

Е.В. Яушева¹ ✉
Т.Н. Холодилина^{1, 2}
К.В. Рязанцева¹
Е.А. Сизова^{1, 2}
Т.А. Климова¹

¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

²Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

✉ vasilena56@mail.ru

Поступила в редакцию:
21.04.2024

Одобрена после рецензирования:
12.07.2024

Принята к публикации:
28.07.2024

Research article

DOI: 10.32634/0869-8155-2024-385-8-74-81

Elena V. Yausheva¹ ✉
Tatiana N. Kholodilina^{1, 2}
Christina V. Ryazantseva¹
Elena A. Sizova^{1, 2}
Tatiana A. Klimova¹

¹Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

²Orenburg State University, Orenburg, Russia

✉ vasilena56@mail.ru

Received by the editorial office:
21.04.2024

Accepted in revised:
12.07.2024

Accepted for publication:
28.07.2024

Оценка влияния скармливания совместно экструдированных компонентов рациона на переваримость корма, кишечный микробиом и обмен остеотропных элементов у цыплят-бройлеров

РЕЗЮМЕ

Аннотация. Отруби, как источник клетчатки в рационах, уже не воспринимаются как антипитательный компонент, напротив, рассматривается как пребиотик, стимулирующий работу кишечного микробиома и фактор снижающий стоимость рациона. При этом сохраняется необходимость нивелирования некоторых негативных аспектов в виде повышения количества труднопереваримой клетчатки и снижения усвоения минеральных элементов из рационов, в частности кальция.

Методы. Методом снижения антипитательности и улучшения функциональных свойств кормов, обладающих повышенной доступностью компонентов, может выступать экструзия.

Цели исследования — изучение влияния скармливания совместно экструдированных компонентов рациона: пшеничных отрубей и известняковой муки на переваримость корма, морфометрические характеристики желудочно-кишечного тракта и состояние его микробиома, а также метаболизм созависимых с кальцием минералов в скелетной структуре.

Результаты. Совместное экструдирование пшеничных отрубей и известняковой муки, как источника кальция, приводило к улучшению переваримости питательных веществ (сырого жира) у птицы. Анализ минерального обмена показал увеличение содержания железа, цинка и магния в костной ткани, кальция, цинка, меди и магния — в бедренной кости птицы II группы в сравнении с I. Изменения в микробиоме слепой кишки при скармливании экструдата с карбонатом кальция были связаны с повышением доли бактерий (*Faecalibacterium*), являющихся активными продуцентами ряда короткоцепочечных жирных кислот (пропионата, бутирата). В результате показана перспектива использования совместно экструдированных компонентов: углеводного (отруби) и минерального (известняковая мука) в кормах в рамках функциональной и экономической оптимизации рационов.

Ключевые слова: экструзия, известняковая мука, переваримость, микробиом, минеральный обмен

Для цитирования: Яушева Е.В., Холодилина Т.Н., Рязанцева К.В., Сизова Е.А., Климова Т.А. Оценка влияния скармливания совместно экструдированных компонентов рациона на переваримость корма, кишечный микробиом и обмен остеотропных элементов у цыплят-бройлеров. *Аграрная наука*. 2024; 385(8): 74–81.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-385-8-74-81>

© Яушева Е.В., Холодилина Т.Н., Рязанцева К.В., Сизова Е.А., Климова Т.А.

Evaluation of the effect of feeding co-extruded diet components on feed digestibility, intestinal microbiome and metabolism of osteotropic elements in broiler chickens

ABSTRACT

Annotation. Bran, as a source of fiber in diets, is no longer perceived as an anti-nutritional component; on the contrary, it is considered as a prebiotic, stimulating the functioning of the intestinal microbiome and a factor reducing the cost of the diet. At the same time, there remains a need to level out some negative aspects in the form of an increase fiber for and a decrease in the absorption of mineral elements from diets, in particular calcium.

Methods. Extrusion can be a method of reducing antinutritional properties and improving the functional properties of feeds with increased availability of components. The purpose of the study was to study the effect of feeding co-extruded diet components: wheat bran and limestone flour on feed digestibility, morphometric characteristics of the gastrointestinal tract and the state of its microbiome, as well as the metabolism of calcium-codependent minerals in the skeletal structure.

