

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И КОРМОПРОИЗВОДСТВЕ

Научная статья

УДК 636.085:577.17

doi:10.33284/2658-3135-107-1-8

Ультрадисперсные частицы  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  как эффекторы рубцового пищеварения *in vitro*

Даниил Евгеньевич Шошин<sup>1,5</sup>, Елена Анатольевна Сизова<sup>2,6</sup>, Айна Маратовна Камирова<sup>3</sup>,  
Анастасия Павловна Иванищева<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

<sup>5,6</sup>Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

<sup>1,5</sup>daniilshoshin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3086-681X>

<sup>2,6</sup>sizova.178@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

<sup>3</sup>ayna.makaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1474-8223>

<sup>4</sup>nessi255@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8264-4616>

**Аннотация.** Обозначены перспективы применения ультрадисперсных частиц (УДЧ)  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  в кормлении сельскохозяйственных животных. Проведена оценка переваримости пшеничных отрубей *in vitro*, динамики летучих жирных кислот и азота рубцовой жидкости при введении различных дозировок исследуемых веществ. Установлено, что УДЧ  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  в концентрации 0,6 и 38,6 мг/кг сухого вещества корма повышают коэффициент переваримости на 4,49 и 5,05 % ( $P \leq 0,01$ ) соответственно, одновременно стимулируя образование уксусной, пропионовой и масляной кислот, а также повышая концентрацию общего и белкового азота, при увеличении численности простейших в 1 мл рубцового содержимого.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственные животные, кормление, ультрадисперсные частицы,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ , переваримость, летучие жирные кислоты, инфузории, азот

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-26-00254.

**Для цитирования:** Ультрадисперсные частицы  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  как эффекторы рубцового пищеварения *in vitro* / Д.Е. Шошин, Е.А. Сизова, А.М. Камирова, А.П. Иванищева // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 1. С. 8-21. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-1-8>

NANOTECHNOLOGY IN ANIMAL HUSBANDRY AND FODDER PRODUCTION

Original article

Ultrafine particles of  $\text{Co}_3\text{O}_4$  and  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  as effectors of rumen digestion *in vitro*

Daniil E Shoshin<sup>1,5</sup>, Elena A Sizova<sup>2,6</sup>, Ayna M Kamirova<sup>3</sup>, Anastasia P Ivanishcheva<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

<sup>5,6</sup>Orenburg State University, Orenburg, Russia

<sup>1,5</sup>daniilshoshin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3086-681X>

<sup>2,6</sup>sizova.178@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

<sup>3</sup>ayna.makaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1474-8223>

<sup>4</sup>nessi255@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8264-4616>

**Abstract.** The prospects for the use of ultrafine particles (UFP)  $\text{Co}_3\text{O}_4$  and  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  in feeding farm animals are outlined. The digestibility of wheat bran *in vitro* and the dynamics of volatile fatty acids and nitrogen in the rumen fluid with the introduction of various dosages of the studied substances was as-

sessed. It has been established that UFP  $\text{Co}_3\text{O}_4$  and  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  at concentrations of 0.6 and 38.6 mg/kg of feed dry matter increase the digestibility coefficient by 4.49 and 5.05%, respectively ( $P \leq 0.01$ ); simultaneously stimulate the formation of acetic, propionic and butyric acids, and increase the concentration of total and protein nitrogen, with an increase in the number of protozoa in 1 ml of ruminal contents.

**Keywords:** farm animals, feeding, ultrafine particles,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ , digestibility, volatile fatty acids, ciliates, nitrogen

**Acknowledgments:** the work was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 22-26-00254.

**For citation:** Shoshin DE, Sizova EA, Kamirova AM, Ivanishcheva AP. Ultrafine particles of  $\text{Co}_3\text{O}_4$  and  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  as effectors of rumen digestion *in vitro*. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(1):8-21. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-1-8>

### Введение.

Современное животноводство, как оплот продовольственной безопасности, нуждается в постоянном повышении эффективности производства при минимальных затратах труда и средств, что может быть достигнуто, в частности, за счёт наиболее полной реализации генетического потенциала поголовья. Последнее же обеспечивается путём совершенствования рационов и создания кормовых добавок, максимально конвергентных физиологическим способностям организма, иными словами, в той степени способствующих усвояемости питательных веществ, насколько это практически возможно (Улитко В.Е., 2014). В представленном отношении особое внимание привлекают ультрадисперсные частицы (УДЧ) металлической природы – многопрофильные композиции с гетероморфным функционалом в отношении животного организма. Они позволяют не только эффективно покрыть недостаток в минеральных элементах, но также способствуют укреплению иммунитета, поддерживают антиоксидантный статус, улучшают пищеварение, в частности стимулируют деструкцию клетчатки, благотворно воздействуют на микроархитектуру кишечника, модулируют микробиом и окислительно-восстановительный гомеостаз, вкупе повышая производительность скота и птицы, а также качество получаемой от них продукции (Magrappan G et al., 2017; Michalak I et al., 2022). Иными словами, они выступают одновременно не только как дополнительный источник макро- и микроэлементов, но и как аналог антибиотических стимуляторов роста (Michalak I et al., 2022).

В частности, известно, что кобальт используется микроорганизмами рубца жвачных для синтеза корринового ядра витамина  $\text{B}_{12}$ . Последний же является коферментом для метилмалонил-КоА-мутаза и метионинсинтетазы, и необходим, соответственно, для метаболизма пропионата в сукцинат и превращения аминокислоты гомоцистеина в метионин с одновременной регенерацией тетрагидрофолата – предшественника пурина и пиримидина. Однако мобилизация кобальта микробиомом из пищевых субстратов и неорганических солей малоэффективна и составляет при благоприятных условиях около 13 % (González-Montaña JR et al., 2020). При этом Со-содержащие УДЧ, связываясь с белками внутренней физиологической среды, обретают своеобразную биоидентичность и эффективно сорбируются эпителиальной выстилкой желудочно-кишечного тракта (Carrillo-Carrion C et al., 2017). Кроме того, они обладают выраженной бактерицидной активностью в отношении модельных штаммов *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus* (Moradpoor H et al., 2019), сравнимой с действием гентамицина или окситетрациклина (Gupta V et al., 2020).

Аналогично марганец функционирует как кофактор для аргиназы, глутаминсинтетазы, пироваткарбоксилазы, Мп-супероксиддисмутаза и участвует, соответственно, в гидролизе аргинина до орнитина и мочевины, АТФ-зависимом превращении глутамата в глутамин, синтезе оксалацетата из пирувата и обезвреживании супероксидных анион-радикалов (Avila DS et al., 2013). Однако, как и в случае с кобальтом, сорбция марганца в организме жвачных крайне мала и составляет не более 1 % (Spears JW, 2019). В то же время внесение Мп-депонированных УДЧ с эксплицитными антибиотическими свойствами как против грамотрицательных и грамположительных микроорганизмов, так и в отношении грибов, например, *Trichophyton simii*, *Curvularia lunata*, *Aspergillus niger*

и *Candida albicans* (Hoseinpour V and Ghaemi N, 2018) в рацион птицы позволило значительно повысить всасываемость данного микроэлемента в подвздошной кишке (Matuszewski A et al., 2020).

