

УДК 636.5.033

Научная статья

DOI: 10.32634/0869-8155-2024-379-2-61-65

О.В. Кван
Е.А. Сизова
И.А. Вершинина ✉

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

✉ gavrish.irina.ogu@gmail.com

Поступила в редакцию:
20.08.2023

Одобрена после рецензирования:
10.01.2024

Принята к публикации:
30.01.2024

Research article

DOI: 10.32634/0869-8155-2024-379-2-61-65

Olga V. Kvan
Elena A. Sizova
Irina A. Vershinina ✉

Federal Research Center for Biological
Systems and Agrotechnologies of the Russian
Academy of Sciences, Orenburg, Russia

✉ gavrish.irina.ogu@gmail.com

Received by the editorial office:
20.08.2023

Accepted in revised:
10.01.2024

Accepted for publication:
30.01.2024

Влияние ультрадисперсных частиц меди и железа на микробиоценоз кишечника цыплят-бройлеров

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Изучение бактериального разнообразия кишечника при воздействии различных факторов позволяет исследовать изменения качественного и количественного состава при воздействии различных факторов.

Методы. В работе был изучен бактериальный профиль образцов содержимого слепой кишки цыплят-бройлеров. Для оценки влияния ультрадисперсных частиц *Cu* и *Fe* на обмен веществ в организме животных, находящихся на полусинтетическом рационе, было отобрано 120 голов недельных цыплят-бройлеров, которых методом пар-аналогов разделили на 4 группы ($n = 30$). Во время эксперимента вся птица находилась в одинаковых условиях содержания и кормления. Продолжительность эксперимента составила 28 суток.

Для решения поставленных задач были использованы цыплята-бройлеры, которым в рацион вносились ультрадисперсные частицы *Cu* и *Fe* с целью изучения их влияния на микробиоценоз пищеварительной системы птицы. Методом пар-аналогов было сформировано 4 группы по 30 цыплят-бройлеров в каждой в возрасте 7 дней. Во время проведения исследования условия содержания и кормления были идентичны для всех групп. Исследование было проведено в течение 4 недель. Для кормления готовили полусинтетический рацион (K_1) и полусинтетический рацион, дефицитный по микроэлементам, модифицированный авторами (K_2).

Результаты. Было показано, что использование ультрадисперсных частиц меди и железа способствует изменению бактериального сообщества кишечника цыплят-бройлеров. Таким образом, исходя из данных, можно сделать вывод, что облигатные бактерии слепого кишечника птиц могут модулировать уровень накопления химических элементов в теле птицы при внесении различных веществ. Согласно полученным данным ультрадисперсные частицы железа позволили сохранить нормальное разнообразие пищеварительной микробиоты птицы, что было выражено в том числе в уменьшении численности представителей семейства *Enterobacteriaceae*, в число которых входят представители патогенных и условно-патогенных таксонов, в то время как внесение ультрадисперсных частиц меди способствовало повышению численности представителей данного семейства.

Ключевые слова: цыплята-бройлеры, ультрадисперсные частицы, медь, железо, бактериальный профиль слепой кишки, накопление химических элементов

Для цитирования: Кван О.В., Сизова Е.А., Вершинина И.А. Влияние ультрадисперсных частиц меди и железа на микробиоценоз кишечника цыплят-бройлеров. *Аграрная наука*. 2024; 379(2): 61–65. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-61-65>

© Кван О.В., Сизова Е.А., Вершинина И.А.

Influence of ultrafine particles of copper and iron on the microbiocenosis of the intestines of poultry

ABSTRACT

Relevance. Studying the bacterial diversity of the intestine under the influence of various factors makes it possible to study changes in the qualitative and quantitative composition under the influence of various factors.

Methods. In our work, we studied the bacterial profile of samples of the contents of the cecum of broiler chickens. To assess the effect of ultrafine particles of *Cu* and *Fe* on the metabolism in the body of animals fed a semi-synthetic diet, 120 heads of one-week-old broiler chickens were selected, which were divided into 4 groups ($n = 30$) using the analog pair method. During the experiment, all birds were under the same housing and feeding conditions. The duration of the experiment was 28 days. To solve the problems, broiler chickens were used, which were supplemented with ultrafine *Cu* and *Fe* particles in their diet in order to study their effect on the microbiocenosis of the poultry digestive system. Using the analogue pair method, four groups of 30 broiler chickens each at the age of 7 days were formed. During the study, housing and feeding conditions were identical for all groups. The study was conducted over 4 weeks. For feeding, we prepared a semi-synthetic diet (K_1) and a semi-synthetic diet, deficient in microelements, modified by us (K_2).

