± 0,06**	1,55 ± 0,04

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$; *** – $P \leq 0,001$

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$; *** – $P \leq 0,001$

В мышечной ткани рыб опытных групп установлено повышение содержания кальция на 42,2 % ($P \leq 0,01$) во II опытной и снижение концентрации натрия на 25,3 % ($P \leq 0,05$) – в III опытной группах (табл. 6).

Таблица 6. Концентрация макроэлементов в филе подопытных карпов, мкг/г (II эксперимент)
Table 6. Concentration of macronutrients in fillets of experimental carps, mcg/g (II experiment)

Элемент / <i>Element</i>	Группа / <i>Group</i>			
	опытная / <i>experimental</i>			контроль / <i>control</i>
	I	II	III	
Ca	200 ± 26	293 ± 40**	213 ± 22	206 ± 19
K	4897 ± 489	4446 ± 445	4871 ± 469	5559 ± 548
Na	578 ± 52	501 ± 53	429 ± 44*	574 ± 51
Mg	174 ± 16	168 ± 17	171 ± 18	179 ± 19
P	1911 ± 193	1983 ± 196	2115 ± 212	2143 ± 221

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – $P \leq 0.05$; ** – $P \leq 0.01$

В ходе оценки концентрации жизненно необходимых и условно-жизненно необходимых химических микроэлементов в филе карпов выявлен факт достоверного повышения содержания кремния в биосубстрате рыбы I и III опытных групп (табл. 7).

Таблица 7. Концентрация жизненно необходимых и условно-жизненно необходимых химических микроэлементов в филе подопытных карпов, мкг/г (II эксперимент)
Table 7. Concentration of vital and conditionally vital chemical trace elements in fillets of experimental carps, mcg/g (II experiment)

Элемент / <i>Element</i>	Группа / <i>Group</i>			
	опытная / <i>experimental</i>			контроль / <i>control</i>
	I	II	III	
Si	1,54 ± 0,14*	1,2 ± 0,13	1,53 ± 0,12*	1,29 ± 0,11
Se	0,13 ± 0,003*	0,13 ± 0,008*	0,12 ± 0,011*	0,15 ± 0,004
Zn	12,74 ± 0,09*	12,7 ± 0,18*	12,5 ± 0,25*	13,25 ± 0,11
Cu	1,13 ± 0,11	0,85 ± 0,10*	1,21 ± 0,12	1,17 ± 0,12
Fe	4,92 ± 0,47	3,49 ± 0,4*	3,78 ± 0,35	4,61 ± 0,43
Co	0,002 ± 0,0004	0,001 ± 0,0003	0,002 ± 0,0004	0,002 ± 0,0005
Cr	0,03 ± 0,006	0,03 ± 0,005	0,06 ± 0,009*	0,03 ± 0,005
Mn	0,23 ± 0,030	0,30 ± 0,036*	0,26 ± 0,031	0,21 ± 0,023
I	0,05 ± 0,005*	0,04 ± 0,007*	0,05 ± 0,009*	0,06 ± 0,002
B	0,78 ± 0,096	0,64 ± 0,076	0,76 ± 0,091	0,71 ± 0,08
Li	0,02 ± 0,0035	0,02 ± 0,0025	0,03 ± 0,0037	0,02 ± 0,0038
Ni	0,04 ± 0,006	0,05 ± 0,008*	0,04 ± 0,006	0,03 ± 0,004
V	0,004 ± 0,0006	0,004 ± 0,0008	0,003 ± 0,0005	0,003 ± 0,0005

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: * – $P \leq 0,05$

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – $P \leq 0.05$

В филе карпов II опытной группы нами отмечалось достоверное снижение содержание меди и железа, тогда как отмечался рост марганца и никеля.

В филе карпов I, II и III опытных групп отмечалось достоверное ($P \leq 0,05$) снижение концентрации цинка на 3,8; 4,2; 5,7 %, селена – на 13,3; 13,3; 20 % и йода – на 16,7; 33,3; 16,7 % соответственно.

Достоверные различия между группами были выявлены нами и по уровню токсических элементов (табл. 8).

Таблица 8. Концентрация токсических элементов в филе подопытных карпов, мкг/г
(II эксперимент)

Table 8. Concentration of toxic elements in fillets of experimental carps, mcg/g (II experiment)

Элемент / <i>Element</i>	Группа / <i>Group</i>			
	опытная			контроль / <i>control</i>
	I	II	III	
As	0,01 ± 0,001	0,01 ± 0,001	0,01 ± 0,002	0,01 ± 0,002
Al	2,17 ± 0,34	1,02 ± 0,11	2,22 ± 0,21*	1,6 ± 0,16
Sn	0,005 ± 0,0008	0,004 ± 0,0007	0,004 ± 0,0008	0,004 ± 0,0001
Sr	0,51 ± 0,068*	1,47 ± 0,15*	0,71 ± 0,086	0,75 ± 0,096
Pb	0,01 ± 0,001**	0,02 ± 0,002	0,03 ± 0,004	0,03 ± 0,005
Cd	0,001 ± 0,0003	0,0006 ± 0,00019	0,001 ± 0,0003	0,001 ± 0,0002
Hg	0,04 ± 0,009	0,03 ± 0,007	0,03 ± 0,008	0,04 ± 0,004

Примечание: разница достоверна по отношению к контролю: ** – P≤0,05; * – P≤0,1

Note: the difference is reliable in relation to the control: * – P≤0.05; ** – P≤0.1

Во мышечной ткани карпов I опытной группы обнаружено достоверное снижение стронция на 32 % (P≤0,05) и свинца – на 66,7 % (P≤0,01) относительно контроля.

Обсуждение полученных результатов.

При планировании исследований мы исходили из того, что кремнийсодержащие NPS одобрены для использования в пищевой и фармацевтической промышленности (Knight D et al., 2015; Karavolos M and Holban A, 2016; da Silva AB et al., 2020). Очевидно, что это открывает новые перспективы для применения NPS SiO₂ в рыбоводстве. Между тем представление о биологической роли кремния в организме – далеко не полное (Götz W et al., 2019), что сдерживает практику применения кремния и его соединений в аквакультуре. В литературе есть данные, указывающие на эффективность NPS SiO₂ при выращивании нильской тилляпии (Alandiyany MN et al., 2022). Однако механизмы действия кремнийсодержащих наночастиц на организм рыбы и водные экосистемы пока не ясны, что не позволяет в полной мере оценить их влияние на гидросферу. По некоторым оценкам объемы выбросов в окружающую среду техногенного кремния, содержащего NPS, составляют 83 300 метрических тонн, из которых, очевидно, не менее 2 100 попадают в водные системы (Keller AA et al., 2013).

В первом эксперименте при выращивании карпа на рационах с содержанием сырого протеина 23 % скармливание NPS SiO₂ сопровождалось повышением интенсивности роста рыбы на 10,2-14,1 %.

Анализируя полученные результаты можно прийти к выводу, что продуктивное действие NPS SiO₂ на организм рыбы определяется целым рядом факторов, в числе которых действие на процессы переваривания корма и пищеварительную систему; синтез и обмен белка; обмен химических элементов (снижение пула токсических элементов и нивелирование эффектов «нагруженного метаболизма»).

