

УДК 636.085:577.17

DOI: 10.33284/2658-3135-102-3-19

**Элементный и микроэкологический состав рубца при использовании в кормлении крупного рогатого скота высокодисперсных частиц**

**А.М. Макаева<sup>1</sup>, К.Н. Атландерова<sup>1</sup>, Е.А. Сизова<sup>1,2</sup>, С.А. Мирошников<sup>1,2</sup>, В.В. Ванишин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук

<sup>2</sup> Оренбургский государственный университет

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований элементного и микроэкологического состава рубца молодняка крупного рогатого скота при использовании в кормлении высокодисперсных частиц диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) и сплава железа и кобальта (FeCo), с гидродинамическим радиусом 109,6±16,6 и 265±25 нм соответственно. В эксперименте «*in vitro*» показано, что переваримость сухого вещества корма при экспозиции в рубцовой жидкости максимальна при введении высокодисперсных частиц (ВДЧ) SiO<sub>2</sub> в концентрации 2 мг/мл. Введение ВДЧ SiO<sub>2</sub> способствует прогрессирующему во времени накоплению кремния в рубцовой жидкости с динамикой от 3,8 % через три до 31 % через шесть часов после введения. Использование в кормлении ВДЧ FeCo сопровождается снижением концентрации в рубцовой жидкости железа на 46 % и 52 %, кобальта – на 40 % и 50 % через три и шесть часов соответственно.

Введение ВДЧ SiO<sub>2</sub> в корм сопряжено с изменениями в микроэкологическом статусе и ферментативной активности рубцовой жидкости и способствует увеличению переваримости сухого вещества.

Отсутствие токсических эффектов ВДЧ в отношении микрофлоры рубца, положительный эффект исследуемых высокодисперсных частиц на основные группы бактерий микробиомы рубца и отсутствие развития условно-патогенной микрофлоры показывают их относительную биобезопасность для окружающей среды и перспективу использования в практике животноводства.

**Ключевые слова:** крупный рогатый скот, минеральное питание, элементный статус, микрофлора, рубцовая жидкость, высокодисперсные частицы, диоксид кремния (SiO<sub>2</sub>), сплав железа и кобальта (FeCo).

UDC 636.085:577.17

**The elemental and microecological composition of rumen after use of highly dispersive particles in cattle feeding**

**AM Makaeva<sup>1</sup>, KN Atlanderova<sup>1</sup>, EA Sizova<sup>1,2</sup>, SA Miroshnikov<sup>1,2</sup>, VV Vanshin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Federal Research Center for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia)

<sup>2</sup> Orenburg State University (Orenburg, Russia)

**Summary.** The article presents the results of studies of elemental and microecological composition of the rumen of young cattle after use of finely dispersed particles of silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) and an alloy of iron and cobalt (FeCo) with a hydrodynamic radius of 109.6±16.6 and 265±25 nm, respectively. In «*in vitro*» experiment, it was shown that the digestibility of dry matter of feed when exposed in ruminal fluid is maximal after introduction of finely dispersed particles (FDP) of SiO<sub>2</sub> at a concentration of 2 mg/ml. The introduction of SiO<sub>2</sub> FDP promotes progressive silicon accumulation in ruminal fluid with dynamics from 3.8% three to 31% six hours after administration. The use of FeCo FDP in feeding is accompanied by a decrease in the concentration of iron in ruminal fluid by 46% and 52%, cobalt – by 40% and 50% after three and six hours, respectively.

The introduction of SiO<sub>2</sub> FDP into food is associated with changes in the microecological status and enzymatic activity of ruminal fluid and contributes to an increase in the digestibility of dry matter.

The absence of toxic effects of FDP with respect to ruminal microflora, the positive effect of the studied fine particles on main bacterial groups of the rumen microbiome, and the absence of the development of conditionally pathogenic microflora show their relative biosafety for the environment and prospects for use in animal husbandry practice.

**Key words:** cattle, mineral nutrition, elemental status, microflora, ruminal fluid, finely dispersed particles, silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ), alloy of iron and cobalt.

### **Введение.**

Микрофлора рубца является одним из главных факторов, напрямую влияющих на продуктивность жвачных животных. Основные знания о микрофлоре рубца и её функциях были получены с помощью классических методов микробиологии (Bryant MP, 1959; Dehority BA and Orpin CG, 1997; Hespell RB et al., 1997). Однако в настоящее время исследователями описан ряд ограничений и недостатков данных методов – прежде всего их трудоёмкость и неточность (Amann RI et al., 1992). Помимо этого, показано, что значительная часть микроорганизмов рубца представлена некультивируемыми видами (Wintzingerode FV et al., 1997; Zoetendal EG et al., 1998; Krause DO et al., 2003).

Состав и жизнедеятельность кишечного микробиома определяются множеством факторов, в том числе диетой (Wilkinson TJ et al., 2017), периодом развития (Yegani M and Korver DR, 2008), при этом использование препаратов (макро- и микроэлементов, стимуляторов роста и др.) в кормлении является одним из наиболее важных (Park SH et al., 2017; Williams K et al., 2015). Недавно начали рассматривать потенциально токсикологические эффекты металлов (Sekhon BS, 2014). Особое значение в последнее время приобретают высокодисперсные препараты как перспективные компоненты рационов животных (Prasad R et al., 2017; Miroshnikova E et al., 2015; Яушева Е.В. и др., 2013), в том числе в качестве источников микроэлементов (Wang C et al., 2011) для повышения иммунитета животных (Fondevila M et al., 2009), в качестве ростостимулирующих антибиотиков (Pietrojusti A et al., 2016) и др. Это обстоятельство определяет необходимость изучения опосредованных эффектов высокодисперсных частиц на микробиоту кишечника (Yausheva EV et al., 2018; Сизова Е.А. и Яушева Е.В., 2019). Перспективность этого направления в животноводстве определяется созданием новых препаратов микроэлементов на основе высокодисперсных частиц (Мирошников С.А. и Сизова Е.А., 2017; Сизова Е.А., 2017).

### **Цель исследования.**

Изучение переваримости кормов, минерального обмена и изменение микробиоценоза рубца при использовании в кормлении молодняка крупного рогатого скота высокодисперсных форм – микроэлементов  $\text{FeCo}$  и  $\text{SiO}_2$ .

### **Материалы и методы исследования.**

**Объект исследования.** Бычки красной степной породы со средней массой тела 300-310 кг, в возрасте 13 месяцев; рубцовая жидкость (РЖ).

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями Russian Regulations, 1987 (Order No. 755 on 12.08.1977 the USSR Ministry of Health) and «The Guide for Care and Use of Laboratory Animals (National Academy Press Washington, D.C. 1996). При выполнении исследований были предприняты усилия, чтобы свести к минимуму страдания животных и уменьшения количества образцов.

**Схема эксперимента.** Исследования проводились на базе центра коллективного пользования и центра «Нанотехнологии в сельском хозяйстве» Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук. В качестве источников микроэлементов были использованы препараты ВДЧ  $\text{SiO}_2$  ( $\text{SiO}_2$ : 99,8 %;  $\text{Cl}_2$ : <0,2 %;  $S_{уд}$ =55,4 м<sup>2</sup>/г; Z-потенциалом 31±0,5 мВ) и ВДЧ сплава  $\text{FeCo}$  (Fe: 70 %; Co: 30 %;  $S_{уд}$ =15,4 м<sup>2</sup>/г; Z-потенциалом 15±0,2 мВ) с гидродинамическим радиусом в водном лиозоле 109,6±16,6 нм и 265±25 нм. Подготовку препаратов ВДЧ проводили в изотоническом растворе на ультразвуковом диспергаторе УЗДН-2Т («НПП Академприбор», Россия) (35 кГц, 300/450 Вт, 10 мкА) в течение 30 мин.