Соответственно, марганец и кобальт как компоненты металлоферментов критически важны для широкого спектра обменных процессов, включая метаболизм белков, жиров, углеводов и нуклеиновых кислот, процессы роста и развития, пищеварения и детоксикации, выработки энергии и регуляции активности нейронов (González-Montaña JR et al., 2020; Avila DS et al., 2013), причём наиболее перспективной формой введения их в рацион животных выступают УДЧ, позволяющие снизить необходимые дозировки в сравнении с объёмистыми минералами и экскрецию элементов с неперевааренными остатками корма на фоне повышения биодоступности. Как следствие, сокращаются нагрузка на окружающую среду и экономические расходы (Michalak I et al., 2022).

Однако при тех же условиях, в силу своих малых размеров и вытекающей из этого высокой реакционной способности УДЧ могут быть крайне токсичны (Kumar V et al., 2017), что побуждает к детальной оценке их свойств, включая влияние на микробиом-опосредованные процессы в пищеварении, до начала физиологических опытов, то есть *in vitro*.

#### Цель исследования.

Определить потенциал УДЧ  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  как стимуляторов пищеварительных процессов на модели искусственного рубца.

#### Материалы и методы исследования.

**Объект исследования.** Рубцовая жидкость бычков казахской белоголовой породы средней массой  $266 \pm 1,53$  кг и возрастом 11-12 месяцев.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств "Об обращении с животными", ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), Руководство по работе с лабораторными животными ([http://fncbst.ru/?page\\_id=3553](http://fncbst.ru/?page_id=3553)). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

**Схема эксперимента.** Исследования выполнены в ЦКП БСТ РАН <http://цкп-бст.рф> согласно таблице 1.

Таблица 1. Схема экспериментальных работ

Table 1. Experimental scheme

Опыты / Experiments	Дозировки исследуемых УДЧ (мг/кг СВ) и содержание в них элементов-металлов / <i>Dosages of the studied UFPs (mg/kg DM) and the content of elements-metals in them</i>			
	$\text{Mn}_2\text{O}_3$	чистый Mn / <i>Pure Mn</i>	$\text{Co}_3\text{O}_4$	чистый Co / <i>Pure Co</i>
Контроль/ <i>Control</i>	-	-	-	-
I	19,3	13,4	0,3	0,2
II	38,6	26,8	0,6	0,4
III	77,2	53,7	1,2	0,9

Переваримость сухого вещества базового субстрата (пшеничные отруби) при внесении исследуемых УДЧ определяли с помощью установки инкубатора и буферного раствора по специализированной методике. Для чего у животных ( $n=3$ ), рацион которых включал сено злаковое (1 кг), сено бобовое (2 кг), силос кукурузный (9,5 кг), дроблёную зерносмесь (2 кг), жмых подсолнечный (0,1 кг), патоку кормовую (0,6 кг), соль поваренную (37 г), монокальцийфосфат (47,7 г) и премикс

(20 г) через хроническую фистулу ( $d=80$  мм, ANKOM Technology Corporation, США) отбирали пробы рубцового содержимого. Транспортировку осуществляли в течение 30 минут, поддерживая температурный режим  $+38,5...+39,5$  °С. Перед использованием рубцовую жидкость тщательно встряхивали и процеживали через 4 слоя марли. Заранее мешочки из полиамидной ткани ( $n=10$ ) взвешивали и нумеровали, в них помещали по 500 мг пшеничных отрубей и запаивали. Рубцовую жидкость, разведённую буфером в соотношении 1:4, насыщали углекислым газом и по 2 л размещали в ёмкостях искусственного рубца (ANKOM Daisy II, США), задавая программу: 48 ч при  $+39,5$  °С. По окончании инкубации образцы промывались и высушивались при температуре  $+60$  °С до константного веса. Коэффициент переваримости определяли по формуле:

$$K = \frac{(m_1 - m_2)}{500} \times 100 \%$$

где  $m_1$  – масса высушенного мешочка с кормом, после переваривания;

$m_2$  – масса мешочка без корма.

Численность простейших в рубцовой жидкости устанавливали с помощью камеры Горяева. Для этого в пробирку отбирали 5 мл профильтрованного содержимого рубца и добавляли 0,1 мл 4 % раствора формалина для фиксации инфузорий и 20 мкл метиленового синего. Встряхивали 1-2 мин. В камеру с сеткой Горяева под покровное стекло вносили 1 каплю жидкости и подсчитывали количество инфузорий в 225 больших квадратах, после чего определяли число простейших в 1 мл рубцового содержимого по формуле:

$$N = \frac{1000 \times n \times b}{S \times h} = \frac{1000 \times n \times 5}{225 \times 0,04 \times 0,1} = \frac{1}{9} n \times 50000,$$

где  $n$  – количество клеток, подсчитанных в определенном секторе;

$b$  – кратность разведения пробы;

$S$  – площадь исследуемого сектора;

$h$  – глубина счётной камеры.

Общую микробальную массу определяли путём центрифугирования и трёх- пятикратной отмывки при 10000 g в течение 15 мин (центрифуга «Mini», GYROZEN Co., Ltd., Южная Корея).

Уровень летучих жирных кислот (ЛЖК) в содержимом рубца устанавливали методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектированием на хроматографе газовом «Кристаллюкс-4000М (СКБ Хроматек, Россия), формы азота – по ГОСТ 26180-84, ГОСТ 13496.4-2019.

**Оборудование и технические средства.** Исследования выполнены в ЦКП БСТ РАН (<http://цкп-бст.рф>). Установка-инкубатор «ANKOM Daisy II» (Ankom Technology, США), стерилизатор воздушный ГП-80 СПУ (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия), хроматограф газовый «Кристаллюкс-4000М (СКБ Хроматек, Россия), центрифуга «Mini» (GYROZEN Co., Ltd., Южная Корея), камера Горяева (ООО «МиниМед», Россия).

**Статистическая обработка.** Экспериментальные данные обрабатывали с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением «Excel 2016» («Microsoft», США) с обработкой данных в «Statistica 12» («Stat Soft Inc.», США). Рассчитывали среднее ( $M$ ), среднеквадратичное отклонение ( $\pm\sigma$ ), стандартную ошибку ( $\pm SE$ ). Для сравнения вариантов использовали непараметрический метод анализа. Различия считали статистически значимыми при \* –  $P \leq 0,05$ , \*\* –  $P \leq 0,01$ .

### Результаты исследований.

УДЧ  $Co_3O_4$  и  $Mn_2O_3$  в зависимости от концентраций оказали различное влияние на переваримость базового субстрата (табл. 2). Так, минимальные дозировки способствовали незначительному повышению коэффициента переваримости сухого вещества корма *in vitro*, в то время как промежуточные достоверно увеличивали его на 4,49 и 5,05 % ( $P \leq 0,01$ ) соответственно. Одновременно заметно возрастало количество инфузорий, однако общая микробальная масса менялась в малом диапазоне, хотя и имела тенденцию к росту. Напротив, повышенные дозы УДЧ угнетали пищеварительные процессы и микробиом.