Results. The use of ultrafine copper and iron particles has been shown to alter the intestinal bacterial community of broiler chickens. Thus, based on the data, we can conclude that obligate bacteria in the cecum of birds can modulate the level of accumulation of chemical elements in the bird's body when various substances are introduced. According to the data obtained, ultrafine iron particles made it possible to maintain the normal diversity of the digestive microbiota of poultry, which was expressed, among other things, in a decrease in the number of representatives of the *Enterobacteriaceae* family, which includes representatives of pathogenic and opportunistic taxa, while the introduction of ultrafine copper particles contributed to an increase in the number of representatives of this family.

Key words: broiler chickens, ultrafine particles, copper, iron, caecum bacterial profile, accumulation of chemical elements

For citation: Kvan O.V., Sizova E.A., Vershinina I.A. The influence of ultrafine particles of copper and iron on the intestinal microbiocenosis of broiler chickens. *Agrarian science*. 2024; 379(2): 61–65 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-61-65>

© Kvan O.V., Sizova E.A., Vershinina I.A.

Введение/Introduction

Исследование генетического разнообразия бактериального сообщества пищеварительной системы птицы является инструментом, помогающим изучить влияние различных факторов на нормальное бактериальное сообщество кишечника птицы. Нормальный микробиоценоз кишечника птицы представлен совокупностью сообществ микроорганизмов, которые имеют определяющее влияние на процессы, протекающие в пищеварительной системе птиц. Прежде всего это процессы расщепления питательных веществ и их усвоения.

Известно, что различные бактерии используют разный субстрат. Так, *Ruminococcus* расщепляют сложные углеводы, например целлюлозу [1–3]. Бактериальное сообщество кишечника птиц влияет на качественный и количественный состав пищевых веществ, которые будут доступны организму сельскохозяйственной птицы, одновременно оказывая влияние на морфологию стенок кишечника, обуславливая увеличение поверхности ворсинок [4, 5]. Нормальное бактериальное сообщество кишечника птиц обуславливает и устойчивость к различным инфекционным заболеваниям, препятствуя заселению пищеварительной системы птицы патогенными бактериями [6].

На сегодняшний день остро стоит вопрос об обеспечении продовольственной безопасности и о снабжении населения высококачественной продукцией сельского хозяйства, в том числе мясом птицы [7]. При этом исследователи предлагают пересмотреть традиционные нормы кормления в части использования новых перспективных добавок, например применения ультрадисперсных частиц (УДЧ) микроэлементов. Научные данные свидетельствуют о том, что такие формы химических элементов являются более биодоступными и имеют меньшую токсичность, чем традиционно применяемые соединения в качестве кормовых добавок [8]. Существуют многочисленные исследования о влиянии УДЧ на морфобиохимические показатели цыплят-бройлеров [9–11], однако сведений о влиянии УДЧ на метагенное разнообразие пищеварительного тракта птицы недостаточно, что и предопределило цель работы.

Цель работы — исследование влияния ультрадисперсных частиц меди и железа на микробиоценоз кишечника сельскохозяйственной птицы

Материалы и методы исследования /

Materials and methods

Экспериментальные исследования на цыплятах-бройлерах кросса Арбор Айкрес проведены в условиях экспериментально-биологической клиники (вивария) ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук»¹ в 2022 году.

В экспериментальных исследованиях в качестве источников микроэлементов были использованы модифицированные УДЧ Fe, Cu, предоставленные д-ром биол. наук Н.Н. Глушенко (Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе — подразделение Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, г. Москва, Россия)².

Материаловедческая аттестация препаратов включала электронную сканирующую и просвечивающую микроскопию на приборах JSM 7401F и JEM-2000FX (JEOL, Япония).

В ходе экспериментальных исследований УДЧ были приготовлены путем диспергирования водных смесей частиц ультразвуком ($f = 35$ кГц, $N = 300$ (450) Вт, $A = 10$ мкм) в течение 30 минут. Смешивание проводилось ступенчато.

При выполнении работы были использованы цыплята-бройлеры, которым в рацион вносились УДЧ Cu и Fe с целью изучения их влияния на микробиоценоз пищеварительной системы птицы.