Results. The combined extrusion of wheat bran and limestone flour, as a source of calcium, led to improved digestibility of nutrients (crude fat) in poultry. Analysis of mineral metabolism showed an increase in the content of iron, zinc and magnesium in bone tissue, and calcium, zinc, copper and magnesium in the femur of birds of group II in comparison with I. Changes in the microbiome of the cecum, when feeding extrudate with calcium carbonate, were associated with an increase in the proportion of bacteria (*Faecalibacterium*), which are active producers of a number of short-chain fatty acids (propionate, butyrate). As a result, the prospect of using jointly extruded components: carbohydrate (bran) and mineral (limestone flour) in feeds as part of the functional and economic optimization of diets is shown.

Key words: extrusion, limestone flour, digestibility, microbiome, mineral metabolism

For citation: Yausheva E.V., Kholodilina T.N., Ryazantseva K.V., Sizova E.A., Klimova T.A. Evaluation of the effect of feeding co-extruded diet components on feed digestibility, intestinal microbiome and metabolism of osteotropic elements in broiler chickens. *Agrarian science*. 2024; 385(8): 74–81 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-385-8-74-81>

© Yausheva E.V., Kholodilina T.N., Ryazantseva K.V., Sizova E.A., Klimova T.A.

Введение/Introduction

Подход к разработке рационов для современных высокопродуктивных кроссов должен учитывать не только сбалансированность компонентов рациона по питательности и элементному составу, но и биодоступность [1, 2]. Повышение подготовленности компонентов корма для расщепления в желудочно-кишечном тракте представляет собой перспективное направление в рамках совершенствования рационов для сельскохозяйственных животных. Состояние желудочно-кишечного тракта и эффективность процессов пищеварения напрямую зависит от степени подготовленности рационов к ферментации [3, 4].

В решении данного вопроса интерес вызывают исследования, связанные с пересмотром роли сложно-растворимых пищевых волокон в составе рациона и их влиянии на степень усвоения питательных веществ [5]. Современные подходы к изучению значимости клетчатки в рационах птиц позволили расширить границы применения трудногидролизуемых углеводов в промышленном птицеводстве [6–8].

Клетчатка в рационах уже не воспринимается как антипитательный фактор, напротив, рассматривается как пребиотик, стимулирующий работу кишечного микробиома на выработку необходимых организму птицы летучих жирных кислот [5, 9–11]. При этом нельзя не учитывать необходимость ингибирования фитиновых кислот в растительном сырье для нивелирования негативного действия в виде снижения усвоения минеральных элементов из рационов, в частности *Ca*, *Fe*, *Zn* [12–14].

Особенно актуально это при использовании в рационах таких распространенных компонентов, как пшеничные отруби [15].

Одним из передовых методов снижения антипитательных свойств и получения функциональных кормов является экструзия [16]. Однако использование экструдированных кормов оказывает значительное влияние на доступность микро- и макроэлементов в составе рационов. Известны данные о возможности сорбции химических элементов экструдатами [17, 18]. Экструзионная обработка зерновых культур способна приводить к снижению усвоения кальция у животных и его отложения в бедренной кости [19].

Ранее проведенные авторами исследования показали эффективность применения кормов, обработанных экструзией и обогащенных высокодисперсными металлами, как результат — повышение биологической доступности ряда микроэлементов и улучшения показателя переваримости компонентов рациона [20].

В связи с этим дополнение экструдированных кормов рядом важных элементов для роста и развития сельскохозяйственных животных, в особенности кальция, является необходимым условием при формировании полноценных рационов [21]. Являясь минеральной основой организма, кальций принимает участие во многих биологических процессах, а именно в развитии и минерализации костей, метаболизме других элементов [22].

Введение в экструдат кальция и создание препаратов с лучшей доступностью остеотропных минералов особенно актуально для птицеводства, так как увеличение генетического потенциала приводит к интенсивному наращиванию мышечной массы, создавая дополнительную нагрузку на скелет [23]. Травмы, деформации костной

ткани снижают показатели продуктивности, поражая до половины промышленного стада птицефабрик [24].