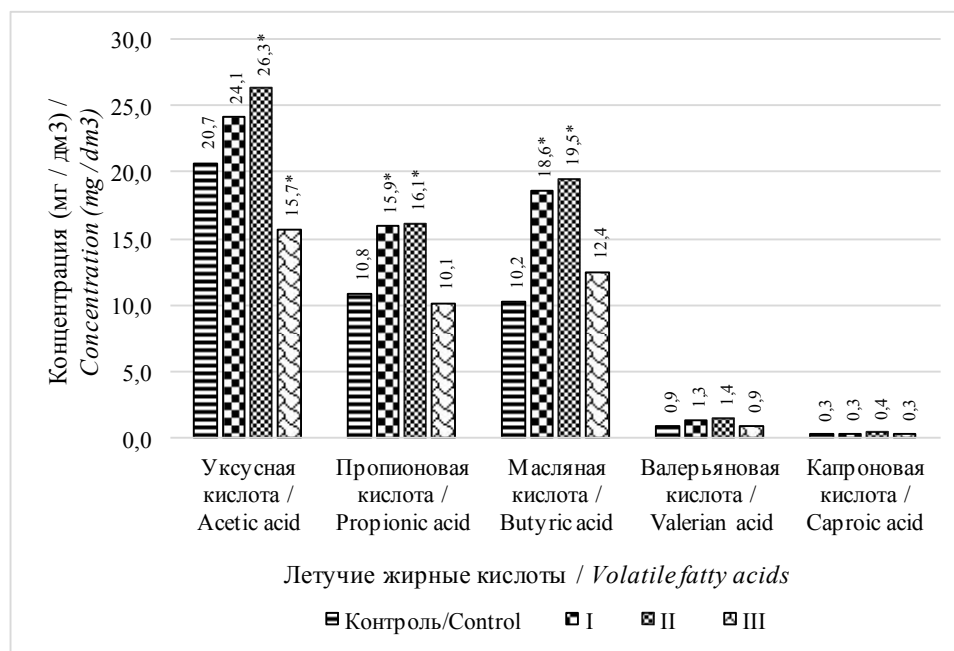
Таблица 2. Коэффициент переваримости, количество инфузорий и микробная масса  
Table 2. Digestibility coefficient, number of infusoria and microbial mass

Группа / Group	Концентрация, мг/кг СВ / Concentration, mg/kg DM	Коэффициент переваримости / Digestibility coef- ficient	Количество инфузорий в 1 мл рубцовой жид- кости (тыс. шт.) / The number of infusoria in 1 ml of ruminal fluid (thousand pcs.)	Микробная масса, (мг/мл) / Microbial mass, (mg/ml)
Контроль / Control		63,77±0,92	666,7±44,4	70,8±3,5
УДЧ Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> UFP	19,3	64,12±0,92	788,9±33,3	72,1±5,8
	38,6	68,26±0,84**	1022,2±44,4*	74,4±5,1
	77,2	59,83±0,96*	402,8±11,1*	67,1±4
УДЧ Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> / Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> UFP	0,3	65,21±0,97	708,3±19,4	68,2±5,5
	0,6	68,82±0,95**	894,4±38,9*	66,4±4,6
	1,2	61,3±1,11	405,6±22,2*	69,3±4,2

Примечание: \* – P≤0,05; \*\* – P≤0,01 при сравнении с контролем

Note: \* – P≤0.05; \*\* – P≤0.01 when compared with the control

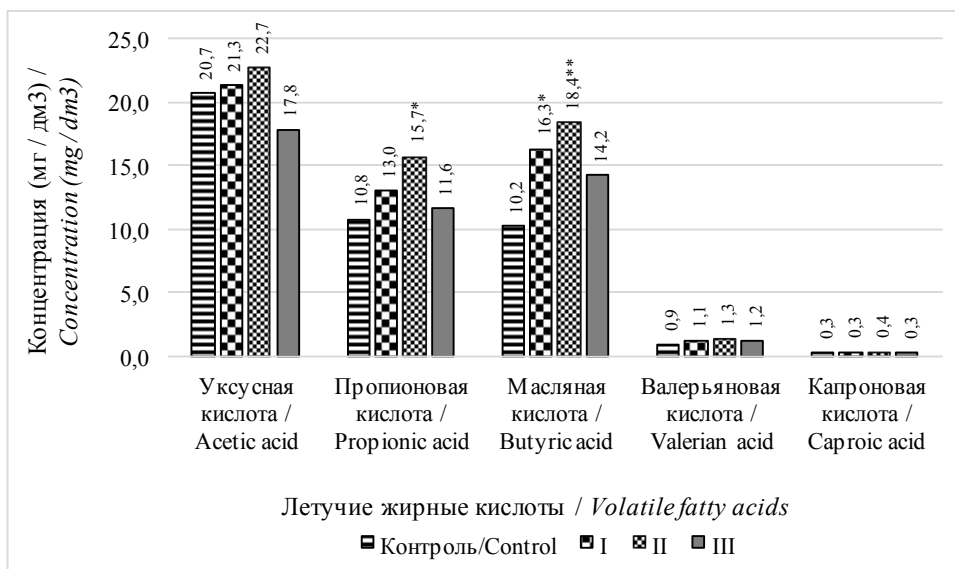
В свою очередь концентрация уксусной кислоты достоверно увеличивалась (P≤0,05) на 5,6 % во II опыте с УДЧ Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 1), но фактически не менялась в аналогичном случае с УДЧ Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (рис. 2).



Примечание: \* – P≤0,05; \*\* – P≤0,01 при сравнении с контролем

Note: \* – P≤0.05; \*\* – P≤0.01 when compared with the control

Рисунок 1. Концентрация летучих жирных кислот рубцовой жидкости после инкубирования с УДЧ Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, мг/%Figure 1. Concentration of volatile fatty acids in rumen fluid after incubation with UFP Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mg/%