Методом пар-аналогов были сформированы 4 группы по 30 цыплят-бройлеров в каждой в возрасте 7 дней.

Во время проведения исследования условия содержания и кормления были идентичны для всех групп. Исследование было проведено в течение 4 недель. Для кормления готовили полусинтетический рацион (K_1), рекомендованный Scott (1969), и полусинтетический рацион (K_2), дефицитный по микроэлементам, модифицированный авторами [12].

В рацион I опытной группы вносили УДЧ Cu в концентрации 2,5 мг/кг корма, а II опытной группы — УДЧ Fe в концентрации 2,5 мг/кг корма.

Метагенное секвенирование содержимого слепых отростков толстого отдела кишечника проводили, как описано в работе [12], в ЦКП «Персистенция микроорганизмов»³ Института клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН (г. Оренбург, Россия).

Бактериальное биоразнообразие слепого отдела кишечника птицы оценивали на 42-е сутки. Для этого выделяли бактериальную ДНК путем инкубирования проб при 37 °C в течение 30 мин. в 300 мкл стерильного буфера для лизиса (20 mM EDTA, 1400 mM NaCl, 100 mM TrisHCl, pH 7,5; 50 мкл раствора лизоцима в концентрации 100 мг/мл).

Оценку чистоты ДНК проводили электрофорезом в 1,5%-ном агарозном геле с фотометрией (NanoDrop 8000, Thermo Fisher Scientific, Inc., США). Концентрацию ДНК определяли флуориметрическим методом (прибор Qubit 2.0 с высокой чувствительностью определения dsDNA, Life Technologies, США).

ДНК-библиотеки для секвенирования были созданы по протоколу Illumina, Inc. (США) с праймерами S-D-Bact-0341-b-S-17 и S-D-Bact0785-a-A-21 к варибельному участку V3-V4 гена 16S pPHK (24). NGS-секвенирование выполняли на платформе MiSeq (Illumina, Inc., США) с набором реактивов MiSeq Reagent Kit V3 PE600 (Illumina, Inc., США). Полученные операционные таксономические единицы (OTE) классифицировали с использованием интерактивного инструмента VAMPS и базы данных RDP⁴. Некоторые OTE выравнивали, используя алгоритм BLAST⁵, базы данных нуклеотидных последовательностей nr/nt (National Center for Biotechnological Information, NCBI⁶) и выровненных последовательностей генов рибосомальной РНК SILVA⁷.

Статистическую обработку данных проводили в программе Statistica 10.0 (StatSoft, Inc., США). Результаты представлены в виде средних арифметических значений (M) и стандартных ошибок среднего ($\pm SEM$). Различия

¹ <http://fncbst.ru/>

² <https://www.chph.ras.ru/index.php/9-struktura/282-obosoblennoe-strukturnoe-podrazdelenie-inepkhf>

³ <https://ikvs.info/institut/laboratorii/czkip/>

⁴ <http://rdp.cme.msu.edu>

⁵ <http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>

⁶ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov>

⁷ <https://www.arbsilva.de>

считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$ (t-критерий Стьюдента). При биоинформатической обработке результатов секвенирования применяли комплекс программ USEARCH v8.0.1623_win32⁸. Обработка включала слияние парных ридов в операционных таксономических единицах, фильтрацию ридов по качеству и длине (минимальный размер — 300 п. н.), удаление химер, даблтонов и синглтонов, кластеризацию ридов в ОТЕ на уровне сходства 97%.

Полученные данные обрабатывали с помощью программы SPSS Statistics 20 (IBM, США).

Обслуживание животных и экспериментальные исследования выполняли в соответствии с «Позицией по этике использования животных в исследованиях, выполняемых при поддержке Российского научного фонда»⁹ и The Guide for the Care and Use of Laboratory Animals (National Academy Press, Washington, D.C., 1996). При проведении исследований были предприняты усилия, чтобы свести к минимуму страдания животных и уменьшить количество используемых образцов (протокол от 21.05.2021 № 1).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Анализируя полученные данные высокопроизводительного метагеномного секвенирования, было показано, что в образцах содержимого слепой кишки цыплят-бройлеров в группе с ПР было обнаружено 188 OTU, в группе с ПДР — 204 OTU, при внесении УДЧ Cu — 225 OTU, при внесении УДЧ Fe — 161 OTU.