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе – «*in vitro*» определяли переваримость сухого вещества кормов при экспозиции в рубцовой жидкости, содержащей ВДЧ  $\text{SiO}_2$  (0,1;

0,25; 2,0 мг/мл) и FeCo (0,25; 0,35; 0,75 мг/мл) при помощи «искусственного рубца KPL 01». В соответствии с методикой пробы измельченного корма (500 мг) смешивали с ВДЧ в соответствующей концентрации и помещали в мешочки, изготовленные из полиамидной ткани. Мешочки зашивались и закреплялись при помощи зажимного приспособления на валике. Затем мешочки на валике помещали в прибор «искусственный рубец» и термостат при  $t +39$  °С на 48 часов. После этого образцы промывали под проточной водой и помещали в раствор пепсина в «искусственный рубец» и на 24 часа ставили в термостат. По окончании процедуры образцы промывались в проточной воде и высушивались до постоянной массы.

Переваримость сухого вещества кормов «*in vitro*» определяли по разности массы образца корма вместе с мешочком и после двухстадийной инкубации и высушивания до постоянной массы при температуре +60 °С.

На втором этапе «*in vivo*» на бычках оценивали особенности рубцового пищеварения, микроэлементный состав и микробиоценоз рубцовой жидкости при введении в рацион ВДЧ SiO<sub>2</sub> и FeCo. В течение подготовительного периода эксперимента (10 суток) бычки были переведены на привязное содержание, индивидуальное кормление согласно детализированных норм (Калашников А.П. и др., 2003).

Животным опытных групп в утренние часы в течение учётного периода (пять суток) вводили в корм высокодисперсные частицы: II группе – ВДЧ SiO<sub>2</sub> в дозе 13 мг/кг живой массы, III – ВДЧ FeCo в дозе 5 мг/кг живой массы. Животным контрольной группы (I) ВДЧ в рацион не вводились. Для получения рубцового содержимого устанавливали фистулы рубца. Образцы рубцового содержимого (300 мл) получали через 3 и 6 часов после введения ВДЧ.

Содержание 25 химических элементов (Ca, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Ni, As, Cr, K, Na, P, Zn, I, V, Co, Se, Ti, Al, Be, Cd, Pb, Hg, Sn, Sr) в рубцовой жидкости определяли на масс-спектрометре Elan 9000 и атомно-эмиссионном спектрометре Optima 2000V. Для озонирования использовали микроволновую систему разложения Multiwave 3000.

С целью изучения микробиоценоза рубца проводили исследование состава рубцовой жидкости. Для этого у фистульных животных брались пробы рубцового содержимого в количестве 300 мл до кормления, через 3 после начала кормления. Образцы помещали в стерильные микропробирки с защелкивающейся крышкой типа «эппендорф», замораживали при -70 °С (криоморозильник ULUF65) и хранили, не допуская повторного замораживания. Затем содержимое кишечника использовали для выделения очищенных препаратов ДНК (Yegani M and Korver DR, 2008). Таксономический состав содержимого рубца определялся методом NGS секвенирования на приборе MiSeq. Библиотеки ДНК 16S были подготовлены в соответствии с рабочим процессом Illumina с праймерами. Библиотеки были секвенированы с использованием набора реагентов MiSeq v3 с 2×300 пар оснований.

**Оборудование и технические средства.** Переваримость определяли с помощью «Искусственного рубца» KPL 01; термостата электрического суховоздушного ТС-1/80 СПУ (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия). Оценку содержания элементов в рубцовой жидкости определяли на масс-спектрометре Elan 9000 («Perkin Elmer», США) и атомно-эмиссионном спектрометре Optima 2000V («Perkin Elmer», США). Для озонирования использовали микроволновую систему разложения Multiwave 3000 («Anton Paar», Австрия). Образцы помещали в стерильные микропробирки с защелкивающейся крышкой типа «эппендорф» («Nuova Aptaca S.R.L.», Италия). Замораживание осуществляли с помощью криоморозильника ULUF65 («ARCTICO», Дания). Таксономический состав содержимого рубца определялся методом NGS секвенирования на приборе MiSeq («Illumina», США).

**Статистическая обработка.** Данные представлены в виде средних значений ± стандартная ошибка средней. Статистический анализ проводили с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США) с обработкой данных в «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США).

**Результаты исследования.**

Введение опытных препаратов ВДЧ в рубцовую жидкость «*in vitro*» сопровождалось изменениями в переваримости. В частности, присутствие ВДЧ SiO<sub>2</sub> в дозе 0,1 мг/мл достоверно повышало переваримость сухого вещества на 16,5 % (P≤0,001), в дозировке 0,25 мг/мл – на 17,4 % (P≤0,001), 2 мг/мл – на 18,7 % (P≤0,001) (табл. 1).

Таблица 1. Переваримость сухого вещества корма при экспозиции в рубцовой жидкости «*in vitro*» при добавлении ВДЧ FeCo и SiO<sub>2</sub>  
Table 1. Digestibility of dry matter of the feed upon to «*in vitro*» exposure in ruminal fluid with the addition of FeCo and SiO<sub>2</sub> FDPs

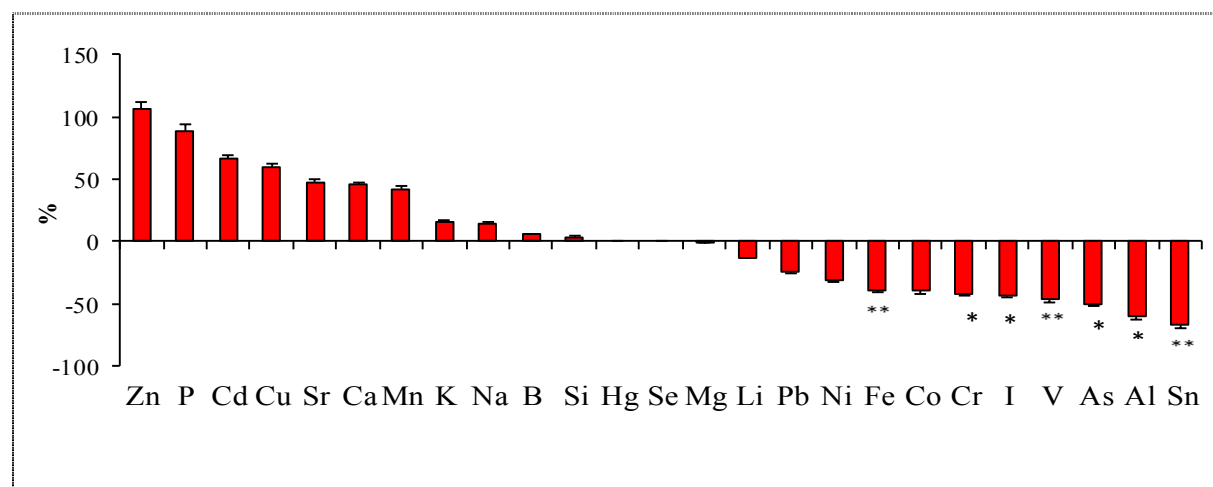
Группа/Group	Концентрация ВДЧ, г/мл/ Concentration of FDPs, g/ml	Переваримость, %/ Digestibility, %
I (контрольная)/I (control)	-	69,00±0,383
II (опытная)/ II (experimental)	2,0	81,9±0,007***
	0,25	81,0±0,039***
	0,1	80,44±0,030***
III (опытная)/ III (experimental)	0,25	69,10±0,058
	0,35	70,00±0,058
	0,75	71,22±0,017