Таким образом, учитывая перспективы применения экструдированной клетчатки в рационах, важной составляющей при ее использовании будет являться не только изучение физиологического состояния организма животного, но и оценка динамики элементного статуса мышечной и костной ткани.

Цели исследования — изучение влияния скармливания совместно экструдированных компонентов рациона: пшеничных отрубей и известняковой муки на переваримость корма, морфометрические характеристики желудочно-кишечного тракта и состояние его микробиома, а также метаболизм созависимых с кальцием минералов в скелетной структуре.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования были проведены в виварии Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук в 2023 году на цыплятах-бройлерах кросса Арбор Айкрос.

Методом пар-аналогов цыплят в возрасте 11 суток распределили на 2 группы ($n = 30$). В возрасте 18 суток в рационе цыплят-бройлеров опытных групп заменили 10% (100 г/кг рациона) зерна пшеницы на экструдат пшеничных отрубей. Источником кальция в эксперименте служила известняковая мука (ООО «Аккерман цемент», Россия), имеющая в составе 40% кальция в форме CaCO_3 , которая в рацион I группы была внесена в нативном виде, в рацион цыплят-бройлеров II группы известняковую муку вносили после совместного с отрубями процесса экструдирования.

Кормление птиц проводилось полнорационными комбикормами (ОАО «Оренбургский комбикормовый завод», ГОСТ 18221-2018¹, Россия) согласно рекомендациям ВНИТИП².

Экструзионная обработка исследуемых компонентов проводилась по методике, описанной авторами ранее [25]. Балансовый опыт по оценке переваримости питательных веществ рациона и элементного (*Ca*, *Zn*, *Cu*, *Fe*, *P*, *Mn*, *Mg*) состава биоматериалов проводили двукратно (стартовый и ростовой рационы) в Центре коллективного пользования биологических систем и агротехнологий Российской академии наук по общепринятым методикам^{3–4}.

Элементный анализ осуществляли на одноквадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7900 ICP-MS (Agilent, США). Анализ *Fe* и *Zn* проводили в гелиевом режиме с использованием столкновительной ячейки. Стандартные растворы получали из мультисольной смеси (Merck, Германия).

Взвешивание органов желудочно-кишечного тракта (желудок, мышечный желудок, кишечник) проводили на полумикровесцах ВЛА-135М (класс точности I, «Госметр», Россия), отбор содержимого слепой кишки — в возрасте 42 суток ($n = 3$) с каждой группы во время убоя.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования выполняли в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельного закона Межпарламентской Ассамблеи государств — участников Содружества Независимых Государств

¹ ГОСТ 18221-2018 Комбикорма полнорационные для сельскохозяйственной птицы. Общие технические условия.

² Егоров И.А., Манукян В.А., Ленкова Т.Н. и др. Руководство по кормлению сельскохозяйственной птицы. Сергиев Посад: Лика». 2019; 200.

³ Научные основы кормления сельскохозяйственной птицы / В.И. Фисинин, И.А. Егоров, Т.М. Околелова, Ш.И. Имагулов. Сергиев Посад. 2008; 351.

⁴ ГОСТ 31675-2012 Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации.

«Об обращении с животными», статья 20⁵, Руководства по работе с лабораторными животными Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук. Методика проведения исследований одобрена этическим комитетом Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук⁶. При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Подготовку библиотек ДНК, секвенирование и биоинформационную обработку проводили в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Персистенция микроорганизмов» Института клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН (г. Оренбург, Россия), выделение тотальной ДНК из образцов — комбинированным методом, включавшим механическую гомогенизацию в анализаторе LT (Qiagen, Германия) с лизирующей матрицей Y (MP Biomedicals, США) с использованием набора QIAamp Fast DNA Stool Mini Kit (Qiagen, Германия).

Чистоту ДНК и концентрацию контролировали с помощью фотометрии на приборе NanoDrop 8000 (Thermo Fisher Scientific Inc., США) и флуорометра Qubit 4 (Life Technologies, США) с набором для высокочувствительного анализа dsDNA (Life Technologies, США).