В содержимом слепой кишки, по данным метагеномных исследований, были обнаружены различия в качественном и количественном составе бактериального сообщества. Так, изменения в опытных группах обнаруживались как по отношению к контролю, получавшему полусинтетический рацион, так и к контролю, получавшему дефицитный по микроэлементам рацион.

Так, по отношению к первой контрольной группе, получавшей полусинтетический рацион, в I опытной группе снизилось содержание представителей *Proteobacteria* (на 64,1%) и *Actinobacteria* (на 72,5%). Одновременно с этим повысилось содержание представителей *Bacteroidetes* (на 135,1%) и *Firmicutes* (на 93,1%).

По отношению к первой контрольной группе, получавшей полусинтетический рацион, во II опытной группе снизилось содержание представителей *Proteobacteria* (на 44,1%), *Firmicutes* (на 86,2%), *Actinobacteria* (на 82,5%). Одновременно с этим повысилось содержание представителей *Bacteroidetes* (на 108,4%).

По отношению ко второй контрольной группе, получавшей полусинтетический рацион, в I опытной группе снизилось содержание представителей *Bacteroidetes* (на 9,4%). Одновременно с этим повысилось содержание представителей *Proteobacteria* (на 108,1%), *Firmicutes* (более чем в 10 раз). Содержание *Actinobacteria* осталось без изменений.

По отношению ко второй контрольной группе, получавшей полусинтетический рацион, во II опытной группе снизилось содержание представителей *Actinobacteria* (на 36,3%). Одновременно с этим повысилось содержание представителей *Proteobacteria* (на 68,4%), *Firmicutes* (на 33,3%), *Bacteroidetes* (на 19,8%).

По сравнению с таксонами, указанными выше, оценка качественного и количественного соотношения родов может также предоставить ряд данных, указывающих на

Таблица 1. Бактериальный профиль образцов содержимого слепой кишки цыплят-бройлеров на уровне рода, % от общего количества
Table 1. Bacterial profile of broiler chicken litter content samples at the genus level, % of the total

Таксон	Группы			
	K ₁	K ₂	I	II
<i>Lactobacillus</i>	32,50±5,46	4,10±1,72	4,20±1,53	0,10±0,02
<i>Bacteroides</i>	16,40±0,89	72,20±5,90	52,90±3,42	44,90±4,80
<i>unclassified</i>	13,30±0,76	7,60±0,87	10,80±1,03	9,10±1,00
<i>Alistipes</i>	11,70±0,42	4,30±0,36	16,20±1,12	13,60±0,96
<i>Faecalibacterium</i>	10,50±0,96	0,40±0,05	0,30±0,02	1,10±0,22
<i>Enterobacter</i>	2,70±0,32	0,20±0,01	4,20±0,05	0,10±0,03
<i>Mediterraneibacter</i>	2,50±0,40	2,80±0,12	0,80±0,03	4,00±0,12
<i>Limosilactobacillus</i>	1,90±0,22	0,10±0,02	1,30±0,04	15,10±1,24
<i>Ligilactobacillus</i>	1,40±0,11	0,10±0,01	0,10±0,03	0,10±0,02
<i>Intestinimonas</i>	0,30±0,04	1,60±0,03	1,10±0,10	0,50±0,03
<i>Pseudoflavonifractor</i>	0,20±0,01	1,10±0,02	0,70±0,05	0,30±0,01
<i>Coprobacter</i>	0,10±0,03	0,10±0,01	0,05±0,01	2,70±0,25
<i>Weissella</i>	0,10±0,01	0,10±0,03	0,02±0,01	2,00±0,36

процессы, протекающие в пищеварительной системе птиц. Были зафиксированы отличия как в контрольных группах, так и при внесении УДЧ (табл. 1).

В группе, получавшей полусинтетический рацион, треть всего родового разнообразия составляли *Lactobacillus*, чье содержание 32,5%. Многочисленными были представители *Bacteroidetes* (16,4%), *Alistipes* (11,7%) и *Faecalibacterium* (10,5%). Следующий пул бактерий, чье содержание в образце колебалось от 1,4 до 2,7%, был представлен такими таксонами, как *Enterobacter*, *Mediterraneibacter*, *Limosilactobacillus* и *Ligilactobacillus*. Менее 1% было содержание таких родов, как *Blautia*, *Merdimonas*, *Hydrogeniiclostridium*, *Rubneribacter*, и других. Их можно охарактеризовать как минорных представителей микробиоценоза слепой кишки цыплят-бройлеров.