Действие NPS SiO₂ на организм рыбы реализуется с изменением метаболитов плазмы крови. В исследованиях на крысах (Landsiedel R et al., 2022) показаны изменения значений 18 из 231 оцениваемых метаболитов крови на фоне применения NPS SiO₂. Это может быть связано с влиянием NPS SiO₂ на усвоение целого ряда веществ, в том числе железа, цинка, глюкозы и липидов, описанным другими авторами (Guo Z et al., 2018).

В наших исследованиях мы констатировали факт достоверного увеличения содержания общего белка в сыворотке крови карпов на 4,13-6,89 г/л. Ранее стимулирующее действие добавок кремния на белковый обмен и синтез коллагена было отмечено в ряде работ (Reffitt DM et al., 2003;

Nakhon S et al., 2019). Анализ экспрессии генов показал, что NPS SiO₂ изменяют уровни экспрессии транспортных белков, что сопряжено с обменом аминокислот (Guo Z et al., 2018).

Как следует из полученных результатов, препарат NPS SiO₂ оказывает значительное влияние на белковый обмен, что, в том числе, выразилось увеличением содержания в печени опытной рыбы отдельных аминокислот, метионина и пролина.

Механизм этого явления связан со стимулированием кремнием роста костной и хрящевой тканей (Pietak AM et al., 2007), пролиферации остеобластов и уселением экспрессии гена коллагена I типа (Shie MY et al., 2011), что сопровождается активизацией синтеза остеобластами белков со значительным содержанием пролина (Shen L et al., 2021). Поглощение и встраивание пролина в белок увеличивается во время дифференцировки остеобластов. Аналогичные результаты по связи активного роста костной и хрящевой тканей с потребностью в пролине показаны в других исследованиях (Shen L et al., 2022).

Факт повышения концентрации метионина в печени рыбы можно объяснить данными о роли метионина как «метаболита роста», иерархически организующего и изменяющего клеточный метаболизм (Walvekar AS et al., 2018).

Механизм, лежащий в основе наблюдаемых биологических эффектов кремния, вероятно, может быть объяснён и его взаимодействием с другими элементами. В наших исследованиях введение NPS SiO₂ в рацион карпов сопровождалось повышением концентрации кремния в мышечной ткани рыбы на 15,9-17,4 % (P≤0,05), кальция – на 15,9-36,4 % (P≤0,05). Ранее аналогичные результаты получены Najda J с коллегами (1993).

Определённый интерес представляют данные, выявленные нами при оценке действия кремния на обмен токсических химических элементов в организме карпа. В данном случае отмечается очевидный антагонизм кремния по отношению к обмену стронция и свинца, что выразилось снижением обменных пулов этих элементов на 26 % (P≤0,05) и 66,7 % (P≤0,01) соответственно при дозировке NPS SiO₂ 200 мг/кг. Ранее сходные результаты были получены в исследованиях других учёных (Liu J et al., 2015; Naeem A et al., 2018). Опираясь на эти факты и с учётом результатов ранее проведённых исследований о зависимости продуктивности животных от пулов токсических элементов в организме (Kalashnikov V et al., 2018; Miroshnikov S et al., 2019), можно предположить, что в наших исследованиях одним из факторов повышения продуктивности в опытных группах при даче NPS SiO₂ стало нивелирование пагубного действия токсических элементов на обмен веществ и энергии. Это явление ранее нами описано как «нагруженный метаболизм» (Miroshnikov S et al., 2021).

В наших исследованиях установлен факт трудно объяснимого снижения содержания в мышечной ткани карпа цинка, селена и йода на 9,16 % (P≤0,01), 18,8 % (P≤0,05) и 28,6 % (P≤0,01) уже при минимальной дозировке NPS SiO₂ (100 мг/кг) в I опытной группе.

Очевидно, что механизмы биологического действия NPS SiO₂ на организм карпа определяются наноструктурной природой препарата диоксида кремния. Ранее было показано что NPS проходят между эпителиальными клетками пищеварительного тракта посредством парацеллюлярного транспорта, а также путём эндоцитоза бокаловидными и М-клетками (Halamoda-Kenzaoui B et al., 2017). После попадания в клетки NPS могут покидать лизосомальный или эндосомальный компартмент и попадать в цитозоль (Vita AA et al., 2019).

Дальнейшая судьба и влияние NPS SiO₂ на морфофункциональные особенности кишечника животных остаются до конца не ясными. Очевидно, что нетоксические препараты NPS SiO₂ не оказывают влияния на кишечник (Kim YR et al., 2014; Yoshida T et al., 2014).

Наночастицы, проходя кишечный барьер, оказывают многостороннее действие на организм рыбы. Одним из таких действий в наших исследованиях стало повышение концентрации гемоглобина в крови карпов при применении NPS SiO₂ на 7,4 % (P≤0,05) в I опытной группе; на 25,3 % – во II (P≤0,01) и на 18,9 % (P≤0,01) – в III опытных группах. Ранее установлено, что взаимодействие гемоглобина с наночастицами кремния сопровождается повышением сродства гемоглобина к кис-

лороду (Devineau S et al., 2017), что было обусловлено изменениями в структуре гемоглобина (Devineau S et al., 2018).

NPS SiO₂ фагоцитируются макрофагами, что запускает воспалительные реакции (Kusaka T et al., 2014). Эти токсические эффекты, особенно в дыхательных путях, могут вызывать воспаление (Han H et al., 2016). Однако для NPS SiO₂ в качестве пищевой добавки не было оценено никаких признаков токсичности (Younes M et al., 2018).

Мы в своих исследованиях констатировали факт увеличения количества лимфоцитов при скармливании рыбе NPS SiO₂ на 14,9-34,3 %; моноцитов – на 4,7-61,9 %, в зависимости от дозировки. Аналогичные результаты при оценке действия кремния получены другими авторами (Seaborn CD et al., 2002).

NPS SiO₂ напрямую связываются с комплексом Т-клеточных рецепторов и активируют Т-клетки иммунной системы и их последующую передачу сигналов (Vis B et al., 2018; Vis B et al., 2020).

Как следует из ранее проведённых нами исследований, цепь взаимодействия «NPS-макрофаги» запускает целый каскад биохимических реакций, которые на модели кур сопровождаются изменениями в обмене белка с активизацией синтеза аргинина (Miroshnikov SA et al., 2015). Очевидно, что данный процесс объясняется активизацией синтеза NO с последующей стимуляцией синтеза аргинина (Huang CC et al., 2008). В связи аргинин опосредовано способен стимулировать рост животных через активизацию белкового обмена и перестройку метаболизма (McKnight JR et al., 2010).

Учитывая это и опираясь на более ранние наши исследования по комплексному применению препаратов наночастиц металлов и аминокислот (лизин, метионин, аргинин) (Miroshnikov SA et al., 2017); NPS SiO₂ и аминокислот (лизин, метионин, аргинин) (Мирошников С.А. и др., 2020; Мустафин Р.З. и Мустафина А.С., 2021; Mustafina AS et al., 2021), нами был запланирован и проведён второй эксперимент по комплексному применению NPS SiO₂ и аминокислот (лизин, метионин, аргинин) при выращивании карпа.