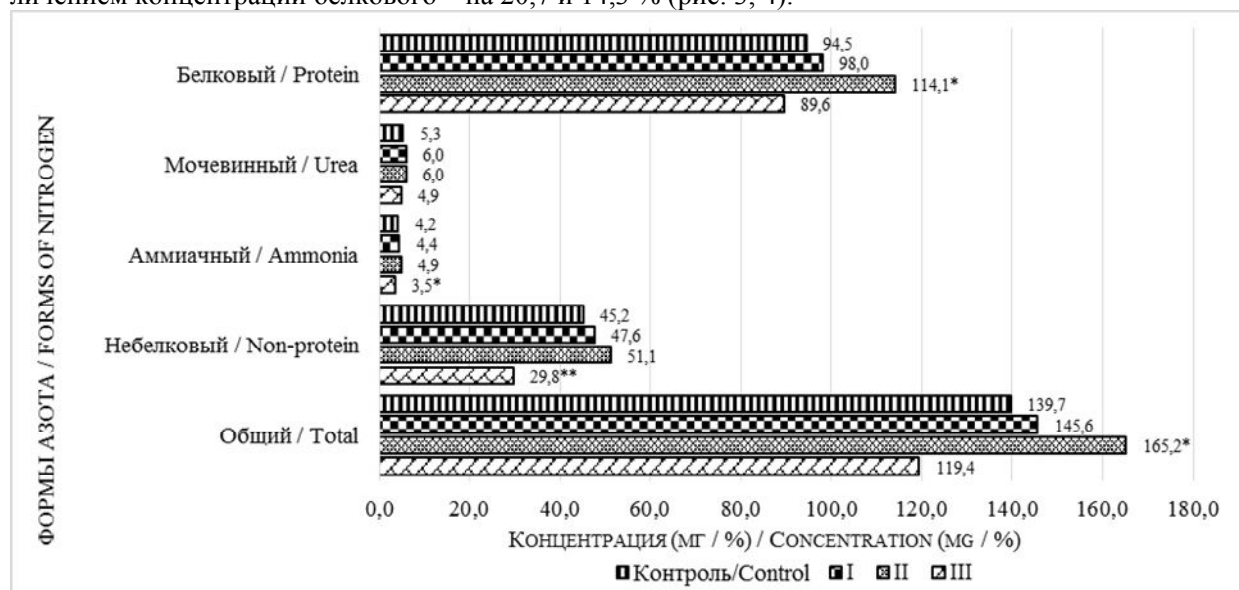


Примечание: \* – P<0,05; \*\* – P<0,01 при сравнении с контролем  
Note: \* – P<0.05; \*\* – P<0.01 when compared with the control

Рисунок 2. Концентрация летучих жирных кислот рубцовой жидкости после инкубирования с УДЧ Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, мг/%  
Figure 2. Concentration of volatile fatty acids in rumen fluid after incubation with UFP Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, mg/%

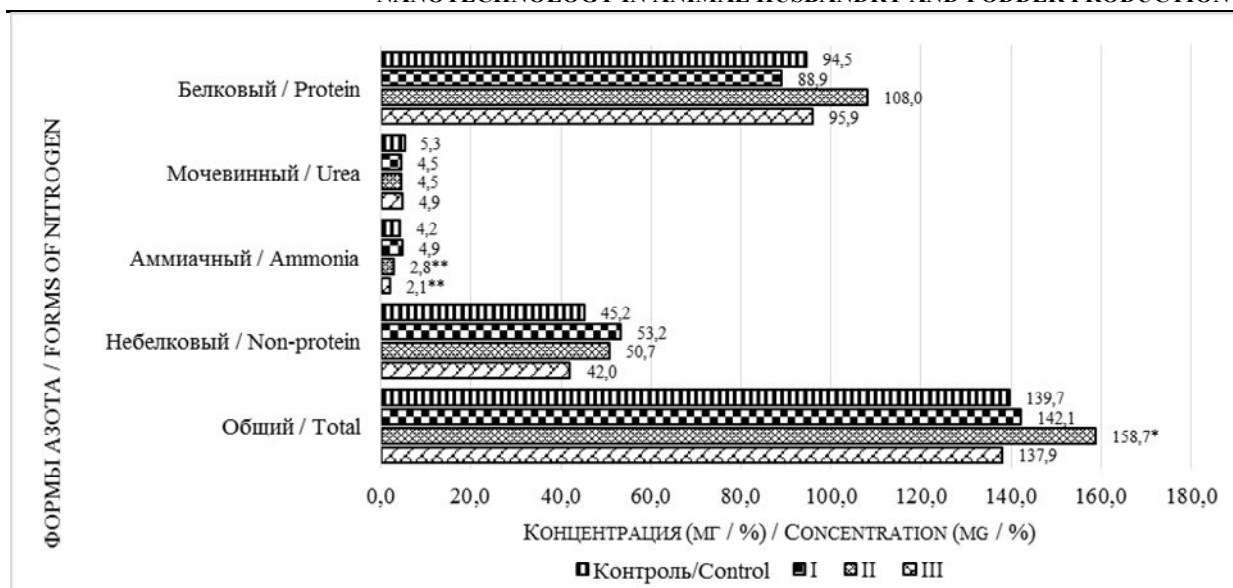
Тем не менее, количество пропионовой и масляной кислот существенно увеличивалось в обоих экспериментах. Аналогично с коэффициентом переваримости уровень ацетата и пропионата снижался при высоких дозах УДЧ. В противоположность этому количество бутирата несколько повышалось. В то же время в опытных группах по сравнению с контролем снижалось соотношение ацетат-пропионат в диапазоне 14,5-24,6 %. При этом УДЧ не оказали существенного влияния на величину водородного показателя, уровень рН в контроле и опытных образцах был в пределах нормы и составлял 6,4-6,8.

Аналогично, как в случае с УДЧ Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, так и с УДЧ Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в опыте II в рубцовой жидкости повышалось содержание общего азота на 18,3 и 13,6 % (P<0,05) соответственно параллельно с увеличением концентрации белкового – на 20,7 и 14,3 % (рис. 3, 4).



Примечание: \* – P<0,05; \*\* – P<0,01 при сравнении с контролем  
Note: \* – P<0.05; \*\* – P<0.01 when compared with the control

Рисунок 3. Концентрация азота рубцовой жидкости после инкубирования с УДЧ Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, мг/%  
Figure 3. Nitrogen concentration in rumen fluid after incubation with UFP Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mg/%



Примечание: \* –  $P \leq 0,05$ ; \*\* –  $P \leq 0,01$  при сравнении с контролем

Note: \* –  $P \leq 0.05$ ; \*\* –  $P \leq 0.01$  when compared with the control

Рисунок 4. Концентрация азота рубцовой жидкости после инкубирования с УДЧ  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , мг/%  
Figure 4. Nitrogen concentration in ruminal fluid after incubation with UFP  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , mg/%

При этом количество небелкового азота, включая аммиачный и мочевиный, в I и II опытах достоверно не менялось, но снижалось при высоких дозах (III опыт).

Таким образом, установлено позитивное влияние УДЧ  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  и  $\text{Co}_3\text{O}_4$  в дозах 38,6 и 0,6 мг/кг СВ корма на коэффициент переваримости, микробную биомассу и ферментативные процессы в рубце, выражающиеся в увеличении уровня ЛЖК, а также концентрации общего и белкового азота.

#### Обсуждение полученных результатов.

Изменение динамики пищеварительных процессов в рубце *in vitro* при добавлении макро- и микроэлементов в различных формах, включая УДЧ, может быть обусловлено двумя взаимодополняющими механизмами, уже упоминаемыми ранее, а именно инкорпорацией в физиологические процессы ионов металлов и их антибиотическим действием в отношении ряда условно патогенных и некоторых иных комменсальных форм (Moradpoor H et al., 2019; Gupta V et al., 2020; Hoseinpour V and Ghaemi N, 2018).