Примечание: \*\*\* – P≤0,001

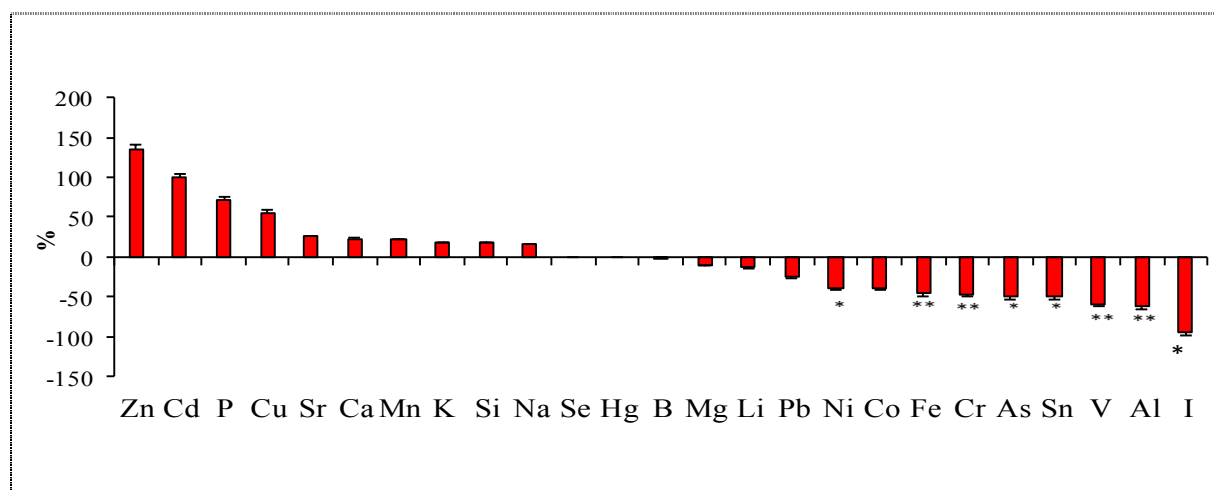
Note: \*\*\* – P≤0.001

При внесении ВДЧ FeCo в концентрации 0,25 мг/мл разница переваримости по сравнению с контролем оказалась минимальной. С повышением дозы вносимого вещества наблюдался рост переваримости: на 1,5 % при концентрации 0,35 мг/мл ВДЧ FeCo; на 3,2 % – при концентрации 0,75 мг/мл по сравнению с контролем.

*Элементный состав рубцовой жидкости.* Анализ концентрации микроэлементного состава рубцовой жидкости «*in vivo*» выявил различия в механизмах действия препаратов ВДЧ на обмен химических веществ. Так, через 3 часа после поступления ВДЧ SiO<sub>2</sub> (II группа) наблюдалось снижение концентрации железа в рубцовой жидкости на 5,5 % (P≤0,01), на фоне повышения концентрации меди – на 42,4 %, кальция – на 31,8 %, марганца – на 29,6 % и др. (рис. 1А). Поступление ВДЧ FeCo (III группа) сопровождается уменьшением концентрации в рубцовой жидкости кобальта на 40 %, железа – на 46 % (P≤0,01) и хрома – на 47 % (P≤0,05) относительно контрольной группы (рис. 1В).



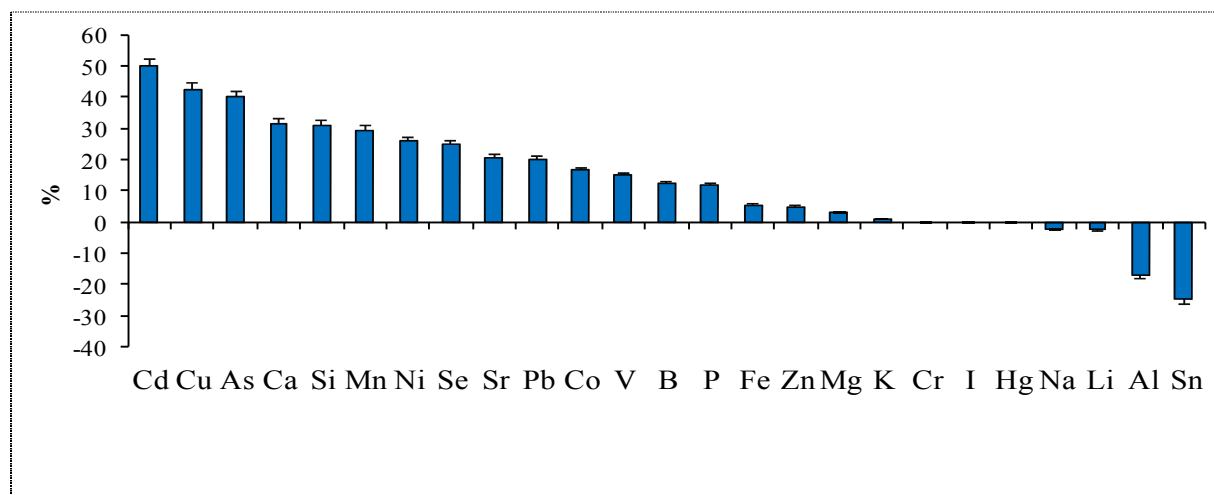
А



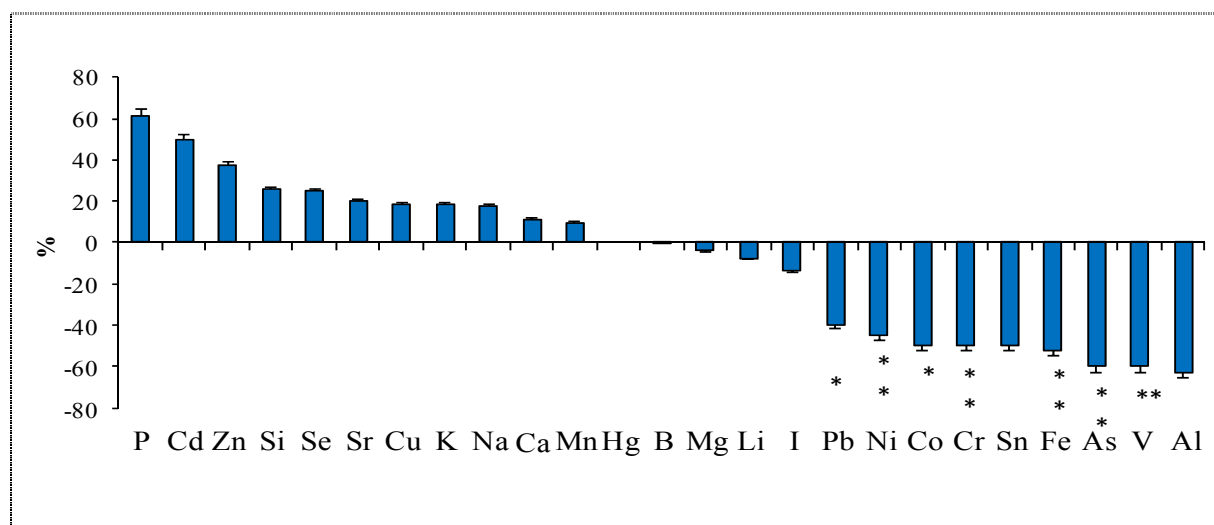
B

**Рис. 1 – Разница концентраций химических элементов в рубцовой жидкости животных опытных групп по сравнению с контрольной через 3 часа после введения: А – ВДЧ SiO<sub>2</sub> (II группа); В – ВДЧ FeCo (III группа), %**  
**Figure 1 – The difference in the concentrations of chemical elements in ruminal fluid of animals of the experimental groups as compared with the control 3 hours after administration: A – SiO<sub>2</sub> FDP (group II); B – FeCo FDP (group III), %**