Как следует из полученных данных, дополнительное введение аминокислот не позволило повысить эффективность NPS SiO₂. Таким образом, введение NPS SiO₂ сопровождалось увеличением живой массы карпов на 13,7 % (P≤0,05), тогда как при комплексном применении NPS SiO₂ и аминокислот – только на 6,6 % (P≤0,05). Относительно низкое продуктивное действие совместного применения NPS SiO₂ и аминокислот было сопряжено с относительно низким (29,23-30,02 г/л) содержанием общего белка в сыворотке крови карпа против 33,54 г/л в I опытной группе. Анализ аминокислотного состава печени подопытных карпов во II эксперименте в целом подтвердил результаты I опыта.

Установленное снижение содержания меди и железа в мышечной ткани рыб II опытной группы связано с антиоксидантными свойствами используемых аминокислот, способных хелатировать ионы железа и меди, образуя комплексные соединения, которые легко выводятся из организма через почки и печень (Mitchell GV and Jenkins MY et al., 1983; Wu P et al., 2017; Wang Q et al., 2021). Медь и железо в мышечной ткани рыб необходимы для поддержания целостности клеток и защиты от свободных радикалов (Wu M et al., 2018; Li X et al., 2021).

Скармливание NPS SiO₂ сопровождалось повышением концентрации гемоглобина в крови карпа с 97,6±5,7 г/л в контрольной группе до 123,5 ±10,1 г/л (P≤0,001) в I опытной, 117±9,3 (P≤0,001) – во II и 108±9,5 (P≤0,01) – в III опытных группах.

Во II эксперименте подтверждён факт снижения содержания в мышечной ткани карпа цинка, селена и йода при скармливании NPS SiO₂. Очевидно, обмен кремния и этих микроэлементов связан между собой.

Заключение.

Препарат NPS SiO₂, полученный методом плазмохимического синтеза (d=126,5±9,7 нм, Z-потенциал – 29±0,1 мВ), с отсутствием токсичности в диапазоне от 1,5•10⁻⁵ до 5•10⁻¹ г/л при включении в полнорационный комбикорм с содержанием сырого протеина 23 % характеризуется ростостимулирующим действием на организм карпа. Ростостимулирующий эффект NPS SiO₂ сопряжён с

изменением течения белкового обмена – увеличением содержания общего белка в сыворотке крови и ростом содержания аминокислот в печени карпа. Сочетанное применение в кормлении карпа добавок NPS SiO₂ и аминокислот (лизин, митеонин, аргинин) не позволяет повысить ростостимулирующее действие NPS SiO₂.

Список источников

1. Мирошников С.А., Мустафина А.С., Губайдуллина И.З. Оценка действия ультрадисперсного оксида кремния на организм цыплят-бройлеров // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 1. С. 20-32. [Miroshnikov SA, Mustafina AS, Gubaidullina IZ. Evaluation of action of ultrafine silicon oxide on the body of broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(1):20-32. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-103-1-20
2. Мусабаева Л.Л., Сизова Е.А. Эффективность применения в кормлении цыплят-бройлеров кремнийсодержащей добавки «Silaccess» // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 1. С. 82-91. [Musabayeva LL, Sizova EA. The effectiveness of silicon-containing additive "Silaccess" in feeding broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(1):82-91. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-1-82
3. Мусабаева Л.Л., Сизова Е.А., Нечитайло К.С. Сравнительная оценка влияния кормовой добавки Silaccess на основе льняного жмыха и цеолита на переваримость и морфологические показатели крови цыплят-бройлеров // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107. № 1. С. 118-127. [Musabaeva LL, Sizova EA, Nechitailo KS. Comparative assessment of the effect of the feed additive Silaccess based on flaxseed cake and zeolite on digestibility and morphological parameters of broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2024;107(1):118-127. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-107-1-118
4. Мустафин Р.З., Мустафина А.С. Определение рациональной дозы диоксида кремния в кормлении цыплят-бройлеров // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104. № 1. С. 8-19. [Mustafin RZ, Mustafina AS. Determination of the rational dose of silicon dioxide in the feeding of broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2021;104(1):8-19. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-104-1-8
5. Органоминеральный комплекс на основе ультрадисперсных кремнийсодержащих частиц, как модулятор микробиома желудочно-кишечного тракта крупного рогатого скота / А.М. Камирова, Е.А. Сизова, А.П. Иванищева, Д.Е. Шошин, Е.В. Яушева // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 2. С. 13-26. [Kamirova AM, Sizova EA, Ivanishcheva AP, Shoshin DE, Yausheva EV. The organic mineral complex based on ultrafine silicon-containing particles as a microbiome modulator of gastrointestinal tract of cattle. Animal Husbandry and Fodder Production. 2024;107(2):13-26. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-107-2-13
6. Alandiyjany MN, Kishawy ATY, Abdelfattah-Hassan A, Eldoumani H, Elazab ST, El-Mandrawy SAM, Saleh AA, ElSawy NA, Attia YA, Arisha AH, Ibrahim D. Nano-silica and magnetized-silica mitigated lead toxicity: Their efficacy on bioaccumulation risk, performance, and apoptotic targeted genes in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquat Toxicol. 2022;242:106054. doi: 10.1016/j.aquatox.2021.106054
7. Arthur-Ataam J, Bideaux P, Charrabi A, Sicard P, Fromy B, Liu K, Eddahibi S, Pasqualin C, Jouy N, Richard S, Virsolvy A. Dietary supplementation with silicon-enriched spirulina improves arterial remodeling and function in hypertensive rats. Nutrients. 2019;11(11):2574. doi: 10.3390/nu11112574
8. Bashar A, Hasan NA, Haque MM, Rohani MF and Hossain MS. Effects of dietary silica nanoparticle on growth performance, protein digestibility, hematology, digestive morphology, and muscle composition of Nile tilapia, *Oreochromis Niloticus*. Front Mar Sci. 2021;8:706179. doi: 10.3389/fmars.2021.706179