Последнее же, учитывая сложность и многообразие внутрисистемных взаимодействий микробиоты, среди которых интеграция между:

- 1) фибролитическими и протеолитическими бактериями (отвечает за устранение продуктов распада белка – жирных кислот с разветвлённой цепью и аммиака);
- 2) сукцинатпродуцирующими и утилизирующими прокариотами (определяет превращение уксусной кислоты в пропионовую);
- 3) лактатвырабатывающими и расщепляющими его микроорганизмами (*Megasphaera elsdenii* и *Selenomonas ruminantium* превращают молочную кислоту в ацетат, пропионат и бутират);
- 4) межвидовой перенос водорода (повышение концентрации ацетата и АТФ при одновременном снижении количества восстановленных продуктов ферментации, таких как лактат, этанол, сукцинат и пропионат).

Вкупе всё вышеперечисленное непосредственно сказывается на общетаксономическом профиле и суммарном метаболическом эффекте (Nagaraja TG, 2016).

Так, в частности, при скармливании бычкам казахской белоголовой породы  $\text{CoCl}_2$  в количестве 39 мг/гол. в рубцовом содержимом наблюдалось смещение в сторону грамотрицательных бактерий при уменьшении доли грамположительных, соответственно, увеличилось число представителей типов *Verrucomicrobia* и *Bacteroidetes* (Ryazanov V et al., 2023). В то же время общее число видов уменьшилось относительно контрольной группы на 2,4 %, индекс Симпсона был ниже на 50 %, что свидетельствует о более равномерном распределении прокариот в сообществе. Всё это, в сущности, позволяет говорить о возможностях модуляции целлюлозолитической, амилолитической, сахаролитической, липолитической, протеолитической и фибролитической активности рубцового содержимого (Nagaaja TG, 2016; Мирошникова М.С., 2020; Колоскова Е.М. и др., 2020).

В то же время установлено, что повышение концентрации кобальта в среде пропионово-кислых бактерий *Propionibacterium freudenreichii* стимулирует синтез и накопление корриноидов (Каменская Ю.В., 2019). Они же интенсифицируют размножение инфузорий (Bonhomme A et al., 1982), в частности растительоядных представителей родов *Entodinium* и *Diplodinium* (*Entodinium nanellum*, *Entodinium ovinum*, *Diplodinium bubalidis ssp. bubalidis*), обладающих целлюлозолитической активностью, а также отдельных видов, расщепляющих крахмал с образованием уксусной, пропионовой и масляной кислот – *Entodinium ecaudatum*, *Isotricha intestinalis*, *Dasytricha ruminantium*, *Entodinium simulans – dubardi*, *Ophryoscolex caudatus*, что соответствует описанной ранее динамике концентрации ЛЖК, общего и белкового азота. Более того, большая часть эндобионтных реснитчатых, и в особенности некоторые хищные особи (*Entodinium bursa*), активно поедают бактерии, сдерживая тем самым их массовое размножение (Черная Л.В., 2016).

Что же касательно марганца, то он особенно необходим представителям родов *Lactiplantibacillus* и *Lacticaseibacillus*, а также, в меньшей степени, *Bacillus subtilis* и другим *Bacillota* (*Firmicutes*) для нейтрализации АФК, регуляции процессов роста и развития (Bosma EF et al., 2021). В свою очередь молочнокислые бактерии и сенная палочка, вырабатывающие антимикробные пептиды – бактериоцины, обладают выраженными пробиотическими характеристиками: модулируют микробиом, способствуют переваримости клетчатки, снижают выбросы метана, риск ацидоза и аллергических реакций, выделение *Escherichia coli* с калом, повышают концентрацию ЛЖК и продуктивность жвачных животных (Bidarkar VK et al., 2014; Chang M et al., 2021; Doyle N et al., 2019). Путём конкурентного исключения в процессе симбиоза они формируют пищевой иммунитет хозяина, так как марганец также связан с вирулентностью некоторых прокариот (Bosma EF et al., 2021). При этом добавки сульфата и хелата марганца с базальным содержанием микроэлемента 150 мг/кг сухого вещества корма в рационе ягнят способствовали переваримости питательных веществ и увеличивали биомассу протозойной и бактериальной фракции рубцового содержимого (Gresakova L et al., 2018). Аналогично  $\text{Mn}$ -метионин,  $\text{MnSO}_4$  и  $\text{MnCl}_2$  повышали концентрацию ЛЖК, в частности ацетата и пропионата, аммиачного азота, усвояемость сухого вещества, активность амилазы, трипсина, целлюлазы и липазы, а также содержание микробного белка у яков (Lu H et al., 2023).

При этом, однако, полученные ранее результаты по применению неорганических солей марганца и кобальта требуют, как правило, больших дозировок либо же демонстрируют меньшую эффективность. Так, например,  $\text{CoCl}_2$  в дозе 1,5 мг/кг сухого вещества способствовал повышению коэффициента переваримости на 1,5 % (против полученных в представленной работе 4,49 %), а  $\text{MnSO}_4$  уступал по данному показателю *in situ* химически чистому марганцу в наноформе (разница составила 4,2 %) (Шейда Е.В. и др., 2022; Дускаев Г.К. и др., 2016).

Эффективность модели «искусственного рубца» доказана в исследованиях, посвящённых изучению биологических свойств УДЧ железа, оксидов хрома и кремния (Лебедев С.В. и др., 2023; Шейда Е.В. и Лебедев С.В., 2023; Камирова А.М. и Сизова Е.А., 2023).

Иными словами, УДЧ эссенциальных элементов обладают большим потенциалом в животноводстве как эффекторы рубцового пищеварения, нежели неорганические соли. Однако следует отметить, что суммарный эффект от их внедрения определяется не только дозировками и физико-химическими характеристиками, но и комплексными взаимодействиями с другими компонентами



премиксов и кормовым субстратом (Ильичев Е. и др., 2011; Нуржанов Б.С., 2020), что обуславливает актуальность дальнейших исследований механизмов метаболических инклюзий УДЧ.

#### Заключение.

УДЧ  $Mn_2O_3$ , и  $Co_3O_4$  в дозировках 38,6 и 0,6 мг/кг сухого вещества корма способствуют переваримости пшеничных отрубей *in vitro*, одновременно увеличивая концентрацию летучих жирных кислот (уксусной, пропионовой и масляной), общего и белкового азота в рубцовом содержимом, на фоне увеличения численности простейших и общей микробиальной массы.