Библиотеки ДНК были очищены с использованием гранул Agencourt AMPure XP (Beckman Coulter, США) и проверены с помощью капиллярного электрофореза в усовершенствованной системе Qiaxcel (Qiagen, Hilden, Германия) с использованием набора для скрининга ДНК QIAxcel (Qiagen, Hilden, Германия). Секвенирование проводили на платформе MiSeq (Illumina, США) с использованием набора реактивов MiSeqReagent Kit V3 2×300 (Illumina, США).

Визуализацию результатов биоинформатической обработки и статистический анализ осуществляли с помощью MicrobiomeAnalyst [26]. Полученные операционные таксономические единицы (ОТЕ) после фильтрации и присвоения таксономической принадлежности использовались для расчета альфа- (индекс Chao1, индекс Фишера (Fisher's alpha), индекс разнообразия Шеннона (Shannon), индекс разнообразия Симпсона (Simpson), статистический метод: ANOVA) и бета- (метод ординации: NMDS; дистанционный метод: индекс Брея — Кертиса; статистический метод: PERMANOVA) разнообразия.

Статистический анализ проводили с помощью офисного программного комплекса Microsoft Office с применением программы Excel (Microsoft, США) с обработкой данных в Statistica 10.0 (StatSoft Inc., США). Достоверными считали результаты при $p \leq 0,05$ (по t-критерию Стьюдента).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Развитие производства кормов возможно за счет повышения качества продукции и снижения себестоимости производства комбикормов. Качество можно улучшить, используя метод экструзии, который повышает пищевую ценность корма. Экструзия вызывает большую модификацию углеводов, белков и жиров, изменяя физические, химические и питательные свойства за счет повышенных температур производства (до 150 °C) [27].

Переваримость является важным показателем, отражающим степень усвоения питательных веществ и темпы роста животных. При добавлении в рацион цыплят-бройлеров совместно экструдированных пшеничных отрубей с известняковой мукой наблюдались изменения в отдельных показателях усвояемости корма на 7-е сутки балансового эксперимента (рис. 1).

Так, у цыплят II группы переваримость сухого вещества (СВ) находилась на уровне 71,2%, что на 5,6% ($p \leq 0,05$) ниже показателей I группы, где птица получала с кормом экструдат отрубей без известняковой муки. Однако по окончании эксперимента дополнительная корректировка рациона экструдированными с известняковой мукой и пшеничными отрубями приводила к достоверному повышению переваримости сырого жира (СЖ) на 8,5% ($p \leq 0,05$) во II группе при сравнении с I группой (рис. 2).

Различий по переваримости СВ, органического вещества (ОВ), сырого протеина (СП), сырой клетчатки (СК), безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) и углеводов между группами отмечено не было.

Ранее проведенные авторами исследования показали, что использование экструдированной клетчатки разной полисахаридной природы в рационе приводило к увеличению показателей переваримости сырого жира у птицы в сравнении с использованием клетчатки в нативном виде [28].

Известно, что фитиновые кислоты содержатся в высоком количестве в пшеничных отрубях и при взаимодействии с кальцием и рядом других элементов (Zn, Co,

Рис. 1. Коэффициенты переваримости питательных веществ рациона (возраст 28 суток)
Примечание: ^a $p \leq 0,05$.

Fig. 1. Digestibility coefficients of nutrients in the starter diet (age 28 days)
Note: ^a $p \leq 0,05$.

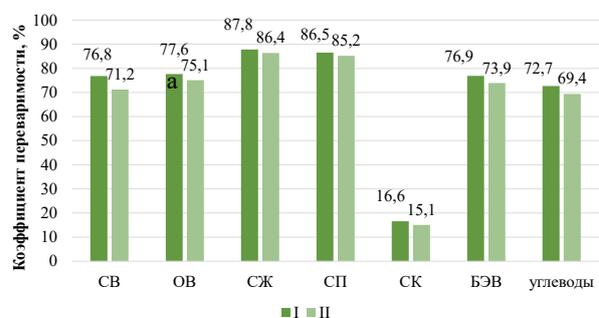
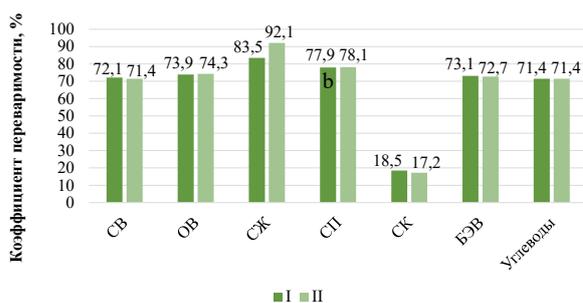