9. Carlisle EM. Silicon: a possible factor in bone calcification. *Science*. 1970;167(3916):279-280. doi: 10.1126/science.167.3916.279
10. Carlisle EM. Silicon: an essential element for the chick. *Science*. 1972;178(4061):619-621. doi: 10.1126/science.178.4061.619
11. da Silva AB, Minitier M, Thom W, Hewitt RE, Wills J, Jugdaohsingh R, Powell JJ. Gastrointestinal absorption and toxicity of nanoparticles and microparticles: Myth, reality and pitfalls explored through titanium dioxide. *Curr Opin Toxicol*. 2020;19:112-120. doi: 10.1016/j.cotox.2020.02.007
12. Deryabin DG, Aleshina ES, Efremova LV. Application of the inhibition of bacterial bioluminescence test for assessment of toxicity of carbon-based nanomaterials. *Microbiology*. 2012;81(4):492-497. doi: 10.1134/S0026261712040042
13. Devineau S, Kiger L, Galacteros F, Baudin-Creuzat V, Marden M, Renault JP, Pin S. Manipulating hemoglobin oxygenation using silica nanoparticles: a novel prospect for artificial oxygen carriers. *Blood Adv*. 2018;2(2):90-94. doi: 10.1182/bloodadvances.2017012153
14. Devineau S, Zargarian L, Renault JP, Pin S. Structure and function of adsorbed hemoglobin on silica nanoparticles: relationship between the adsorption process and the oxygen binding properties. *Langmuir*. 2017;33(13):3241-3252. doi: 10.1021/acs.langmuir.6b04281
15. Francis RM, Anderson FH, Patel S, Sahota O, van Staa TP. Calcium and vitamin D in the prevention of osteoporotic fractures. *QJM: An International Journal of Medicine*. 2006;99(6):355-363. doi: 10.1093/qjmed/hcl031
16. Götz W, Tobiasch E, Witzleben S, Schulze M. Effects of silicon compounds on biomineralization, osteogenesis, and hard tissue formation. *Pharmaceutics*. 2019;11(3):117. doi: 10.3390/pharmaceutics11030117
17. Guo Z, Martucci NJ, Liu Y, Yoo E, Tako E, Mahler GJ. Silicon dioxide nanoparticle exposure affects small intestine function in an in vitro model. *Nanotoxicology*. 2018;12(5):485-508. doi: 10.1080/17435390.2018.1463407
18. Halamoda-Kenzaoui B, Ceridono M, Urbán P, Bogni A, Ponti J, Gioria S, Kinsner-Ovaskainen A. The agglomeration state of nanoparticles can influence the mechanism of their cellular internalisation. *J Nanobiotechnology*. 2017;15(1):48. doi: 10.1186/s12951-017-0281-6
19. Han H, Park YH, Park HJ, Lee K, Um K, Park JW, Lee JH. Toxic and adjuvant effects of silica nanoparticles on ovalbumin-induced allergic airway inflammation in mice. *Respir Res*. 2016;17(1):60. doi: 10.1186/s12931-016-0376-x
20. Huang CC, Tsai SC, Lin WT. Potential ergogenic effects of L-arginine against oxidative and inflammatory stress induced by acute exercise in aging rats. *Exp Gerontol*. 2008;43(6):571-577. doi: 10.1016/j.exger.2008.03.002
21. Jugdaohsingh R, Calomme MR, Robinson K, Nielsen F, Anderson SH, D'Haese P, Geusens P, Loveridge N, Thompson RP, Powell JJ. Increased longitudinal growth in rats on a silicon-depleted diet. *Bone*. 2008;43(3):596-606. doi: 10.1016/j.bone.2008.04.014
22. Jugdaohsingh R. Silicon and bone health. *J Nutr Health Aging*. 2007;11(2):99-110.
23. Jurkić LM, Cepanec I, Pavelić SK, Pavelić K. Biological and therapeutic effects of ortho-silicic acid and some ortho-silicic acid-releasing compounds: New perspectives for therapy. *Nutr Metab (Lond)*. 2013;10(1):2. doi: 10.1186/1743-7075-10-2
24. Kalashnikov V, Zajcev A, Atroshchenko M, Miroshnikov S, Frolov A, Zav'yalov O, Kalinkova L, Kalashnikova T. The content of essential and toxic elements in the hair of the mane of the trotter horses depending on their speed. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018;25(22):21961-21967. doi: 10.1007/s11356-018-2334-2
25. Karavolos M, Holban A. Nanosized drug delivery systems in gastrointestinal targeting: interactions with microbiota. *Pharmaceutics (Basel)*. 2016;9(4):62. doi: 10.3390/ph9040062
26. Keller AA, McFerran S, Lazareva A, Suh S. Global life cycle releases of engineered nanomaterials. *J Nanopart Res*. 2013;15(6):1692. doi: 10.1007/s11051-013-1692-4

27. Kim YR, Lee SY, Lee EJ, Park SH, Seong NW, Seo HS, Shin SS, Kim SJ, Meang EH, Park MK, Kim MS, Kim CS, Kim SK, Son SW, Seo YR, Kang BH, Han BS, An SS, Lee BJ, Kim MK. Toxicity of colloidal silica nanoparticles administered orally for 90 days in rats. *Int J Nanomedicine*. 2014;9(Suppl 2):67-78. doi: 10.2147/IJN.S57925
28. Knight D, Ehrlich R, Fielding K, Jeffery H, Grant A, Churchyard G. Trends in silicosis prevalence and the healthy worker effect among gold miners in South Africa: a prevalence study with follow up of employment status. *BMC Public Health*. 2015;15:1258. doi: 10.1186/s12889-015-2566-8
29. Küçükbay FZ, Yazlak H, Sahin N, Akdemir F, Orhan C, Juturu V, Sahin K. Effects of dietary arginine silicate inositol complex on mineral status in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture Nutrition*. 2008;14(3):257-262. doi: 10.1111/j.1365-2095.2007.00526.x
30. Kusaka T, Nakayama M, Nakamura K, Ishimiya M, Furusawa E, Ogasawara K. Effect of silica particle size on macrophage inflammatory responses. *PLoS One*. 2014;9(3):e92634. doi: 10.1371/journal.pone.0092634
31. Lall SP, Kaushik SJ. Nutrition and metabolism of minerals in fish. *Animals (Basel)*. 2021;11(9):2711. doi: 10.3390/ani11092711
32. Landsiedel R, Hahn D, Ossig R, Ritz S, Sauer L, Buesen R, Rehm S, Wohlleben W, Groeters S, Strauss V, Sperber S, Wami H, Dobrindt U, Prior K, Harmsen D, van Ravenzwaay B, Schnekenburger J. Gut microbiome and plasma metabolome changes in rats after oral gavage of nanoparticles: sensitive indicators of possible adverse health effects. *Part Fibre Toxicol*. 2022;19(1):21. doi: 10.1186/s12989-022-00459-w
33. Li X, Han T, Zheng S, Wu G. Nutrition and functions of amino acids in aquatic crustaceans. In: Wu G, editor. *Amino Acids in Nutrition and Health. Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer, Cham. 2021;1285:169-198. doi: 10.1007/978-3-030-54462-1_9
34. Liu J, Cai H, Mei C, et al. Effects of nano-silicon and common silicon on lead uptake and translocation in two rice cultivars. *Front Environ Sci Eng*. 2015;9:905-911. doi: 10.1007/s11783-015-0786-x
35. Martin KR. The chemistry of silica and its potential health benefits. *J Nutr Health Aging*. 2007;11(2):94-7.
36. McKnight JR, Satterfield MC, Jobgen WS, Smith SB, Spencer TE, Meininger CJ, McNeal CJ, Wu G. Beneficial effects of L-arginine on reducing obesity: potential mechanisms and important implications for human health. *Amino Acids*. 2010;39(2):349-357. doi: 10.1007/s00726-010-0598-z
37. Merkle JW, Miller ER. The effect of sodium fluoride and sodium silicate on growth and bone strength of broilers. *Poult Sci*. 1983;62(5):798-804. doi: 10.3382/ps.0620798
38. Miroshnikov S, Notova S, Kazakova T, Marshinskaia O. The total accumulation of heavy metals in body in connection with the dairy productivity of cows. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2021;28(36):49852-49863. doi: 10.1007/s11356-021-14198-6
39. Miroshnikov S, Zavyalov O, Frolov A, Sleptsov I, Sirazetdinov F, Poberukhin M. The content of toxic elements in hair of dairy cows as an indicator of productivity and elemental status of animals. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2019;26(18):18554-18564. doi: 10.1007/s11356-019-05163-5
40. Miroshnikov SA, Yausheva EV, Sizova EA, Miroshnikova EP, Levahin VI. Comparative assessment of effect of copper nano and microparticles in chicken. *Oriental Journal of Chemistry*. 2015;31(4):2327-2336. doi: 10.13005/ojc/310461
41. Miroshnikov SA, Yausheva EV, Sizova EA, Kosyan DB, Donnik IM. Research of opportunities for using iron nanoparticles and amino acids in poultry nutrition. *International Journal of GEOMATE*. 2017;13(40):124-131. doi: 10.21660/2017.40.99216
42. Mitchell GV, Jenkins MY. Effect of excess L-lysine on rat growth and on plasma and tissue concentrations of copper, iron and zinc. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)*. 1983;29(6):709-715. doi: 10.3177/jnsv.29.709