В контрольной группе, которая получала рацион, дефицитный по микроэлементам, наибольшее содержание было выявлено для таксона *Bacteroides*. По сравнению с первой контрольной группой его содержание было выше в 4,4 раза. Вторым по численности таксоном в группе K₂ являлся род *Alistipes*, чье содержание было в 2,7 раза меньше, чем в группе K₁. Содержание *Lactobacillus* в образце было в 7,9 раза меньше, чем в первой контрольной группе. Среди таксонов, чья численность была выше 1%, можно отметить *Mediterraneibacter*, *Intestinimonas*, *Merdimonas* (1,5%) и *Pseudoflavonifractor*.

Изучая микробиоценоз слепой кишки при даче цыплятам-бройлерам УДЧ меди, было показано, что преобладающим родом являлся *Bacteroides*. Его содержание было в 3,2 раза выше, чем в первой контрольной группе, и в 1,4 раза ниже, чем во второй контрольной группе. Следующим по содержанию в образце стал род *Alistipes*, чье содержание в 1,4 раза и 3,7 раза превосходило таковые значения при даче полусинтетического рациона и рациона, дефицитного по микроэлементам, соответственно.

По сравнению с контрольными группами при даче УДЧ меди была высока доля бактерий *Enterobacter*

⁸ <https://www.drive5.com/usearch/download.html>

⁹ https://rscf.ru/fondfiles/PotE_rus.pdf

в 1,8 раза и более чем в 20 раз выше, чем в первой и второй контрольных группах, соответственно. В число бактерий с долей выше 1% вошли представители *Limosilactobacillus* и *Intestinomonas*.

При внесении в рацион цыплятам-бройлерам УДЧ железа в образцах слепой кишки, как и при даче УДЧ меди, доминировали представители *Bacteroides*. Их содержание было выше в 2,7 раза, чем в первой контрольной группе, и в 1,6 раза ниже, чем во второй контрольной группе, соответственно.

По отношению к группе с внесением УДЧ меди содержание *Bacteroides* снизилось в 1,2 раза. На втором месте по численности оказались бактерии рода *Limosilactobacillus*, чье содержание было выше в 8 раз и в 11,6 раза выше, чем в первой контрольной группе и группе с внесением УДЧ меди. Содержание *Alistipes* превосходило в 1,16 раза и в 3,1 раза таковые значения в первой и второй контрольных группах соответственно. Однако по сравнению с группой с внесением УДЧ меди содержание таксона уменьшилось в 1,2 раза. Среди таксонов, чья численность была выше 1%, стоит отметить *Mediterraneibacter*, *Coproacter*, *Weissella* и *Faecalibacterium*.

Было отмечено, что добавление в рацион цыплят-бройлеров УДЧ меди при повышении содержания *Bacteroides* одновременно увеличивало накопление в теле птицы таких элементов, как кобальт ($r = 0,91$) и никель ($r = 0,92$). При этом внесение дополнительного источника железа, в качестве которого выступали УДЧ, повышение содержания *Bacteroides* одновременно увеличивало накопление в теле птицы таких элементов, как кальций ($r = 0,57$) и кобальт ($r = 0,91$).

Исходя из данных, можно сделать вывод, что облигатная микрофлора слепого кишечника птиц может модулировать уровень накопления химических элементов в теле птицы при внесении различных веществ. Это открывает новые перспективы в разработке технологий по управлению накоплением химических элементов в теле цыплят-бройлеров.

Обобщая представленные результаты в научной литературе, можно отметить, что схожие результаты по преобладанию таксонов (*Lactobacillus*, *Bacteroidetes*, *Alistipes* и *Faecalibacterium*) в кишечнике цыплят-бройлеров были получены в [13–15].

Согласно полученным данным, УДЧ железа позволили сохранить нормальное разнообразие пищеварительной системы птицы, что было выражено в уменьшении численности представителей семейства *Enterobacteriaceae*, в число которых входят представители патогенных и условно-патогенных бактерий, в то время как внесение УДЧ меди способствовало повышению численности представителей данного семейства.

При этом стоит отметить, что в контрольной группе, получавшей полусинтетическую диету, преобладали молочнокислые бактерии рода *Lactobacillus*. Однако во всех других группах их количество было гораздо ниже, что может быть связано с дефицитом микроэлементов.