Анализ содержания токсических химических элементов в рубцовой жидкости через 3 часа после введения ВДЧ SiO<sub>2</sub> выявил факт снижения концентрации в рубцовой жидкости алюминия на 60 % ( $P \leq 0,05$ ) относительно контроля. Через 6 часов после введения ВДЧ SiO<sub>2</sub> в рубцовой жидкости наблюдалось увеличение концентрации кремния на 31 %, мышьяка – на 40 %, никеля – на 25,8 %, бария – на 12,6 % в сравнении с контрольной группой (рис. 2А). Противоположенный эффект дало поступление в рубец ВДЧ FeCo, при котором снижалась концентрация мышьяка на 60 %, никеля – на 45,1 % и ванадия – на 60 % ( $P \leq 0,01$ ) по сравнению с контролем (рис. 2В).



A



В

**Рис. 2 – Разница концентраций химических элементов в рубцовой жидкости животных опытных групп по сравнению с контрольной через 6 часов после введения: А – ВДЧ SiO<sub>2</sub> (II группа); В – ВДЧ FeCo (III группа), %**  
**Figure 2 – The difference in the concentrations of chemical elements in ruminal fluid of animals of the experimental groups as compared with the control 6 hours after administration: A – FDP SiO<sub>2</sub> (group II); B – FDP FeCo (group III), %**

Введение ВДЧ SiO<sub>2</sub> и FeCo через 6 часов после кормления снижало концентрацию алюминия в рубцовой жидкости на 17,2 % и 62,6 % соответственно.

Бактериальный состав рубцовой жидкости II группы через 3 часа после введения ВДЧ был представлен филумами: *Firmicutes* (61,1 % от общего числа), *Proteobacteria* (1,4 % от общего числа), *Bacteroidetes* (33,8 % от общего числа) и др. (1 % от общего числа), где доминирующими классами являлись *Bacilli* (22,1 % от контроля), *Negativicutes* (13,25 % от общего числа), *Clostridia* (25,5 % от общего числа), *Gamma**proteobacteria* (1,1 % от контроля), *Bacteroidia* (32,6 % от контроля). Видовое разнообразие было представлено бактериями, относящимися к таким родам как: *p. Streptococcus* (20,9 % от общего числа), *p. Succiniclasicum* (12,3 % от общего числа), *Ruminococcus* (1,2 % от общего числа), *p. Pseudobutyrvibrio* (2 % от общего числа), *p. Butyrvibrio* (2 % от общего числа), *p. Lachnospiracea\_incertae\_sedis* (2 % от общего числа), *p. Prevotella* (20,4 % от общего числа) и др. (табл. 2).

Использование ВДЧ FeCo сопровождалось увеличением численности представителей таксона *Firmicutes* на 6,9 % и снижением числа бактерий, относящихся к филумам *Bacteroidetes* на 12,4 %, *Proteobacteria* до менее 2 % от общего числа в пробе.

Наблюдалось увеличение численности микроорганизмов, относящихся к таксонам *Clostridia* (на 10,6 % от контроля) и *Bacteroidia* (на 14,2 % от контроля). Анализ микробиоценоза показал в сравнении с контролем повышение числа бактерий *p. Prevotella* (на 21,6 % от контроля), *Streptococcus* (на 34,4 % от контроля), *Succiniclasicum* (на 21,2 % от контроля) и снижение количества бактерий других родов, наиболее многочисленных в контроле.

Введение в рацион высокодисперсных препаратов диоксида кремния оказывало аналогичное действие. Отмечено снижение числа микроорганизмов филума *Bacteroidetes* на 50 % от контроля, *Firmicutes* – на 69,2 % от контроля и снижение количества представителей таксона *Proteobacteria* до менее 2 % от общего числа. Отмечалось увеличение численности бактерий класса *Bacilli* (на 50 % от контроля) и *Negativicutes* (на 8,6 % от контроля), и снижение количества микроорганизмов классов *Clostridia* (на 43 % контроля) и *Bacteroidia* (на 60 % контроля). Исследование видового состава показало увеличение в основном числа бактерий *p. Prevotella* на 29,4 % от контроля, *p. Streptococcus* – на 53,2 % от контроля, *p. Succiniclasicum* – на 9,5 % и снижение количества бактерий *p. Butyrvibrio* и других до менее 2 % от общего числа.

Таблица 2. Таксономическое разнообразие бактериального состава рубца молодняка крупного рогатого скота при использовании в рационе различных ВДЧ (через 3 часа после введения ВДЧ)

Table 2. Taxonomic diversity of ruminal bacterial composition of young cattle with use of different FDP in the diet (3 hours after the introduction of FDP)