43. Mustafina AS, Sizova EA, Kholodilina TN, Mustafin RZ, Klimova TA. Live weight and digestibility of feed nutrients when using amino acids and silicon in the diet of broilers. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;848(1):012064. doi: 10.1088/1755-1315/848/1/012064
44. Naeem A, Saifullah, Zia-Ur-Rehman M, Akhtar T, Zia MH, Aslam M. Silicon nutrition lowers cadmium content of wheat cultivars by regulating transpiration rate and activity of antioxidant enzymes. Environ Pollut. 2018;242(Pt A):126-135. doi: 10.1016/j.envpol.2018.06.069
45. Najda J, Gmiński J, Drózd M, Danch A. The action of excessive, inorganic silicon (Si) on the mineral metabolism of calcium (Ca) and magnesium (Mg). Biol Trace Elem Res. 1993;37(2-3):107-114. doi: 10.1007/BF02783786
46. Nakhon S, Numthum S, Charoensook R, Tartrakoon W, Incharoen P, Incharoen T. Growth performance, meat quality, and bone-breaking strength in broilers fed dietary rice hull silicon. Anim Nutr. 2019;5(2):152-155. doi: 10.1016/j.aninu.2018.11.003
47. Nieves JW, Komar L, Cosman F, Lindsay R. (Review Article) Calcium potentiates the effects of estrogen and calcitonin on bone mass: review and analysis. Journal of Clinical Nutrition. 1998;67:18-24.
48. Pieszka M, Bederska-Łojewska D, Szczurek P, Pieszka M. The membrane interactions of nano-silica and its potential application in animal nutrition. Animals (Basel). 2019;9(12):1041. doi: 10.3390/ani9121041
49. Pietak AM, Reid JW, Scott MJ, Sayer M. Silicon substitution in the calcium phosphate bioceramics. Biomaterials. 2007;28(28):4023-4032. doi: 10.1016/j.biomaterials.2007.05.003
50. Reffitt DM, Ogston N, Jugdaohsingh R, Cheung HF, Evans BA, Thompson RP, Powell JJ, Hampson GN. Orthosilicic acid stimulates collagen type 1 synthesis and osteoblastic differentiation in human osteoblast-like cells in vitro. Bone. 2003;32(2):127-135. doi: 10.1016/s8756-3282(02)00950-x
51. Rodella LF, Bonazza V, Labanca M, Lonati C, Rezzani R. A review of the effects of dietary silicon intake on bone homeostasis and regeneration. J Nutr Health Aging. 2014;18(9):820-826. doi: 10.1007/s12603-014-0555-8
52. Sahin K, Onderci M, Sahin N, Balci, TA, Gursu MF, Juturu V, Kucuk O. Dietary arginine silicate inositol complex improves bone mineralization in quail. Poult Sci. 2006;85(3):486-492. doi:10.1093/ps/85.3.486
53. Seaborn CD, Briske-Anderson M, Nielsen FH. An interaction between dietary silicon and arginine affects immune function indicated by con-A-induced DNA synthesis of rat splenic T-lymphocytes. Biol Trace Elem Res. 2002;87(1-3):133-142. doi: 10.1385/BTER:87:1-3:133
54. Shen L, Karner CM. Radiolabeled amino acid uptake assays in primary bone cells and bone explants. In: Hilton MJ, editor. Skeletal development and repair. Methods in Molecular Biology. Humana, New York, NY. 2021;2230:449-456. doi: 10.1007/978-1-0716-1028-2_28
55. Shen L, Yu Y, Zhou Y, Pruetz-Miller SM, Zhang GF, Karner CM. SLC38A2 provides proline to fulfill unique synthetic demands arising during osteoblast differentiation and bone formation. Elife. 2022;11:e76963. doi: 10.7554/eLife.76963
56. Shie MY, Ding SJ, Chang HC. The role of silicon in osteoblast-like cell proliferation and apoptosis. Acta Biomater. 2011;7(6):2604-2614. doi: 10.1016/j.actbio.2011.02.023
57. US Food and Drug Administration. GRAS Substances (SCOGS) Database-Select Committee on GRAS Substances (SCOGS) Opinion: Silicates: Silicates. 2018;13.
58. van der Zande M, Vandebriel RJ, Groot MJ, Kramer E, Herrera Rivera ZE, Rasmussen K, Ossenkoppele JS, Tromp P, Gremmer ER, Peters RJ, Hendriksen PJ, Marvin HJ, Hoogenboom RL, Peijnenburg AA, Bouwmeester H. Sub-chronic toxicity study in rats orally exposed to nanostructured silica. Part Fibre Toxicol. 2014;11:8. doi: 10.1186/1743-8977-11-8
59. Vis B, Hewitt RE, Faria N, Bastos C, Chappell H, Pele L, Jugdaohsingh R, Kinrade SD, Powell JJ. Non-functionalized ultrasmall silica nanoparticles directly and size-selectively activate t cells. ACS Nano. 2018;12(11):10843-10854. doi: 10.1021/acsnano.8b03363

60. Vis B, Hewitt RE, Monie TP, Fairbairn C, Turner SD, Kinrade SD, Powell JJ. Ultrasmall silica nanoparticles directly ligate the T cell receptor complex. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2020;117(1):285-291. doi: 10.1073/pnas.1911360117
61. Vita AA, Royse EA, Pullen NA. Nanoparticles and danger signals: Oral delivery vehicles as potential disruptors of intestinal barrier homeostasis. *J Leukoc Biol*. 2019;106(1):95-103. doi: 10.1002/JLB.3MIR1118-414RR
62. Walvekar AS, Srinivasan R, Gupta R, Laxman S. Methionine coordinates a hierarchically organized anabolic program enabling proliferation. *Mol Biol Cell*. 2018;29(26):3063-3200. doi: 10.1091/mbc.E18-08-0515
63. Wang Q, Xu Z, Ai Q. Arginine metabolism and its functions in growth, nutrient utilization, and immunonutrition of fish. *Anim Nutr*. 2021;7(3):716-727. doi: 10.1016/j.aninu.2021.03.006
64. Wu M, Wu X, Lu S, Gao Y, Yao W, Li X, Dong Y, Jin Z. Dietary arginine affects growth, gut morphology, oxidation resistance and immunity of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus*♀×*Epinephelus lanceolatus*♂) juveniles. *Br J Nutr*. 2018;120(3):269-282. doi: 10.1017/S0007114518001022
65. Wu P, Tang L, Jiang W, Hu K, Liu Y, Jiang J, Kuang S, Tang L, Tang W, Zhang Y, Zhou X, Feng L. The relationship between dietary methionine and growth, digestion, absorption, and antioxidant status in intestinal and hepatopancreatic tissues of sub-adult grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *J Anim Sci Biotechnol*. 2017;8:63. doi: 10.1186/s40104-017-0194-0
66. Yoshida T, Yoshioka Y, Takahashi H, Misato K, Mori T, Hirai T, Nagano K, Abe Y, Mukai Y, Kamada H, Tsunoda S, Nabeshi H, Yoshikawa T, Higashisaka K, Tsutsumi Y. Intestinal absorption and biological effects of orally administered amorphous silica particles. *Nanoscale Res Lett*. 2014;9(1):532. doi: 10.1186/1556-276X-9-532
67. Younes M, Aggett P, Aguilar F, Crebelli R, Dusemund B, Filipič M, Frutos MJ, Galtier P, Gott D, Gundert-Remy U, Kuhnle GG, Leblanc J-C, Lillegaard IT, Moldeus P, Mortensen A, Oscarsson A, Stankovic I, Waalkens-Berendsen I, Woutersen RA, Wright M, Boon P, Chrysafidis D, Gürtler R, Mosesso P, Parent-Massin D, Tobbäck P, Kovalkovicova N, Rincon AM, Tard A and Lambré C. Re-evaluation of silicon dioxide (E 551) as a food additive. *EFSA Journal*. 2018;16(1):e5088. doi: 10.2903/j.efsa.2018.5088