При этом на полусинтетическом рационе численность *Bacteroides* была ниже, чем в других группах. Известно, что данные бактерии обладают ферментами для расщепления крахмалистых полисахаридов (например, амилазы), что указывает на более полное метаболизирование птицей легкогидролизуемых компонентов кормов [16]. То есть внесением УДЧ меди и железа можно модулировать интенсивность и направление пищеварительных процессов. Вышесказанное справедливо и для динамики численности *Alistipes* в эксперименте.

Отметим, что в группах, получавших рацион К2 и УДЧ меди и железа, было снижено число бактерий рода *Faecalibacterium*. Данные бактерии играют ключевую роль в поддержании здоровья кишечника и являются важным регулятором экспрессии генов, воспаления, дифференцировки и апоптоза в клетках-хозяевах [17]. Однако увеличение численности *Enterobacter*, которые относятся к патогенным микроорганизмам, было зафиксировано только при даче УДЧ меди, а при даче УДЧ железа отмечали снижение численности, что позволяет говорить о необходимости дальнейшего изучения возможности внесения УДЧ в рацион птицы при дефицитных рационах.

В эксперименте наблюдали увеличение численности бактерий филума *Bacteroidetes* при даче УДЧ, при этом известно, что данные бактерии способны стимулировать пищеварение в кишечнике, поскольку они играют фундаментальную роль в гидролизе сложных молекул до более простых [18].

Накопление представителями *Bacteroidetes* различных химических элементов может быть связано с механизмом конкурентного поглощения химических элементов [19].

В дальнейшем изучение корреляции накопления химических элементов с определенными таксонами бактерий может быть использовано для технологий кормления с целью коррекции минерального статуса птицы.

Выводы/Conclusion

Использование УДЧ меди и железа способствует изменению бактериального сообщества кишечника цыплят-бройлеров.

Таким образом, исходя из данных, можно сделать вывод, что облигатные микроорганизмы слепого кишечника птиц могут модулировать уровень накопления химических элементов в теле птицы при внесении различных веществ. Это открывает новые перспективы в разработке технологий по управлению накоплением химических элементов в теле цыплят-бройлеров.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-16-00078П.
<https://rscf.ru/project/23-16-45005/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Qi Z., Shi S., Tu J., Li S. Comparative metagenomic sequencing analysis of cecum microbiota diversity and function in broilers and layers. *3 Biotech*. 2019; 9: 316.
<https://doi.org/10.1007/s13205-019-1834-1>

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

FUNDING

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant No. 20-16-00078P.
<https://rscf.ru/project/23-16-45005/>

REFERENCES

1. Qi Z., Shi S., Tu J., Li S. Comparative metagenomic sequencing analysis of cecum microbiota diversity and function in broilers and layers. *3 Biotech*. 2019; 9: 316.
<https://doi.org/10.1007/s13205-019-1834-1>