Рис. 2. Коэффициенты переваримости питательных веществ рациона (возраст 42 суток)
Примечание: ^b $p \leq 0,05$.

Fig. 2. Digestibility coefficients of nutrients in the growth diet (age 42 days)
Note: ^b $p \leq 0,05$.



⁵ Постановление Межпарламентской Ассамблеи государств — участников Содружества Независимых Государств СНГ от 31 октября 2007 года № 29-17. Модельный закон «Об обращении с животными».

⁶ Протокол ФНЦ БСТ РАН от 16.06.2023 № 2.

Mn, Fe и др.) образуют комплексы, устойчивые к ферментативному гидролизу, тем самым снижая усвояемость питательных веществ [29, 30]. Однако не было отмечено достоверного снижения переваримости питательных веществ по окончании исследования.

В данном исследовании обогащение рациона, содержащего экструдированные компоненты разных функциональных групп кормов, способствовало улучшению переваримости сырого жира у птицы в сравнении с отрубями, подвергнутыми барогидротермической обработке.

Было отмечено, что исследуемый фактор не оказывает влияния на морфометрические показатели органов пищеварительного тракта цыплят-бройлеров (табл. 1).

Масса отдельных органов пищеварительного тракта опытных групп имела схожие значения. Различий по массе костной ткани между группами не отмечалось.

Увеличение переваримости питательных веществ сопровождалось изменениями в минеральном обмене в костной ткани. Элементный анализ костной ткани показал наличие увеличения содержания железа ($p \leq 0,001$), цинка ($p \leq 0,01$) и Mg ($p \leq 0,05$) во II группе (табл. 2).

Различий по содержанию кальция и фосфора в костной ткани не отмечалось между группами (рис. 3).

Исследование элементного состава бедренной кости показало более высокую концентрацию цинка ($p \leq 0,01$) и магния ($p \leq 0,001$) во II группе в сравнении с I (табл. 3). Наблюдалась незначительное увеличение концентрации меди ($p \leq 0,001$) в бедренной кости птицы опытной группы относительно контрольной. При оценке содержания железа в бедренной кости, в отличие от костной ткани, наблюдалась тенденция к снижению его концентрации, однако достоверных изменений не выявлено.

Скармливание совместно экструдированных пшеничных отрубей с известняковой мукой приводило к увеличению содержания кальция ($p \leq 0,05$) в бедренной кости птицы, тогда как уровень фосфора не изменялся.

Принимая во внимание данные о том, что увеличение содержания кальция в рационе приводит к формированию Са-Р комплексов, которые снижают усвоение фосфора, авторами не было отмечено изменений содержания данного элемента в костной ткани [31]. Введение в рацион бикомпонентной экструдированной добавки способствовало лучшему усвоению ряда минеральных веществ, в том числе тех, которые имеют высокое сродство к фитиновой кислоте [32]. Предполагаем, что

Рис. 3. Содержание кальция и фосфора в костной ткани и бедренной кости в конце эксперимента
Примечание: а) $p \leq 0,05$.

Fig. 3. Calcium and phosphorus content in bone tissue and femur at the end of the experiment
Note: a) $p \leq 0,05$.