References

1. Miroshnikov SA, Mustafina AS, Gubaidullina IZ. Evaluation of action of ultrafine silicon oxide on the body of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(1):20-32. doi: 10.33284/2658-3135-103-1-20
2. Musabayeva LL, Sizova EA. The effectiveness of silicon-containing additive "Silaccess" in feeding broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(1):82-91. doi: 10.33284/2658-3135-105-1-82
3. Musabaeva LL, Sizova EA, Nechitailo KS. Comparative assessment of the effect of the feed additive Silaccess based on flaxseed cake and zeolite on digestibility and morphological parameters of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(1):118-127. doi: 10.33284/2658-3135-107-1-118
4. Mustafin RZ, Mustafina AS. Determination of the rational dose of silicon dioxide in the feeding of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2021;104(1):8-19. doi: 10.33284/2658-3135-104-1-8
5. Kamirova AM, Sizova EA, Ivanishcheva AP, Shoshin DE, Yausheva EV. The organic mineral complex based on ultrafine silicon-containing particles as a microbiome modulator of gastrointestinal tract of cattle. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(2):13-26. doi: 10.33284/2658-3135-107-2-13

6. Alandiyjany MN, Kishawy ATY, Abdelfattah-Hassan A, Eldoumani H, Elazab ST, El-Mandrawy SAM, Saleh AA, ElSawy NA, Attia YA, Arisha AH, Ibrahim D. Nano-silica and magnetized-silica mitigated lead toxicity: Their efficacy on bioaccumulation risk, performance, and apoptotic targeted genes in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquat Toxicol.* 2022;242:106054. doi: 10.1016/j.aquatox.2021.106054
7. Arthur-Ataam J, Bideaux P, Charrabi A, Sicard P, Fromy B, Liu K, Eddahibi S, Pasqualin C, Jouy N, Richard S, Virsolvy A. Dietary supplementation with silicon-enriched spirulina improves arterial remodeling and function in hypertensive rats. *Nutrients.* 2019;11(11):2574. doi: 10.3390/nu1112574
8. Bashar A, Hasan NA, Haque MM, Rohani MF and Hossain MS. Effects of dietary silica nanoparticle on growth performance, protein digestibility, hematology, digestive morphology, and muscle composition of Nile tilapia, *Oreochromis Niloticus*. *Front Mar Sci.* 2021;8:706179. doi: 10.3389/fmars.2021.706179
9. Carlisle EM. Silicon: a possible factor in bone calcification. *Science.* 1970;167(3916):279-280. doi: 10.1126/science.167.3916.279
10. Carlisle EM. Silicon: an essential element for the chick. *Science.* 1972;178(4061):619-621. doi: 10.1126/science.178.4061.619
11. da Silva AB, Minter M, Thom W, Hewitt RE, Wills J, Jugdaohsingh R, Powell JJ. Gastrointestinal absorption and toxicity of nanoparticles and microparticles: Myth, reality and pitfalls explored through titanium dioxide. *Curr Opin Toxicol.* 2020;19:112-120. doi: 10.1016/j.cotox.2020.02.007
12. Deryabin DG, Aleshina ES, Efremova LV. Application of the inhibition of bacterial bioluminescence test for assessment of toxicity of carbon-based nanomaterials. *Microbiology.* 2012;81(4):492-497. doi: 10.1134/S0026261712040042
13. Devineau S, Kiger L, Galacteros F, Baudin-Creuzat V, Marden M, Renault JP, Pin S. Manipulating hemoglobin oxygenation using silica nanoparticles: a novel prospect for artificial oxygen carriers. *Blood Adv.* 2018;2(2):90-94. doi: 10.1182/bloodadvances.2017012153
14. Devineau S, Zargarian L, Renault JP, Pin S. Structure and function of adsorbed hemoglobin on silica nanoparticles: relationship between the adsorption process and the oxygen binding properties. *Langmuir.* 2017;33(13):3241-3252. doi: 10.1021/acs.langmuir.6b04281
15. Francis RM, Anderson FH, Patel S, Sahota O, van Staa TP. Calcium and vitamin D in the prevention of osteoporotic fractures. *QJM: An International Journal of Medicine.* 2006;99(6):355-363. doi: 10.1093/qjmed/hcl031
16. Götz W, Tobiasch E, Witzleben S, Schulze M. Effects of silicon compounds on biomineralization, osteogenesis, and hard tissue formation. *Pharmaceutics.* 2019;11(3):117. doi: 10.3390/pharmaceutics11030117
17. Guo Z, Martucci NJ, Liu Y, Yoo E, Tako E, Mahler GJ. Silicon dioxide nanoparticle exposure affects small intestine function in an in vitro model. *Nanotoxicology.* 2018;12(5):485-508. doi: 10.1080/17435390.2018.1463407
18. Halamoda-Kenzaoui B, Ceridono M, Urbán P, Bogni A, Ponti J, Gioria S, Kinsner-Ovaskainen A. The agglomeration state of nanoparticles can influence the mechanism of their cellular internalisation. *J Nanobiotechnology.* 2017;15(1):48. doi: 10.1186/s12951-017-0281-6
19. Han H, Park YH, Park HJ, Lee K, Um K, Park JW, Lee JH. Toxic and adjuvant effects of silica nanoparticles on ovalbumin-induced allergic airway inflammation in mice. *Respir Res.* 2016;17(1):60. doi: 10.1186/s12931-016-0376-x
20. Huang CC, Tsai SC, Lin WT. Potential ergogenic effects of L-arginine against oxidative and inflammatory stress induced by acute exercise in aging rats. *Exp Gerontol.* 2008;43(6):571-577. doi: 10.1016/j.exger.2008.03.002
21. Jugdaohsingh R, Calomme MR, Robinson K, Nielsen F, Anderson SH, D'Haese P, Geusens P, Loveridge N, Thompson RP, Powell JJ. Increased longitudinal growth in rats on a silicon-depleted diet. *Bone.* 2008;43(3):596-606. doi: 10.1016/j.bone.2008.04.014