2. Alvarenga B.O., Paiva J.B., Souza A.I.S., Rodrigues D.R., Tizioto P.C., Piantino Ferreira A.J. Metagenomics analysis of the morphological aspects and bacterial composition of broiler feces. *Poultry Science*. 2023; 102(2): 102401. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102401>
3. Qiu K., Wang X., Zhang H., Wang J., Qi G., Wu S. Dietary Supplementation of a New Probiotic Compound Improves the Growth Performance and Health of Broilers by Altering the Composition of Cecal Microflora. *Biology*. 2022; 11(5): 633. <https://doi.org/10.3390/biology11050633>
4. Сковцова Л.Н. Функции микрофлоры желудочно-кишечного тракта сельскохозяйственной птицы. *Научный журнал КубГАУ*. 2020; 161: 44–51. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-161-005>
5. Мёрфи Р. Нормализация функции кишечника. *Животноводство России*. 2019; (10): 49–51. <https://www.elibrary.ru/bxxqwy>
6. Майлян Э.С. Проблема использования антибиотиков в животноводстве и пути контроля микробной антибиотикорезистентности. *БИО*. 2021; (12): 4–16. <https://www.elibrary.ru/prglpy>
7. Магомедов М.Д., Алексеичева Е.Ю., Карабанова О.В. Обеспечение продовольственной безопасности на рынке мяса птицы и мясных продуктов. *Мясная индустрия*. 2022; (5): 7–13. <https://doi.org/10.37861/2618-8252-2022-05-07-13>
8. Мирошникова Е.П., Русакова Е.А., Кван О.В., Рахматуллин Ш.Г. Влияние комплекса ультрадисперсных металлов-микроэлементов и пробиотического препарата на обмен веществ и интерьерные особенности цыплят-бройлеров. *Животноводство и кормопроизводство*. 2020; 103(1): 33–46. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-1-33>
9. Гарипова Н.В., Рязанов В.А. Ультрадисперсные частицы железа в животноводстве (обзор). *Микроэлементы в медицине*. 2022; 23(4): 3–13. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2022-23-4-3-13>
10. Сизова Е.А., Мирошников С.А., Лебедев С.В., Левахин Ю.И., Бабичева И.А., Косилов В.И. Сравнительные испытания ультрадисперсного сплава, солей и органических форм Си и Zn как источников микроэлементов в кормлении цыплят-бройлеров. *Сельскохозяйственная биология*. 2018; 53(2): 393–403. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.2.393rus>
11. Макаева А.М. Биологическая экспертиза перспективных для использования в животноводстве препаратов ультрадисперсных частиц микроэлементов. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2019; (2): 236–239. <https://www.elibrary.ru/xjpppw>
12. Кван О.В., Сизова Е.А., Вершинина И.А., Камирова А.М. Минеральный обмен и микробное разнообразие слепого отдела кишечника у цыплят-бройлеров (*Gallus gallus* L.) при включении в полусинтетический рацион пищевых волокон. *Сельскохозяйственная биология*. 2023; 58(4): 700–712. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.4.700rus>
13. Fan Y., Ju T., Bhardwaj T., Korver D.R., Willing B.P. Week-Old Chicks with High *Bacteroides* Abundance Have Increased Short-Chain Fatty Acids and Reduced Markers of Gut Inflammation. *Microbiology Spectrum*. 2023; 11(2): e03616-22. <https://doi.org/10.1128/spectrum.03616-22>
14. Du W., Deng J., Yang Z., Zeng L., Yang X. Metagenomic analysis reveals linkages between cecal microbiota and feed efficiency in Xiayan chickens. *Poultry Science*. 2020; 99(12): 7066–7075. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.09.076>
15. Soundararajan S., Selvakumar J., Maria Joseph Z.M., Gopinath Y., Saravanan V., Santhanam R. Investigating the modulatory effects of *Moringa oleifera* on the gut microbiota of chicken model through metagenomic approach. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023; 10: 1153769. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1153769>
16. Фисинин В.И. и др. Бактериальное сообщество слепых отростков кишечника цыплят-бройлеров на фоне питательных рационов различной структуры. *Микробиология*. 2016; 85(4): 472–480. <https://doi.org/10.7868/S0026365616040054>
17. Huang Y., Lv H., Song Y., Sun C., Zhang Z., Chen S. Community composition of cecal microbiota in commercial yellow broilers with high and low feed efficiencies. *Poultry Science*. 2021; 100(4): 100996. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.01.019>
18. Wexler H.M. *Bacteroides*: the Good, the Bad, and the Nitty-Gritty. *Clinical Microbiology Reviews*. 2007; 20(4): 593–621. <https://doi.org/10.1128/CMR.00008-07>
19. Zhu X., Yellezuome D., Liu R., Wang Z., Liu X. Effects of co-digestion of food waste, corn straw and chicken manure in two-stage anaerobic digestion on trace element bioavailability and microbial community composition. *Bioresource Technology*. 2022; 346: 126625. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126625>
2. Alvarenga B.O., Paiva J.B., Souza A.I.S., Rodrigues D.R., Tizioto P.C., Piantino Ferreira A.J. Metagenomics analysis of the morphological aspects and bacterial composition of broiler feces. *Poultry Science*. 2023; 102(2): 102401. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102401>
3. Qiu K., Wang X., Zhang H., Wang J., Qi G., Wu S. Dietary Supplementation of a New Probiotic Compound Improves the Growth Performance and Health of Broilers by Altering the Composition of Cecal Microflora. *Biology*. 2022; 11(5): 633. <https://doi.org/10.3390/biology11050633>