#### Список источников

1. Влияние *Cucurbita esemenisoleum* обогащенной высокодисперсными частицами марганца на переваримость сухого вещества и микробиологические процессы в рубце животных / Б.С. Нуржанов, Ю.И. Левахин, Г.К. Дускаев, С.С. Жаймышева // Вестник Курганской ГСХА. 2020. № 4(36). С. 34-37. [Nurzhanov BS, Levakhin YuI, Duskaev GK, Zhaimysheva SS. *Cucurbita esemenisoleum* enriched effect with highly dispersion particles of manganese on the digestibility of dry substance and microbiological processes in animal rumen. Vestnik Kurganskoj GSHA. 2020;4(36):34-37. (In Russ.)].
2. ГОСТ 13496.4-2019. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина. Введ. 01.08.2020. М.: Стандартинформ, 2019. 15 с. [GOST 13496.4-2019. Fodder, mixed fodder and raw mixed fodder. Methods of nitrogen and crude protein determination. Introduced 01.08.2020. Moscow: Standartinform; 2019:15 p. (In Russ.)].
3. ГОСТ 26180-84. Методы определения аммиачного азота и активной кислотности (рН). Введ. 01.07.1985. М.: Государственный комитет по стандартам, 1984. 6 с. [GOST 26180-84 Fodder. Determination of ammonia nitrogen content and actual acidity. Introduced 01.07.1985. Moscow: Gosudarstvennyi komitet po standartam; 1984:6 p. (In Russ.)].
4. Исследование микробиома рубца у овец с использованием молекулярно-генетических методов (обзор) / Е.М. Колоскова и др. // Проблемы биологии продуктивных животных. 2020. № 4. С. 5-26. [Koloskova EM et al. Studies of the sheep rumen microbiome using molecular genetic methods: a review. Problems of Productive Animal Biology. 2020;4:5-26. (In Russ.)]. doi: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.4.5-26
5. Каменская Ю.В. Влияние солей кобальта на биосинтез витамина В12 пропионовокислыми бактериями // Наука, техника и образование. 2019. № 6(59). С. 13-15. [Kamenskaya YuV. Effect of cobalt salts on vitamin B12 biosynthesis by propionic acid bacteria. Science, Technology and Education. 2019;6(59):13-15. (In Russ.)].
6. Камирова А.М., Сизова Е.А. Комплексная оценка влияния минеральных веществ в ультрадисперсной форме на рубцовое пищеварение // Пермский аграрный вестник. 2023. № 1(41). С. 88-98. [Kamirova AM, Sizova EA. Comprehensive assessment of the influence of minerals in the ultradispersed form on rumen digestion. Perm Agrarian Journal. 2023;1(41):88-98. (In Russ.)]. doi: 10.47737/2307-2873\_2023\_41\_88
7. Мирошникова М.С. Основные представители микробиома рубца (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 4. С. 174-185. [Miroshnikova MS. The main representatives of the rumen microbiome (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(4):174-185. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-103-4-174
8. Переваримость рациона и баланс питательных веществ при скармливании телятам нанопорошков кобальта и меди / Е. Ильичев, А. Назарова, С. Полищук, В. Иноземцев // Молочное и мясное скотоводство. 2011. № 5. С. 27-29. [Il'ichev E, Nazarova A, Polishchuk S, Inozemtsev V. Diet digestibility and nutrient balance with the addition of cobalt and copper nanopowders to the calves' rations. Journal of Dairy and Beef Cattle Breeding. 2011;5:27-29. (In Russ.)].
9. Результаты исследований по переваримости *in vitro* и *in situ* создаваемых кормовых добавок / Г.К. Дускаев и др. // Вестник мясного скотоводства. 2016. № 4(96). С. 126-131.

[Duskaev GK et al. Results of researches on digestibility *in vitro* and *in situ* of developed feed additives. Herald of Beef Cattle Breeding. 2016; 4(96):126-131. (In Russ.)].

10. Способ кормления молодняка крупного рогатого скота для повышения ферментативных процессов в его рубце: пат. 2784969 С1 Рос. Федерация / Е.В. Шейда, В.А. Рязанов, Ш.Г. Рахматуллин, Г.К. Дускаев, С.В. Лебедев. Заявл. 14.03.2022; опубл. 01.12.2022, Бюл. № 34. [Sheida EV, Riazanov V, Rakhmatullin ShG, Duskaev GK, Lebedev SV. Method for feeding young cattle to increase enzymatic processes in its rumen: pat. 2784969 C1 Ros. Federatsiya. Zayavl. 14.03.2022; opubl. 01.12.2022, Byul. № 34. (In Russ.)].

11. Сравнительный анализ влияния различных форм железа на течение метаболических процессов в рубце методом «*in vitro*» / С.В. Лебедев, Е.В. Шейда, О.В. Шошина, В.И. Корнейченко // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 1. С. 192-202. [Lebedev SV, Sheida EV, Shoshina OV, Korneichenko VI. Comparative analysis of the effect of various forms of iron on the course of metabolic processes in rumen using “*in vitro*” method. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(1):192-202. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-1-192

12. Улитко В.Е. Инновационные подходы в решении проблемных вопросов в кормлении сельскохозяйственных животных // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 4(28). С. 136-147. [Ulitzko VE. Innovative aspects and issues of feeding farm animals. Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2014;4(28):136-147. (In Russ.)].

13. Черная Л.В. Особенности жизнедеятельности эндобионтных инфузорий в желудке овец // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 3-3. С. 402-404. [Chernaya LV. Features of vital activity of endobiontnyh ciliates in the stomach sheep. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2016;3(3):402-404. (In Russ.)].

14. Шейда Е.В., Лебедев С.В. Влияние УДЧ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на процессы ферментации в рубце жвачных животных в опытах *in vitro* // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 3. С. 8-20. [Sheida EV, Lebedev SV. Influence of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> UFP on fermentation processes in rumen of ruminants in *in vitro* experiments. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(3):8-20. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-3-8

15. Avila DS, Puntel RL, Aschner M. Manganese in health and disease. In: Sigel A, Sigel H, Sigel R, editors. Interrelations between essential metal ions and human diseases. Dordrecht: Springer. 2013;13:199-227. doi: 10.1007/978-94-007-7500-8\_7

16. Bidarkar VK, Swain PS, Ray S, Dominic G. Probiotics: Potential alternative to antibiotics in ruminant feeding. Trends in Veterinary and Animal Sciences. 2014;1(1):1-4.

17. Bonhomme A, Durand M, Quintana C, Halpern S. Influence du cobalt et de la vitamine B12 sur la croissance et la survie des ciliés du rumen *in vitro*, en fonction de la population bactérienne. Reproduction Nutrition Développement. 1982;22(1A): 107-122.