Группа/ Group	Таксон/Taxon				
	филум/phylum	класс/class	семейство/family	род/genus	
ОР/BD	<i>Firmicutes</i> (56,9%)	<i>Bacilli</i> (15,1%)	<i>Streptococcaceae</i> (13,7%) <i>Lachnospiraceae</i> (14%)	<i>Streptococcus</i> (13,7%) <i>Butyrivibrio</i> (2,32%)	
		<i>Clostridia</i> (31,1%)	<i>Ruminococcaceae</i> (12,35%)	<i>Saccharofermentans</i> (1,22%)	
		<i>Negativicutes</i> (10,6%)	<i>Acidaminococcaceae</i> (9,77%)	<i>Succiniclasicum</i> (9,77%)	
	<i>Proteobacteria</i> (2%)	<i>Gamma-proteo- bacteria</i> (2%)	<i>Enterobacteriaceae</i> (1%)	-	-
			<i>Prevotellaceae</i> (25%)	<i>Prevotella</i> (17%)	-
	<i>Bacteroidetes</i> (38%)	<i>Bacteroidia</i> (32,6%)	<i>Porphyromonadaceae</i> (2%)	-	-
			<i>Bacteroidaceae</i> (7,56%)	-	-
<i>Saccharibacteria</i> (18,7%)	-	-	-	-	
Другие* (1,4%)	Другие* (2,4%)	Другие* (4,4%)	Другие* (7,2%)	Другие* (7,2%)	
ОР+ ВДЧ FeCo/ BD+ FeCo FDP	<i>Firmicutes</i> (61,1%)	<i>Clostridia</i> (34,8%)	<i>Ruminococcaceae</i> (6,7%)	-	
		<i>Bacilli</i> (22,1%)	<i>Streptococcaceae</i> (20,9%)	<i>Streptococcus</i> (20,9%) <i>Succiniclasicum</i> (12,4%)	
		<i>Negativicutes</i> (13,2%)	<i>Acidaminococcaceae</i> (12,4%)	<i>Pseudobutyrvibrio</i> (2%)	
	<i>Bacteroidetes</i> (33,8%)	<i>Bacteroidia</i> (38%)	<i>Lachnospiraceae</i> (16,5%)	<i>Butyrivibrio</i> (2%) <i>Lachnospiracea incertae sedis</i> (2%)	-
			<i>Prevotellaceae</i> (22,5%)	<i>Prevotella</i> (21,7%)	-
Другие* (3%)	Другие* (2,5%)	Другие* (4%)	Другие* (7%)	Другие* (7%)	
ОР+ ВДЧ SiO <sub>2</sub> / BD+ SiO <sub>2</sub> FDP	<i>Bacteroidetes</i> (18,7%)	<i>Bacteroidia</i> (18,9%)	<i>Prevotellaceae</i> (17,5%)	<i>Prevotella</i> (24,1%)	
			<i>Ruminococcaceae</i> (2,5%)	-	
	<i>Firmicutes</i> (17,5%)	<i>Clostridia</i> (13,4%)	<i>Lachnospiraceae</i> (14,6%)	<i>Pseudobutyrvibrio</i> (2%) <i>Butyrivibrio</i> (2%) <i>Lachnospiracea incertae sedis</i> (2%)	
			<i>Bacilli</i> (30,6%)	<i>Streptococcaceae</i> (29,3%)	<i>Streptococcus</i> (29,3%)
			<i>Negativicutes</i> (11,6%)	<i>Acidaminococcaceae</i> (10,8%)	<i>Succiniclasicum</i> (10,8%)
	Другие* (1,3%)	Другие* (3,1%)	Другие* (5,5%)	Другие* (10,3%)	Другие* (10,3%)

Примечание: \* в эту группу объединены таксоны, численность каждого из которых не превышала 2% от общего числа

Note: \* This group includes taxa, the number of each did not exceed 2% of the total

**Обсуждение полученных результатов.**

Использование высокодисперсных кормовых добавок в кормлении животных будет всё более расширяться. Это подтверждается анализом рынка кормовых добавок, проведённым Американской ассоциацией производителей кормов (AFIA). В современных условиях всё большее значение приобретают исследования действия ВДЧ на микробиоценозы, в том числе на микробиом животных и человека (Pietrojusti A et al., 2016).

В связи с этим наши исследования преследовали цель изучить особенности действия высокодисперсных препаратов на микробиоценозы рубца. В этой связи особый интерес вызывали перспективы использования ВДЧ SiO<sub>2</sub>, что обусловлено в первую очередь их низкой токсичностью (Shamsi A et al., 2017). Как следует из полученных нами данных, использование ВДЧ SiO<sub>2</sub> сопровождалось повышением переваримости сухого вещества «*in vitro*», что в общем согласуется с результатами ранее проведённых Faulkner MJ и коллегами исследований (Faulkner MJ and Weiss WP, 2017).

Одним из факторов, определивших рост переваримости при введении высокодисперсных частиц, являлось изменение состава микробиоценоза рубца. При этом в отличие от ранее описанных эффектов, вызванных дачей микроэлементов как необходимых компонентов метаболизма микроорганизмов (Pino F and Heinrichs AJ, 2016; Zelenák I et al., 1992), дача условно эссенциального кремния скорее всего оказало опосредованное влияние на микрофлору. Очевидно, что состав и ферментативная вооруженность микрофлоры во многом и определили изменения в переваримости корма. Это следует из данных J Zhang с авторами (2017) о влиянии микробных популяций рубца и толстого кишечника животных на ферментативную активность содержимого в полостном пищеварении, в том числе 88-91 % эндогликаназной, ксиланазной активностей, 70 % – амилазной и 75 % – протеазной активностей (Zhang J et al., 2017). В связи с чем микроэлементные добавки способны повлиять на переваримость целлюлозы (Zelenák I et al., 1992).

Микроэлементы, поступая в рубец, поглощаются симбионтными микроорганизмами, число которых при введении минеральных добавок увеличивается, а следовательно, растёт их ферментативная активность. Соединение различных механизмов действия бактериальных и грибных целлюлаз приводит к повышению эффективности переваривания клетчатки в рубце (Arelovich NM et al., 2000). Включаясь в процесс рубцового пищеварения, микроорганизмы тесно взаимодействуют с растительным материалом (Huws SA et al., 2018). В свою очередь микроорганизмы рубца могут влиять на метаболизм других питательных веществ, таких как азот и сера (Veira DM, 1986).

Известно, что ионы металлов являются кофакторами целого ряда ферментов, в т. ч. микроорганизмов и простейших (Оберлис Д. и др., 2008), соответственно высока вероятность их влияния на деятельность ферментной системы микробиоты рубца. В этой связи механизм действия высокодисперсных частиц на микробиоценозы может быть описан как результат трансформации высокодисперсных частиц с образованием ионов, которые, по мнению ряда авторов, и несут главную ответственность за их токсичность для живых организмов (Brunner TJ et al., 2006; Vázquez-Armijo JF et al., 2011). Предполагаем, что это может стать причиной накопления химических элементов микроорганизмами рубца.

В эксперименте отмечено снижение концентрации железа и кобальта в рубцовой жидкости на фоне поступления ВДЧ FeCo (III группа). Одной из вероятных причин такого снижения может являться запуск механизмов гомеостаза, приводящих к снижению негативных эффектов избытка железа в организме, сопровождаемых образованием свободных радикалов, подавлением иммунитета и др. В норме – сдерживающихся хорошо работающей системой стабилизации его уровня (Aslam MF et al., 2014). Подобный эффект снижения концентрации железа был отмечен в мышцах крыс при введении наночастиц железа и их агломератов (Sizova E et al., 2015).

При сравнении двух опытных групп выявлено, что введение ВДЧ SiO<sub>2</sub> способствует повышению содержания в рубцовой жидкости кремния, цинка, фосфора, кальция и других элементов. Тогда как введение ВДЧ FeCo сопровождалось снижением концентрации железа и кобальта рубцовой жидкости, причём снижение нарастало во времени. Возможно, это связано со способностью многих видов бактерий рубца аккумулировать микроэлементы. До сих пор недостаточно изучен



стимулирующий эффект небольших доз ВДЧ на рубцовый метаболизм. В то же время стенка рубца проницаема для микроэлементов в обоих направлениях.

Ранее проведённые рядом авторов исследования показали, что наиболее распространёнными таксономическими типами являются *Bacteroidetes* и *Firmicutes*, что согласуется с нашими данными (Hart EH et al., 2018). Это соответствовало наиболее распространённым таксономическим типам, определённым в исследованиях 16S рРНК. Данные указывают на дифференциацию между метаболическими путями наиболее распространённой филои, что согласуется с концепцией диверсифицированных ниш в микробиоте рубца.