22. Jugdaohsingh R. Silicon and bone health. *J Nutr Health Aging*. 2007;11(2):99-110.
23. Jurkić LM, Čepanec I, Pavelić SK, Pavelić K. Biological and therapeutic effects of ortho-silicic acid and some ortho-silicic acid-releasing compounds: New perspectives for therapy. *Nutr Metab (Lond)*. 2013;10(1):2. doi: 10.1186/1743-7075-10-2
24. Kalashnikov V, Zajcev A, Atroshchenko M, Miroshnikov S, Frolov A, Zav'yalov O, Kalinkova L, Kalashnikova T. The content of essential and toxic elements in the hair of the mane of the trotter horses depending on their speed. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018;25(22):21961-21967. doi: 10.1007/s11356-018-2334-2
25. Karavolos M, Holban A. Nanosized drug delivery systems in gastrointestinal targeting: interactions with microbiota. *Pharmaceuticals (Basel)*. 2016;9(4):62. doi: 10.3390/ph9040062
26. Keller AA, McFerran S, Lazareva A, Suh S. Global life cycle releases of engineered nanomaterials. *J Nanopart Res*. 2013;15(6):1692. doi: 10.1007/s11051-013-1692-4
27. Kim YR, Lee SY, Lee EJ, Park SH, Seong NW, Seo HS, Shin SS, Kim SJ, Meang EH, Park MK, Kim MS, Kim CS, Kim SK, Son SW, Seo YR, Kang BH, Han BS, An SS, Lee BJ, Kim MK. Toxicity of colloidal silica nanoparticles administered orally for 90 days in rats. *Int J Nanomedicine*. 2014;9(Suppl 2):67-78. doi: 10.2147/IJN.S57925
28. Knight D, Ehrlich R, Fielding K, Jeffery H, Grant A, Churchyard G. Trends in silicosis prevalence and the healthy worker effect among gold miners in South Africa: a prevalence study with follow up of employment status. *BMC Public Health*. 2015;15:1258. doi: 10.1186/s12889-015-2566-8
29. Küçükbay FZ, Yazlak H, Sahin N, Akdemir F, Orhan C, Juturu V, Sahin K. Effects of dietary arginine silicate inositol complex on mineral status in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture Nutrition*. 2008;14(3):257-262. doi: 10.1111/j.1365-2095.2007.00526.x
30. Kusaka T, Nakayama M, Nakamura K, Ishimiya M, Furusawa E, Ogasawara K. Effect of silica particle size on macrophage inflammatory responses. *PLoS One*. 2014;9(3):e92634. doi: 10.1371/journal.pone.0092634
31. Lall SP, Kaushik SJ. Nutrition and metabolism of minerals in fish. *Animals (Basel)*. 2021;11(9):2711. doi: 10.3390/ani11092711
32. Landsiedel R, Hahn D, Ossig R, Ritz S, Sauer L, Buesen R, Rehm S, Wohlleben W, Groeters S, Strauss V, Sperber S, Wami H, Dobrindt U, Prior K, Harmsen D, van Ravenzwaay B, Schneckeburger J. Gut microbiome and plasma metabolome changes in rats after oral gavage of nanoparticles: sensitive indicators of possible adverse health effects. Part Fibre Toxicol. 2022;19(1):21. doi: 10.1186/s12989-022-00459-w
33. Li X, Han T, Zheng S, Wu G. Nutrition and functions of amino acids in aquatic crustaceans. In: Wu G, editor. *Amino Acids in Nutrition and Health. Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer, Cham. 2021;1285:169-198. doi: 10.1007/978-3-030-54462-1_9
34. Liu J, Cai H, Mei C, et al. Effects of nano-silicon and common silicon on lead uptake and translocation in two rice cultivars. *Front Environ Sci Eng*. 2015;9:905-911. doi: 10.1007/s11783-015-0786-x
35. Martin KR. The chemistry of silica and its potential health benefits. *J Nutr Health Aging*. 2007;11(2):94-7.
36. McKnight JR, Satterfield MC, Jobgen WS, Smith SB, Spencer TE, Meininger CJ, McNeal CJ, Wu G. Beneficial effects of L-arginine on reducing obesity: potential mechanisms and important implications for human health. *Amino Acids*. 2010;39(2):349-357. doi: 10.1007/s00726-010-0598-z
37. Merkle JW, Miller ER. The effect of sodium fluoride and sodium silicate on growth and bone strength of broilers. *Poult Sci*. 1983;62(5):798-804. doi: 10.3382/ps.0620798
38. Miroshnikov S, Notova S, Kazakova T, Marshinskaia O. The total accumulation of heavy metals in body in connection with the dairy productivity of cows. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2021;28(36):49852-49863. doi: 10.1007/s11356-021-14198-6

39. Miroshnikov S, Zavyalov O, Frolov A, Sleptsov I, Sirazetdinov F, Poberukhin M. The content of toxic elements in hair of dairy cows as an indicator of productivity and elemental status of animals. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2019;26(18):18554-18564. doi: 10.1007/s11356-019-05163-5
40. Miroshnikov SA, Yausheva EV, Sizova EA, Miroshnikova EP, Levahin VI. Comparative assessment of effect of copper nano and microparticles in chicken. *Oriental Journal of Chemistry.* 2015;31(4):2327-2336. doi: 10.13005/ojc/310461
41. Miroshnikov SA, Yausheva EV, Sizova EA, Kosyan DB, Donnik IM. Research of opportunities for using iron nanoparticles and amino acids in poultry nutrition. *International Journal of GEOMATE.* 2017;13(40):124-131. doi: 10.21660/2017.40.99216
42. Mitchell GV, Jenkins MY. Effect of excess L-lysine on rat growth and on plasma and tissue concentrations of copper, iron and zinc. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo).* 1983;29(6):709-715. doi: 10.3177/jnsv.29.709
43. Mustafina AS, Sizova EA, Kholodilina TN, Mustafin RZ, Klimova TA. Live weight and digestibility of feed nutrients when using amino acids and silicon in the diet of broilers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021;848(1):012064. doi: 10.1088/1755-1315/848/1/012064
44. Naeem A, Saifullah, Zia-Ur-Rehman M, Akhtar T, Zia MH, Aslam M. Silicon nutrition lowers cadmium content of wheat cultivars by regulating transpiration rate and activity of antioxidant enzymes. *Environ Pollut.* 2018;242(Pt A):126-135. doi: 10.1016/j.envpol.2018.06.069
45. Najda J, Gmiński J, Drózd M, Danch A. The action of excessive, inorganic silicon (Si) on the mineral metabolism of calcium (Ca) and magnesium (Mg). *Biol Trace Elem Res.* 1993;37(2-3):107-114. doi: 10.1007/BF02783786
46. Nakhon S, Numthuam S, Charoensook R, Tartrakoon W, Incharoen P, Incharoen T. Growth performance, meat quality, and bone-breaking strength in broilers fed dietary rice hull silicon. *Anim Nutr.* 2019;5(2):152-155. doi: 10.1016/j.aninu.2018.11.003
47. Nieves JW, Komar L, Cosman F, Lindsay R. (Review Article) Calcium potentiates the effects of estrogen and calcitonin on bone mass: review and analysis. *Journal of Clinical Nutrition.* 1998;67:18-24.
48. Pieszka M, Bederska-Łojewska D, Szczurek P, Pieszka M. The membrane interactions of nano-silica and its potential application in animal nutrition. *Animals (Basel).* 2019;9(12):1041. doi: 10.3390/ani9121041
49. Pietak AM, Reid JW, Scott MJ, Sayer M. Silicon substitution in the calcium phosphate bioceramics. *Biomaterials.* 2007;28(28):4023-4032. doi: 10.1016/j.biomaterials.2007.05.003
50. Reffitt DM, Ogston N, Jugdaohsingh R, Cheung HF, Evans BA, Thompson RP, Powell JJ, Hampson GN. Orthosilicic acid stimulates collagen type 1 synthesis and osteoblastic differentiation in human osteoblast-like cells in vitro. *Bone.* 2003;32(2):127-135. doi: 10.1016/s8756-3282(02)00950-x
51. Rodella LF, Bonazza V, Labanca M, Lonati C, Rezzani R. A review of the effects of dietary silicon intake on bone homeostasis and regeneration. *J Nutr Health Aging.* 2014;18(9):820-826. doi: 10.1007/s12603-014-0555-8
52. Sahin K, Onderci M, Sahin N, Balci, TA, Gursu MF, Juturu V, Kucuk O. Dietary arginine silicate inositol complex improves bone mineralization in quail. *Poult Sci.* 2006;85(3):486-492. doi:10.1093/ps/85.3.486
53. Seaborn CD, Briske-Anderson M, Nielsen FH. An interaction between dietary silicon and arginine affects immune function indicated by con-A-induced DNA synthesis of rat splenic T-lymphocytes. *Biol Trace Elem Res.* 2002;87(1-3):133-142. doi: 10.1385/BTER:87:1-3:133
54. Shen L, Karner CM. Radiolabeled amino acid uptake assays in primary bone cells and bone explants. In: Hilton MJ, editor. *Skeletal development and repair. Methods in Molecular Biology.* Humana, New York, NY. 2021;2230:449-456. doi: 10.1007/978-1-0716-1028-2_28
55. Shen L, Yu Y, Zhou Y, Pruett-Miller SM, Zhang GF, Karner CM. SLC38A2 provides proline to fulfill unique synthetic demands arising during osteoblast differentiation and bone formation. *Elife.* 2022;11:e76963. doi: 10.7554/eLife.76963