18. Bosma EF, Rau MH, van Gijtenbeek LA, Siedler S. Regulation and distinct physiological roles of manganese in bacteria. FEMS Microbiology Reviews. 2021;45(6):fuab028. doi: 10.1093/femsre/fuab028

19. Carrillo-Carrion C, Carril M, Parak WJ. Techniques for the experimental investigation of the protein corona. Current Opinion in Biotechnology. 2017;46:106-113. doi: 10.1016/j.copbio.2017.02.009

20. Chang M, Ma F, Wei J, Liu J, Nan X, Sun P. Live Bacillus subtilis natto promotes rumen fermentation by modulating rumen microbiota *in vitro*. Animals. 2021;11(6):1519. doi: 10.3390/ani11061519

21. Doyle N, Mbandlwa P, Kelly WJ, Attwood G, Li Y, Ross RP, Leahy S. Use of lactic acid bacteria to reduce methane production in ruminants, a critical review. Frontiers in Microbiology. 2019;10:2207. doi: 10.3389/fmicb.2019.02207

22. González-Montaña JR, Escalera-Valente F, Alonso AJ, Lomillos JM, Robles R, Alonso ME. Relationship between vitamin B12 and cobalt metabolism in domestic ruminant: an update. Animals. 2020;10(10):1855. doi: 10.3390/ani10101855

23. Gresakova L, Venglovska K, Cobanova K. Nutrient digestibility in lambs supplemented with different dietary manganese sources. *Livestock Science*. 2018;214:282-287. doi: 10.1016/j.livsci.2018.07.001
24. Gupta V, Kant V, Sharma AK, Sharma M. Comparative assessment of antibacterial efficacy for cobalt nanoparticles, bulk cobalt and standard antibiotics: a concentration dependant study. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2020;11(1):78-85. doi: 10.17586/2220-8054-2020-11-1-78-85
25. Hoseinpour V, Ghaemi N. Green synthesis of manganese nanoparticles: Applications and future perspective – A review. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2018;189:234-243. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2018.10.022
26. Kumar V, Sharma N, Maitra SS. *In vitro* and *in vivo* toxicity assessment of nanoparticles. *International Nano Letters*. 2017;7(4):243-256. doi: 10.1007/s40089-017-0221-3
27. Lu H, Liu P, Liu S, Zhao X, Bai B, Cheng J, Xue Y, et al. Effects of sources and levels of dietary supplementary manganese on growing yak's *in vitro* rumen fermentation. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023;10:1175894. doi: 10.3389/fvets.2023.1175894
28. Marappan G, Beulah P, Kumar RD, Muthuvel S, Govindasamy P. Role of nanoparticles in animal and poultry nutrition: modes of action and applications in formulating feed additives and food processing. *International Journal of Pharmacology*. 2017;13(7):724-731. doi: 10.3923/ijp.2017.724.731
29. Matuszewski A, Łukasiewicz M, Łozicki A, Niemiec J, Zielińska-Górska M, Scott A, Sawosz E. The effect of manganese oxide nanoparticles on chicken growth and manganese content in excreta. *Animal Feed Science and Technology*. 2020;268:114597. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2020.114597
30. Michalak I, Dziergowska K, Alagawany M, Farag MR, El-Shall NA, Tuli HS, Dhama K, et al. The effect of metal-containing nanoparticles on the health, performance and production of livestock animals and poultry. *Veterinary Quarterly*. 2022;42(1):68-94. doi: 10.1080/01652176.2022.2073399
31. Moradpoor H, Safaei M, Rezaei F, Golshah A, Jamshidy L, Hatam R, Abdullah RS. Optimisation of cobalt oxide nanoparticles synthesis as bactericidal agents. *Open access Macedonian Journal of Medical Sciences*. 2019; 7(17):2757-2762. doi: 10.3889/oamjms.2019.747
32. Nagaraja TG. Microbiology of the rumen. In: Millen D, De Beni Arrigoni M, Lauritano Pacheco R, editos. *Rumenology*. Cham: Springer; 2016:39-61. doi: 10.1007/978-3-319-30533-2\_2
33. Ryazanov V, Tarasova E, Duskaev G, Kolpakov V, Miroshnikov I. Changes in the concentration of amino acids and bacterial community in the rumen when feeding *Artemisia absinthium* and cobalt chloride. *Fermentation*. 2023;9(8):751. doi: 10.3390/fermentation9080751
34. Spears JW. Boron, chromium, manganese, and nickel in agricultural animal production. *Biological Trace Element Research*. 2019;188(1):35-44. doi: 10.1007/s12011-018-1529-1

## References

1. Nurzhanov BS, Levakhin YuI, Duskaev GK, Zhaimysheva SS. *Cucurbita esemenisoleum* enriched effect with highly dispersion particles of manganese on the digestibility of dry substance and microbiological processes in animal rumen. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2020;4(36):34-37.
2. State Standard 13496.4-2019. Fodder, mixed fodder and raw mixed fodder. Methods of nitrogen and crude protein determination. Introduced 01.08.2020. Moscow: Standartinform; 2019:15 p.
3. State Standard 26180-84. Determination of ammonia nitrogen content and actual acidity. Introduced 01.07.1985. Moscow: State Committee of Standards; 1984:6 p.
4. Koloskova EM et al. Studies of the sheep rumen microbiome using molecular genetic methods: a review. *Problems of Productive Animal Biology*. 2020;4:5-26. doi: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.4.5-26
5. Kamenskaya YuV. Effect of cobalt salts on vitamin B12 biosynthesis by propionic acid bacteria. *Science, Technology and Education*. 2019;6(59):13-15.

6. Kamirova AM, Sizova EA. Comprehensive assessment of the influence of minerals in the ultradispersed form on rumen digestion. Perm Agrarian Journal. 2023;1(41):88-98. doi: 10.47737/2307-2873\_2023\_41\_88
7. Miroshnikova MS. The main representatives of the rumen microbiome (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(4):174-185. doi: 10.33284/2658-3135-103-4-174
8. Il'ichev E, Nazarova A, Polishchuk S, Inozemtsev V. Diet digestibility and nutrient balance with the addition of cobalt and copper nanopowders to the calves' rations. Journal of Dairy and Beef Cattle Breeding. 2011;5:27-29.
9. Duskaev GK et al. Results of researches on digestibility *in vitro* and *in situ* of developed feed additives. Herald of beef cattle breeding. 2016;4(96):126-131.
10. Sheida EV, Riazanov V, Rakhmatullin ShG, Duskaev GK, Lebedev SV. Method for feeding young cattle to increase enzymatic processes in its rumen: pat. 2784969 C1 Russian Federation. Application 14.03.2022; Date of publication. 01.12.2022, Byul. № 34.
11. Lebedev SV, Sheida EV, Shoshina OV, Korneichenko VI. Comparative analysis of the effect of various forms of iron on the course of metabolic processes in rumen using "*in vitro*" method. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(1):192-202. doi: 10.33284/2658-3135-106-1-192
12. Ulitko VE. Innovative aspects and issues of feeding farm animals. Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2014;4(28):136-147
13. Chernaya LV. Features of the life activity of endobiont ciliates in the stomach of sheep. International Journal of Applied and Fundamental Research. 2016;3(3):402-404.
14. Sheida EV, Lebedev SV. Influence of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> UFP on fermentation processes in rumen of ruminants in *in vitro* experiments. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(3):8-20. doi: 10.33284/2658-3135-106-3-8
15. Avila DS, Puntel RL, Aschner M. Manganese in health and disease. In: Sigel A, Sigel H, Sigel R, editors. Interrelations between essential metal ions and human diseases. Dordrecht: Springer. 2013;13:199-227. doi: 10.1007/978-94-007-7500-8\_7
16. Bidarkar VK, Swain PS, Ray S, Dominic G. Probiotics: Potential alternative to antibiotics in ruminant feeding. Trends in Veterinary and Animal Sciences. 2014;1(1):1-4.
17. Bonhomme A, Durand M, Quintana C, Halpern S. Influence du cobalt et de la vitamine B12 sur la croissance et la survie des ciliés du rumen *in vitro*, en fonction de la population bactérienne. Reproduction Nutrition Développement. 1982;22(1A): 107-122.
18. Bosma EF, Rau MH, van Gijtenbeek LA, Siedler S. Regulation and distinct physiological roles of manganese in bacteria. FEMS Microbiology Reviews. 2021;45(6):fuab028. doi: 10.1093/femsre/fuab028
19. Carrillo-Carrion C, Carril M, Parak WJ. Techniques for the experimental investigation of the protein corona. Current Opinion in Biotechnology. 2017; 46:106-113. doi: 10.1016/j.copbio.2017.02.009
20. Chang M, Ma F, Wei J, Liu J, Nan X, Sun P. Live Bacillus subtilis natto promotes rumen fermentation by modulating rumen microbiota *in vitro*. Animals. 2021;11(6):1519. doi: 10.3390/ani11061519
21. Doyle N, Mbandlwa P, Kelly WJ, Attwood G, Li Y, Ross RP, Leahy S. Use of lactic acid bacteria to reduce methane production in ruminants, a critical review. Frontiers in Microbiology. 2019;10:2207. doi: 10.3389/fmicb.2019.02207
22. González-Montaña JR, Escalera-Valente F, Alonso AJ, Lomillos JM, Robles R, Alonso ME. Relationship between vitamin B12 and cobalt metabolism in domestic ruminant: an update. Animals. 2020;10(10):1855. doi: 10.3390/ani10101855
23. Gresakova L, Venglovska K, Cobanova K. Nutrient digestibility in lambs supplemented with different dietary manganese sources. Livestock Science. 2018;214:282-287. doi: 10.1016/j.livsci.2018.07.001