4. Skvortsova L.N. Functions of microflora of the gastrointestinal tract of poultry. *Scientific Journal of KubSAU*. 2020; 161: 44–51 (in Russian). <https://doi.org/10.21515/1990-4665-161-005>
5. Murphy R. Normalization of intestine function. *Animal Husbandry of Russia*. 2019; (10): 49–51 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/bxxqwy>
6. Mailyan E.S. The problem of using antibiotics in animal husbandry and ways to control microbial antibiotic resistance. *BIO*. 2021; (12): 4–16 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/prglpy>
7. Magomedov M.D., Alekseycheva E.Yu., Karabanova O.V. Assurance of food security on the market of poultry meat and meat products. *Meat industry journal*. 2022; (5): 7–13 (in Russian). <https://doi.org/10.37861/2618-8252-2022-05-07-13>
8. Miroshnikova E.P., Rusakova E.A., Kwan O.V., Rakhmatullin Sh.G. The effect of a complex of ultrafine metal microelements and a probiotic preparation on metabolism and interior peculiarities of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020; 103(1): 33–46 (in Russian). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-1-33>
9. Garipova N.V., Ryazanov V.A. Ultrafine iron particles in animal husbandry (a review). *Trace elements in medicine*. 2022; 23(4): 3–13 (in Russian). <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2022-23-4-3-13>
10. Sizova E.A., Miroshnikov S.A., Lebedev S.V., Levakhin Yu.I., Babicheva I.A., Kosilov V.I. Comparative tests of various sources of microelements in feeding chicken-broilers. *Agricultural Biology*. 2018; 53(2): 393–403. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.2.393eng>
11. Makaeva A.M. Biological expert examination of ultrafine particles of microelements that are promising for use in animal husbandry. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2019; (2): 236–239 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/xjpppw>
12. Kwan O.V., Sizova E.A., Vershinina I.A., Kamirova A.M. Effects of dietary fiber on mineral metabolism and caecal microbial diversity in broiler chickens (*Gallus gallus* L.) fed a semi-synthetic diet. *Agricultural Biology*. 2023; 58(4): 700–712. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.4.700eng>
13. Fan Y., Ju T., Bhardwaj T., Korver D.R., Willing B.P. Week-Old Chicks with High *Bacteroides* Abundance Have Increased Short-Chain Fatty Acids and Reduced Markers of Gut Inflammation. *Microbiology Spectrum*. 2023; 11(2): e03616-22. <https://doi.org/10.1128/spectrum.03616-22>
14. Du W., Deng J., Yang Z., Zeng L., Yang X. Metagenomic analysis reveals linkages between cecal microbiota and feed efficiency in Xiayan chickens. *Poultry Science*. 2020; 99(12): 7066–7075. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.09.076>
15. Soundararajan S., Selvakumar J., Maria Joseph Z.M., Gopinath Y., Saravanan V., Santhanam R. Investigating the modulatory effects of *Moringa oleifera* on the gut microbiota of chicken model through metagenomic approach. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023; 10: 1153769. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1153769>
16. Fisinin V.I. et al. Broiler chicken cecal microbiocenoses depending on mixed fodder. *Microbiology*. 2016; 85(4): 493–499. <https://doi.org/10.1134/S0026261716040056>
17. Huang Y., Lv H., Song Y., Sun C., Zhang Z., Chen S. Community composition of cecal microbiota in commercial yellow broilers with high and low feed efficiencies. *Poultry Science*. 2021; 100(4): 100996. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.01.019>
18. Wexler H.M. *Bacteroides*: the Good, the Bad, and the Nitty-Gritty. *Clinical Microbiology Reviews*. 2007; 20(4): 593–621. <https://doi.org/10.1128/CMR.00008-07>
19. Zhu X., Yellezuome D., Liu R., Wang Z., Liu X. Effects of co-digestion of food waste, corn straw and chicken manure in two-stage anaerobic digestion on trace element bioavailability and microbial community composition. *Bioresource Technology*. 2022; 346: 126625. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126625>

ОБ АВТОРАХ

Ольга Вилориевна Кван

кандидат биологических наук

kwan111@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>

Елена Анатольевна Сизова

доктор биологических наук

sizova.l78@yandex.ru

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

Ирина Александровна Вершинина

младший научный сотрудник

gavrish.irina.ogu@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9377-7673>

Федеральный научный центр биологических систем

и агротехнологий Российской академии наук

ул. 9 Января, 29, Оренбург, 460000, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Olga Vilorieva Kvan

Candidate of Biological Sciences

kwan111@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>

Elena Anatolyevna Sizova

Doctor of Biological Sciences

sizova.l78@yandex.ru

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

Irina Alexandrovna Vershinina

Junior Researcher

gavrish.irina.ogu@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9377-7673>

Federal Scientific Center for Biological Systems and Agrotechnologies

of the Russian Academy of Sciences

29 January 9th Str., Orenburg, 460000, Russia