В рамках таксонов *Firmicutes* отмечалось увеличение числа бактерий классов *Bacilli* на протяжении всего эксперимента. Согласно литературным данным, высокодисперсные частицы способствуют увеличению пробиотических свойств бактерий класса *Bacilli*, что, вероятно, косвенно обуславливало увеличение их количества (Shcherbakov AV et al., 2011). К тому же кремний стабилизирует клеточный цитоскелет и цитоплазматические мембраны, что способствует росту и дифференциации клеток (Grna A et al., 1992), что особенно важно при наличии симбионтного пищеварения жвачных.

### Выводы

В эксперименте показано, что ВДЧ оказывают влияние на переваримость кормов при экспозиции в рубцовой жидкости, что объясняется действием высокодисперсных частиц микроэлементов на микробиом рубца и связанные с ним метаморфозы элементного статуса.

**Исследования выполнены в соответствии с планом НИР на 2019-2021 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ 0761-2019-0005)**

### Литература

1. Исследование биологического действия наночастиц металлов / Е.В. Яушева, С.А. Мирошников, Е.А. Сизова, А.С. Васильченко // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2013. № 9. С. 054-059. [Yausheva EV, Miroshnikov SA, Sizova EA, Vasilchenko AS. The study of the biological activity of metal nanoparticles. Questions of biological, medical and pharmaceutical chemistry. 2013;9:054-059. (In Russ)].
2. Мирошников С.А., Сизова Е.А. Наноматериалы в животноводстве (обзор) // Вестник мясного скотоводства. 2017. № 3(99). С. 7-22. [Miroshnikov SA, Sizova EA. Nanomaterials in animal husbandry (review). Herald of Beef Cattle Breeding. 2017;3(99):7-22. (In Russ)].
3. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справ. пособие / А.П. Калашников и др. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 2003. 456 с. [Kalashnikov AP, et al. Normy i ratsiony kormleniya sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh: sprav. posobie. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow: Agropromizdat; 2003. 456 p. (In Russ)].
4. Оберлис Д., Харланд Б., Скальный А. Биологическая роль макро- и микроэлементов у человека и животных / под ред. А.В. Скального. СПб.: Наука, 2008. 544 с. [Oberlis D, Harland B, Skal'nyj A. Biologicheskaja rol' makro- i mikrojelementov u cheloveka i zhivotnyh. pod red. Skal'nogo AV. SPb.: Nauka; 2008. 544 p. (In Russ)].
5. Сизова Е.А. Сравнительная характеристика биологических эффектов разноразмерных наночастиц меди и железа // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 3. С. 13-17. [Sizova EA. Comparative analysis of the different-sized copper and iron nanoparticles biological effects. Vestnik of the Russian Agricultural Science. 2017;3:13-17. (In Russ)].
6. Сизова Е.А., Яушева Е.В. Сравнительная продуктивность цыплят-бройлеров при инъекционном введении разноразмерных ультрадисперсных частиц железа // Животноводство и кормопроизводство. 2019. Т. 102. № 1. С. 6-21. [Sizova EA, Yausheva EV. Comparative productivity of broiler chickens injected with variously sized ultrafine iron particles. Animal Husbandry and Fodder Production. 2019;102(1):6-21. (In Russ)]. doi: 10.33284/2658-3135-102-1-6

7. Amann RI, Lin C, Key R, Montgomery L, Stahl DA. Diversity among *Fibrobacter* isolates: towards a phylogenetic classification. *Syst. Appl. Microbiol.* 1992;15(1):23-31. doi: [https://doi.org/10.1016/S0723-2020\(11\)80133-5](https://doi.org/10.1016/S0723-2020(11)80133-5)
8. Arelovich HM, Owens FN, Horn GW, Vizcarra JA. Effects of supplemental zinc and manganese on ruminal fermentation, forage intake, and digestion by cattle fed prairie hay and urea. *Journal of Animal Science.* 2000;78(11):2972-2979. doi: <https://doi.org/10.2527/2000.78112972x>
9. Aslam MF, Frazer DM, Faria N, Bruggaber SFA, Wilkins SJ, Mirciov C, Powell JJ, Anderson GJ, Pereira DI. Ferroportin mediates the intestinal absorption of iron from a nanoparticulate ferritin core mimetic in mice. *FASEB J.* 2014;28(8):3671-3678. doi: <https://doi.org/10.1096/fj.14-251520>
10. Brunner TJ, Wick P, Manser P, et al. In vitro cytotoxicity of oxide nanoparticles: comparison to asbestos, silica, and the effect of particle solubility. *Environmental Science and Technology.* 2006;40(14):4374-4381. doi: <https://doi.org/10.1021/es052069i>
11. Bryant MP. Bacterial species of the rumen. *Bacteriol. Rev.* 1959;23(3):125-153.
12. Dehority BA, Orpin CG. Development of, and natural fluctuations in, rumen microbial population. *The Rumen Microbial Ecosystem.* Hobson PN, Stewart CS, editors. London: Blackie Academic and Professional; 1997:196-245. doi: [https://doi.org/10.1007/978-94-009-1453-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-009-1453-7_5)
13. Faulkner MJ, Weiss WP. Effect of source of trace minerals in either forage- or by-product-based diets fed to dairy cows: 1. Production and macronutrient digestibility. *J Dairy Sci.* 2017;100(7):5358-5367. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12095>
14. Fondevila M, Herrero R, Casallas MC, Abecia L, Duchá JJ. Silver nanoparticles as a potential antimicrobial additive for weaned pigs. *Anim Feed Sci Technol.* 2009;150(3-4):259-269. doi: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2008.09.003>
15. Grna A, Koo PH, Hogan J. Antitumor effect of novel silatranes on renal cell carcinoma in mice. *Anticancer Res.* 1992;12(2):565-569.
16. Hart EH, Creevey CJ, Hitch T, Kingston-Smith AH. Meta-proteomics of rumen microbiota indicates niche compartmentalisation and functional dominance in a limited number of metabolic pathways between abundant bacteria. *Sci Rep.* 2018;8(1):10504. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28827-7>
17. Hespell RB, Akin DE, Dehority BA. Bacteria, fungi, and protozoa of the rumen. *Gastrointestinal Microbiology.* Mackie RI, White BA, Isaacson RE, editors. New York: Chapman and Hall; 1997;2:59-141.
18. Huws SA, Creevey CJ, Oyama LB, Mizrahi I, Denman SE, et al. Addressing global ruminant agricultural challenges through understanding the rumen microbiome: past, present, and future. *Front Microbiol.* 2018;25(9):2161. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02161>
19. Krause DO, Denman SE, Mackie RI, Morrison M, Rae AL, Attwood GT, McSweeney CS. Opportunities to improve fiber degradation in the rumen: microbiology, ecology, and genomics. *FEMS Microbiol. Rev.* 2003;27(5):663-693. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-6445\(03\)00072-X](https://doi.org/10.1016/S0168-6445(03)00072-X)
20. Miroshnikova E, Arinzhanov A, Kilyakova Y, Sizova E, Miroshnikov S. Antagonist metal alloy nanoparticles of iron and cobalt: impact on trace element metabolism in carp and chicken. *Human & Veterinary Medicine.* 2015;7(4):253-259.
21. Pietroiusti A, Magrini A, Campagnolo L. New frontiers in nanotoxicology: Gut microbiota/microbiome-mediated effects of engineered nanomaterials. *Toxicol Appl Pharmacol.* 2016;299:90-95. doi: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2015.12.017>
22. Pino F, Heinrichs AJ. Effect of trace minerals and starch on digestibility and rumen fermentation in diets for dairy heifers. *J Dairy Sci.* 2016;99(4). P. 2797-2810. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10034>
23. Prasad R, Bhattacharyya A, Nguyen QD. Nanotechnology in sustainable agriculture: recent developments, challenges, and perspectives. *Front Microbiol.* 2017;8:1014. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01014>
24. Sekhon BS. Nanotechnology in agri-food production: an overview. *Nanotechnol Sci Appl.* 2014;7:31-53. doi: <https://doi.org/10.2147/NSA.S39406>