56. Shie MY, Ding SJ, Chang HC. The role of silicon in osteoblast-like cell proliferation and apoptosis. *Acta Biomater.* 2011;7(6):2604-2614. doi: 10.1016/j.actbio.2011.02.023
57. US Food and Drug Administration. GRAS Substances (SCOGS) Database-Select Committee on GRAS Substances (SCOGS) Opinion: Silicates: Silicates. 2018;13.
58. van der Zande M, Vandebriel RJ, Groot MJ, Kramer E, Herrera Rivera ZE, Rasmussen K, Ossenkoppele JS, Tromp P, Gremmer ER, Peters RJ, Hendriksen PJ, Marvin HJ, Hoogenboom RL, Peijnenburg AA, Bouwmeester H. Sub-chronic toxicity study in rats orally exposed to nanostructured silica. *Part Fibre Toxicol.* 2014;11:8. doi: 10.1186/1743-8977-11-8
59. Vis B, Hewitt RE, Faria N, Bastos C, Chappell H, Pele L, Jugdaohsingh R, Kinrade SD, Powell JJ. Non-functionalized ultrasmall silica nanoparticles directly and size-selectively activate t cells. *ACS Nano.* 2018;12(11):10843-10854. doi: 10.1021/acsnano.8b03363
60. Vis B, Hewitt RE, Monie TP, Fairbairn C, Turner SD, Kinrade SD, Powell JJ. Ultrasmall silica nanoparticles directly ligate the T cell receptor complex. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2020;117(1):285-291. doi: 10.1073/pnas.1911360117
61. Vita AA, Royse EA, Pullen NA. Nanoparticles and danger signals: Oral delivery vehicles as potential disruptors of intestinal barrier homeostasis. *J Leukoc Biol.* 2019;106(1):95-103. doi: 10.1002/JLB.3MIR1118-414RR
62. Walvekar AS, Srinivasan R, Gupta R, Laxman S. Methionine coordinates a hierarchically organized anabolic program enabling proliferation. *Mol Biol Cell.* 2018;29(26):3063-3200. doi: 10.1091/mbc.E18-08-0515
63. Wang Q, Xu Z, Ai Q. Arginine metabolism and its functions in growth, nutrient utilization, and immunonutrition of fish. *Anim Nutr.* 2021;7(3):716-727. doi: 10.1016/j.aninu.2021.03.006
64. Wu M, Wu X, Lu S, Gao Y, Yao W, Li X, Dong Y, Jin Z. Dietary arginine affects growth, gut morphology, oxidation resistance and immunity of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) juveniles. *Br J Nutr.* 2018;120(3):269-282. doi: 10.1017/S0007114518001022
65. Wu P, Tang L, Jiang W, Hu K, Liu Y, Jiang J, Kuang S, Tang L, Tang W, Zhang Y, Zhou X, Feng L. The relationship between dietary methionine and growth, digestion, absorption, and antioxidant status in intestinal and hepatopancreatic tissues of sub-adult grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *J Anim Sci Biotechnol.* 2017;8:63. doi: 10.1186/s40104-017-0194-0
66. Yoshida T, Yoshioka Y, Takahashi H, Misato K, Mori T, Hirai T, Nagano K, Abe Y, Mukai Y, Kamada H, Tsunoda S, Nabeshi H, Yoshikawa T, Higashisaka K, Tsutsumi Y. Intestinal absorption and biological effects of orally administered amorphous silica particles. *Nanoscale Res Lett.* 2014;9(1):532. doi: 10.1186/1556-276X-9-532
67. Younes M, Aggett P, Aguilar F, Crebelli R, Dusemund B, Filipič M, Frutos MJ, Galtier P, Gott D, Gundert-Remy U, Kuhnle GG, Leblanc J-C, Lillegaard IT, Moldeus P, Mortensen A, Oscarsson A, Stankovic I, Waalkens-Berendsen I, Woutersen RA, Wright M, Boon P, Chrysafidis D, Gürtler R, Mosesso P, Parent-Massin D, Tobbäck P, Kovalkovicova N, Rincon AM, Tard A and Lambré C. Re-evaluation of silicon dioxide (E 551) as a food additive. *EFSA Journal.* 2018;16(1):e5088. doi: 10.2903/j.efsa.2018.5088

Информация об авторах:

Елена Петровна Мирошникова, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биотехнология животного сырья и аквакультуры», Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, тел.: 8-987-862-98-86.

Мария Сергеевна Аринжанова, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, отдел кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-922-867-57-10.

Азамат Ерсайнович Аринжанов, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра «Биотехнология животного сырья и аквакультуры», Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, тел.: 8-922-806-33-43.

Сергей Александрович Мирошников, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, ректор, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, тел.: 8(3532)77-67-70.

Information about the authors:

Elena P Miroshnikova, Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-987-862-98-86.

Maria S Arinzhanova, Cand. Sci. (Biology), Junior Researcher, Department of Farm Animal Feeding and Feed Technology named after Leushin SG, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8-922-867-57-10.

Azamat E Arinzhanov, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-922-806-33-43.

Sergey A Miroshnikov, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Rector, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8(3532)77-67-70.

Статья поступила в редакцию 27.09.2024; одобрена после рецензирования 21.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 27.09.2024; approved after reviewing 21.10.2024; accepted for publication 16.12.2024.