24. Gupta V, Kant V, Sharma AK, Sharma M. Comparative assessment of antibacterial efficacy for cobalt nanoparticles, bulk cobalt and standard antibiotics: a concentration dependant study. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2020;11(1):78-85. doi: 10.17586/2220-8054-2020-11-1-78-85
25. Hoseinpour V, Ghaemi N. Green synthesis of manganese nanoparticles: Applications and future perspective – A review. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2018;189:234-243. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2018.10.022
26. Kumar V, Sharma N, Maitra SS. *In vitro* and *in vivo* toxicity assessment of nanoparticles. *International Nano Letters*. 2017;7(4):243-256. doi: 10.1007/s40089-017-0221-3
27. Lu H, Liu P, Liu S, Zhao X, Bai B, Cheng J, Xue Y, et al. Effects of sources and levels of dietary supplementary manganese on growing yak's *in vitro* rumen fermentation. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023;10:1175894. doi: 10.3389/fvets.2023.1175894
28. Marappan G, Beulah P, Kumar RD, Muthuvel S, Govindasamy P. Role of nanoparticles in animal and poultry nutrition: modes of action and applications in formulating feed additives and food processing. *International Journal of Pharmacology*. 2017;13(7):724-731. doi: 10.3923/ijp.2017.724.731
29. Matuszewski A, Łukasiewicz M, Łozicki A, Niemiec J, Zielińska-Górska M, Scott A, Sawosz E. The effect of manganese oxide nanoparticles on chicken growth and manganese content in excreta. *Animal Feed Science and Technology*. 2020;268:114597. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2020.114597
30. Michalak I, Dziergowska K, Alagawany M, Farag MR, El-Shall NA, Tuli HS, Dhama K, et al. The effect of metal-containing nanoparticles on the health, performance and production of livestock animals and poultry. *Veterinary Quarterly*. 2022;42(1):68-94. doi: 10.1080/01652176.2022.2073399
31. Moradpoor H, Safaei M, Rezaei F, Golshah A, Jamshidy L, Hatam R, Abdullah RS. Optimisation of cobalt oxide nanoparticles synthesis as bactericidal agents. *Open access Macedonian Journal of Medical Sciences*. 2019; 7(17):2757-2762. doi: 10.3889/oamjms.2019.747
32. Nagaraja TG. Microbiology of the rumen. In: Millen D, De Beni Arrigoni M, Lauritano Pacheco R, editos. *Rumenology*. Cham: Springer; 2016:39-61. doi: 10.1007/978-3-319-30533-2\_2
33. Ryazanov V, Tarasova E, Duskaev G, Kolpakov V, Miroschnikov I. Changes in the concentration of amino acids and bacterial community in the rumen when feeding *Artemisia absinthium* and cobalt chloride. *Fermentation*. 2023;9(8):751. doi: 10.3390/fermentation9080751
34. Spears JW. Boron, chromium, manganese, and nickel in agricultural animal production. *Biological Trace Element Research*. 2019;188(1):35-44. doi: 10.1007/s12011-018-1529-1

#### **Информация об авторах:**

**Даниил Евгеньевич Шошин**, аспирант, лаборант-исследователь центра «Нанотехнологии в сельском хозяйстве», Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29; ассистент научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии», Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, тел.: 8-965-932-53-67.

**Елена Анатольевна Сизова**, доктор биологических наук, руководитель центра «Нанотехнологии в сельском хозяйстве», Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29; профессор научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии», Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, тел.: 8-912-344-99-07.

**Айна Маратовна Камирова**, кандидат биологических наук, научный сотрудник центра «Нанотехнологии в сельском хозяйстве», Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29, тел.: 8-922-548-44-89.

**Анастасия Павловна Иванищева**, младший научный сотрудник Испытательного центра ЦКП, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29, тел.: 8-987-843-58-22.

**Information about the authors:**

**Danil E Shoshin**, Postgraduate student, Laboratory Researcher of the Centre for Nanotechnologies in Agriculture, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000; Assistant at the Scientific and Educational Center «Biological Systems and Nanotechnologies», Orenburg State University, 13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, tel.: 8-965-932-53-67.

**Elena A Sizova**, Dr. Sci. (Biology), Head of the Centre for Nanotechnologies in Agriculture, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000; Professor of the Scientific and Educational Center «Biological Systems and Nanotechnologies», Orenburg State University, 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, tel.: 8-912-344-99-07.

**Ayna M Kamirova**, Cand. Sci. (Biology), Researcher of the Centre for Nanotechnologies in Agriculture, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8-922-548-44-89.

**Anastasia P Ivanishcheva**, Junior Researcher at the Testing Center of the Common Use Center, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8-987-843-58-22.

Статья поступила в редакцию 21.11.2023; одобрена после рецензирования 10.01.2023; принята к публикации 18.03.2024.

The article was submitted 21.11.2023; approved after reviewing 10.01.2023; accepted for publication 18.03.2024.