25. Shamsi A, Ahmed A, Bano B. Structural transition of kidney cystatin induced by silicon dioxide nanoparticles: an implication for renal diseases. *J Biol Macromol.* 2017;94(Part B):754-761. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.10.019>
26. Shcherbakov AB, Ivanov VK, Zholobak NM, et al. Nanocrystalline ceria based materials – perspectives for biomedical application. *Biophysics.* 2011;56(6):987-1004. doi: <https://doi.org/10.1134/S0006350911060170>
27. Sizova E, Miroshnikov S, Yausheva E, Polyakova V. Assessment of morphological and functional changes in organs of rats after intramuscular introduction of iron nanoparticles and their agglomerates. *Biomed Res Int.* 2015;2015:243173. 7 p. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/243173>
28. Vázquez-Armijo JF, Martínez-Tinajero JJ, López D, Salem AFZM, Rojo R. In vitro gas production and dry matter degradability of diets consumed by goats with or without copper and zinc supplementation. *Biological Trace Element Research.* 2011;144(1-3):580-587. doi: <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9113-y>
29. Veira DM. The role of ciliate protozoa in nutrition of the ruminant. *Journal of Animal Science.* 1986;63(5):1547-1560. doi: <https://doi.org/10.2527/jas1986.6351547x>
30. Wang C, Wang MQ, Ye SS, Tao WJ, Du YJ. Effects of copper-loaded chitosan nanoparticles on growth and immunity in broilers. *Poult Sci.* 2011;90(10): 2223-2228. doi: <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01511>
31. Wilkinson TJ, Cowan AA, Vallin HE, Onime LA, Oyama LB, Cameron SJ, et al. Characterization of the microbiome along the gastrointestinal tract of growing turkeys. *Front. Microbiol.* 2017;8:1089. 11 p. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01089>
32. Williams K, Milner J, Boudreau MD, Gokulan K, Cerniglia CE, Khare S. Effects of subchronic exposure of silver nanoparticles on intestinal microbiota and gut-associated immune responses in the ileum of Sprague-Dawley rats. *Nanotoxicol.* 2015;9(3):279-289. doi: <https://doi.org/10.3109/17435390.2014.921346>
33. Wintzingerode FV, Göbel UB, Stackebrandt E. Determination of microbial diversity in environmental samples: pitfalls of PCR-based rRNA analysis. *FEMS Microbiol. Rev.* 1997;21(3):213-229. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.1997.tb00351.x>
34. Yausheva E, Miroshnikov S, Sizova E. Intestinal microbiome of broiler chickens after use of nanoparticles and metal salts. *Environmental Science and Pollution Research.* 2018;25(18):18109-18120. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1991-5>
35. Yegani M, Korver DR. Factors affecting intestinal health in poultry. *Poult Sci.* 2008;87(10):2052-2063. doi: <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00091>
36. Zelenák I, Jalc D, Plachá I, Sviatko P, Vondrák T, Siroka P, Gyulai F. The effect of copper and cobalt supplementation on the digestibility of fibrous feed in sheep. *Vet Med (Praha).* 1992;37(4):221-229.
37. Zhang J, Shi H, Wang Y, Li S, Cao Z, Ji S, He Y, Zhang H. Effect of dietary forage to concentrate ratios on dynamic profile changes and interactions of ruminal microbiota and metabolites in holstein heifers. *Front Microbiol.* 2017;8:2206. 18 p. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02206>
38. Zoetendal EG, Akkermans AL, De Vos WM. Temperature gradient gel electrophoresis analysis of 16S rRNA from human fecal samples reveals stable and host-specific communities of active bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 1998;64(10):3854-3859.

#### References

1. Yausheva EV, Miroshnikov SA, Sizova EA, Vasilchenko AS. The study of the biological activity of metal nanoparticles. *Questions of biological, medical and pharmaceutical chemistry.* 2013;9:054-059.
2. Miroshnikov SA, Sizova EA. Nanomaterials in animal husbandry (review). *Herald of Beef Cattle Breeding.* 2017;3(99):7-22.
3. Kalashnikov AP, et al. Standards and diets of farm animals: Ref. book. 3rd ed., rework. and add. Moscow: Agropromizdat; 2003: 456 p.

4. Oberlis D, Harland B, Skal'nyj A. Biologicheskaja rol' makro- i mikrojelementov u cheloveka i zhivotnyh. pod red. Skal'nogo AV. SPb.: Nauka; 2008. 544 p.
5. Sizova EA. Comparative analysis of the different-sized copper and iron nanoparticles biological effects. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2017;3:13-17.
6. Sizova EA, Yausheva EV. Comparative productivity of broiler chickens injected with variously sized ultrafine iron particles. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(1):6-21. doi: 10.33284/2658-3135-102-1-6
7. Amann RI, Lin C, Key R, Montgomery L, Stahl DA. Diversity among Fibrobacter isolates: towards a phylogenetic classification. *Syst. Appl. Microbiol.* 1992;15(1):23-31. doi: [https://doi.org/10.1016/S0723-2020\(11\)80133-5](https://doi.org/10.1016/S0723-2020(11)80133-5)
8. Arelovich HM, Owens FN, Horn GW, Vizcarra JA. Effects of supplemental zinc and manganese on ruminal fermentation, forage intake, and digestion by cattle fed prairie hay and urea. *Journal of Animal Science*. 2000;78(11):2972-2979. doi: <https://doi.org/10.2527/2000.78112972x>
9. Aslam MF, Frazer DM, Faria N, Brugggraber SFA, Wilkins SJ, Mirciov C, Powell JJ, Anderson GJ, Pereira DI. Ferroportin mediates the intestinal absorption of iron from a nanoparticulate ferritin core mimetic in mice. *FASEB J*. 2014;28(8):3671-3678. doi: <https://doi.org/10.1096/fj.14-251520>
10. Brunner TJ, Wick P, Manser P, et al. In vitro cytotoxicity of oxide nanoparticles: comparison to asbestos, silica, and the effect of particle solubility. *Environmental Science and Technology*. 2006;40(14):4374-4381. doi: <https://doi.org/10.1021/es052069i>
11. Bryant MP. Bacterial species of the rumen. *Bacteriol. Rev.* 1959;23(3):125-153.
12. Dehority BA, Orpin CG. Development of, and natural fluctuations in, rumen microbial population. *The Rumen Microbial Ecosystem*. Hobson PN, Stewart CS, editors. London: Blackie Academic and Professional; 1997:196-245. doi: [https://doi.org/10.1007/978-94-009-1453-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-009-1453-7_5)
13. Faulkner MJ, Weiss WP. Effect of source of trace minerals in either forage- or by-product-based diets fed to dairy cows: 1. Production and macronutrient digestibility. *J Dairy Sci*. 2017;100(7):5358-5367. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12095>
14. Fondevila M, Herrero R, Casallas MC, Abecia L, Duchá JJ. Silver nanoparticles as a potential antimicrobial additive for weaned pigs. *Anim Feed Sci Technol*. 2009;150(3-4):259-269. doi: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2008.09.003>
15. Grna A, Koo PH, Hogan J. Antitumor effect of novel silatranes on renal cell carcinoma in mice. *Anticancer Res*. 1992;12(2):565-569.
16. Hart EH, Creevey CJ, Hitch T, Kingston-Smith AH. Meta-proteomics of rumen microbiota indicates niche compartmentalisation and functional dominance in a limited number of metabolic pathways between abundant bacteria. *Sci Rep*. 2018;8(1):10504. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28827-7>
17. Hespell RB, Akin DE, Dehority BA. Bacteria, fungi, and protozoa of the rumen. *Gastrointestinal Microbiology*. Mackie RI, White BA, Isaacson RE, editors. New York: Chapman and Hall; 1997:2:59-141.
18. Huws SA, Creevey CJ, Oyama LB, Mizrahi I, Denman SE, et. al. Addressing global ruminant agricultural challenges through understanding the rumen microbiome: past, present, and future. *Front Microbiol*. 2018;25(9):2161. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02161>
19. Krause DO, Denman SE, Mackie RI, Morrison M, Rae AL, Attwood GT, McSweeney CS. Opportunities to improve fiber degradation in the rumen: microbiology, ecology, and genomics. *FEMS Microbiol. Rev.* 2003;27(5):663-693. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-6445\(03\)00072-X](https://doi.org/10.1016/S0168-6445(03)00072-X)
20. Miroshnikova E, Arinzhyanov A, Kilyakova Y, Sizova E, Miroshnikov S. Antagonist metal alloy nanoparticles of iron and cobalt: impact on trace element metabolism in carp and chicken. *Human & Veterinary Medicine*. 2015;7(4):253-259.
21. Pietroiusti A, Magrini A, Campagnolo L. New frontiers in nanotoxicology: Gut microbiota/microbiome-mediated effects of engineered nanomaterials. *Toxicol Appl Pharmacol*. 2016;299:90-95. doi: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2015.12.017>

22. Pino F, Heinrichs AJ. Effect of trace minerals and starch on digestibility and rumen fermentation in diets for dairy heifers. *J Dairy Sci.* 2016;99(4). P. 2797-2810. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10034>
23. Prasad R, Bhattacharyya A, Nguyen QD. Nanotechnology in sustainable agriculture: recent developments, challenges, and perspectives. *Front Microbiol.* 2017;8:1014. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01014>
24. Sekhon BS. Nanotechnology in agri-food production: an overview. *Nanotechnol Sci Appl.* 2014;7:31-53. doi: <https://doi.org/10.2147/NSA.S39406>
25. Shamsi A, Ahmed A, Bano B. Structural transition of kidney cystatin induced by silicon dioxide nanoparticles: an implication for renal diseases. *J Biol Macromol.* 2017;94(Part B):754-761. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.10.019>
26. Shcherbakov AB, Ivanov VK, Zholobak NM, et al. Nanocrystalline ceria based materials – perspectives for biomedical application. *Biophysics.* 2011;56(6):987-1004. doi: <https://doi.org/10.1134/S0006350911060170>
27. Sizova E, Miroshnikov S, Yausheva E, Polyakova V. Assessment of morphological and functional changes in organs of rats after intramuscular introduction of iron nanoparticles and their agglomerates. *Biomed Res Int.* 2015;2015:243173. 7 p. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/243173>
28. Vázquez-Armijo JF, Martínez-Tinajero JJ, López D, Salem AFZM, Rojo R. In vitro gas production and dry matter degradability of diets consumed by goats with or without copper and zinc supplementation. *Biological Trace Element Research.* 2011;144(1-3):580-587. doi: <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9113-y>
29. Veira DM. The role of ciliate protozoa in nutrition of the ruminant. *Journal of Animal Science.* 1986;63(5):1547-1560. doi: <https://doi.org/10.2527/jas1986.6351547x>
30. Wang C, Wang MQ, Ye SS, Tao WJ, Du YJ. Effects of copper-loaded chitosan nanoparticles on growth and immunity in broilers. *Poult Sci.* 2011;90(10): 2223-2228. doi: <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01511>
31. Wilkinson TJ, Cowan AA, Vallin HE, Onime LA, Oyama LB, Cameron SJ, et al. Characterization of the microbiome along the gastrointestinal tract of growing turkeys. *Front. Microbiol.* 2017;8:1089. 11 p. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01089>
32. Williams K, Milner J, Boudreau MD, Gokulan K, Cerniglia CE, Khare S. Effects of subchronic exposure of silver nanoparticles on intestinal microbiota and gut-associated immune responses in the ileum of Sprague-Dawley rats. *Nanotoxicol.* 2015;9(3):279-289. doi: <https://doi.org/10.3109/17435390.2014.921346>
33. Wintzingerode FV, Göbel UB, Stackebrandt E. Determination of microbial diversity in environmental samples: pitfalls of PCR-based rRNA analysis. *FEMS Microbiol. Rev.* 1997;21(3):213-229. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.1997.tb00351.x>
34. Yausheva E, Miroshnikov S, Sizova E. Intestinal microbiome of broiler chickens after use of nanoparticles and metal salts. *Environmental Science and Pollution Research.* 2018;25(18):18109-18120. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1991-5>
35. Yegani M, Korver DR. Factors affecting intestinal health in poultry. *Poult Sci.* 2008;87(10):2052-2063. doi: <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00091>
36. Zelenák I, Jalc D, Plachá I, Sviatko P, Vondrák T, Siroka P, Gyulai F. The effect of copper and cobalt supplementation on the digestibility of fibrous feed in sheep. *Vet Med (Praha).* 1992;37(4):221-229.
37. Zhang J, Shi H, Wang Y, Li S, Cao Z, Ji S, He Y, Zhang H. Effect of dietary forage to concentrate ratios on dynamic profile changes and interactions of ruminal microbiota and metabolites in holstein heifers. *Front Microbiol.* 2017;8:2206. 18 p. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02206>
38. Zoetendal EG, Akkermans AL, De Vos WM. Temperature gradient gel electrophoresis analysis of 16S rRNA from human fecal samples reveals stable and host-specific communities of active bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 1998;64(10):3854-3859.

**Макаева Айна Маратовна**, младший научный сотрудник центра «Нанотехнологии в сельском хозяйстве», Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-919-842-46-99, e-mail: ayna.makaeva@mail.ru

**Атландерова Ксения Николаевна**, младший научный сотрудник, специалист Испытательного центра ЦКП, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, e-mail: atlander-qn@mail.ru

**Сизова Елена Анатольевна**, 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, 29, тел.: 8(3532)77-39-97; доцент кафедры биологии и почвоведения, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13, e-mail: Sizova.L78@yandex.ru

**Мирошников Сергей Александрович**, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, директор, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)43-46-41, e-mail: vniims.og@mail.ru; исполнительный директор Института биоэлементологии, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13

**Ваншин Владимир Валерьевич**, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Технологии пищевых производств», Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13, e-mail: post@mail.osu.ru

Поступила в редакцию 2 сентября 2019 г.; принята после решения редколлегии 16 сентября 2019 г.; опубликована 30 сентября 2019 г. / Received: 2 September 2019; Accepted: 16 September 2019; Published: 30 September 2019