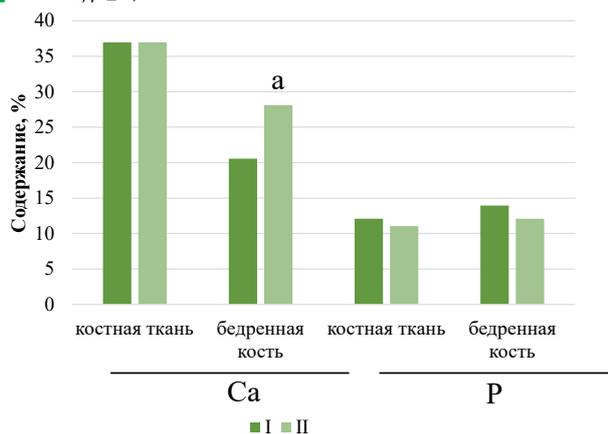


Таблица 1. Масса органов пищеварительного тракта и костной ткани цыплят-бройлеров, г

Table 1. Weight of digestive tract organs and bone tissue of broiler chickens, g

Органы и ткани	Группа	
	I	II
Мышечный желудок	36,70 ± 4,31	37,30 ± 1,11
Железистый желудок	10,90 ± 1,14	9,62 ± 0,41
Кишечник	92,30 ± 3,61	94,30 ± 5,36
Костная ткань (без бедренной кости)	285,61 ± 32,49	285,4 ± 26,05
Бедренная кость	30,65 ± 2,39	32,45 ± 3,54

Таблица 2. Содержание химических элементов в костной ткани (без бедренной кости)

Table 2. Content of chemical elements in bone tissue (without femur)

Элемент	Группа	
	I	II
мг/массу тканей		
Fe	4,18 ± 0,48	6,94 ± 0,63***
Cu	0,18 ± 0,02	0,18 ± 0,02
Zn	20,70 ± 2,36	30,90 ± 2,82**
Mn	0,67 ± 0,08	0,55 ± 0,05
г/массу тканей		
Mg	81,91 ± 9,32	107,00 ± 9,77*

Примечание: * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$.

Таблица 3. Концентрация химических элементов в бедренной кости цыплят-бройлеров

Table 3. Concentration of chemical elements in the femur of broiler chickens

Элемент	Группа	
	I группа	II группа
мг/массу тканей органа		
Fe	3,950 ± 0,310	3,180 ± 0,31
Cu	0,030 ± 0,002	0,034 ± 0,003***
Zn	4,350 ± 0,340	5,350 ± 0,519***
Mn	0,070 ± 0,005	0,070 ± 0,007
г/массу тканей		
Mg	8,910 ± 0,700	10,700 ± 1,040***

Примечание: *** $p \leq 0,001$.

экструзия приводит к изменениям, способствующим повышенной доступности ферментов к химическим связям, и тем самым препятствует формированию нерастворимых комплексов [33, 34].

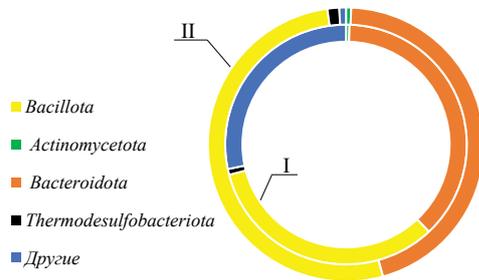
В результате было установлено достоверное увеличение в костной ткани меди, железа и цинка у птицы II группы в сравнении с I. Принимая во внимание, что медь и цинк являются важными участниками костного метаболизма и оказывают влияние на синтез костного коллагена и прочность костной ткани, предполагаем, что это окажет положительный эффект на развитие костного скелета [35, 36].

Известно, что изменения в микробиоме оказывают влияние на всасывание кальция, прочность и плотность костей [37]. Исследование микробиома слепой кишки цыплят-бройлеров выявило высокое разнообразие таксономических групп. Было получено 49042 и 44124 ридов (прочтений) для I и II групп. Отмечалась тенденция к увеличению количества операционных таксономических единиц (ОТЕ) при сравнении групп без и с добавлением кальция (266 и 382 ОТУ для I и II групп).

Оценка бактериального состава микробиома слепой кишки показала, что *Bacillota* и *Bacteroidota* являются доминирующими таксонами в опытных группах, что также отмечается в других исследованиях [38]. Использование совместно экструдированной смеси углеводов (отруби) с известняковой мукой в рационе

Рис. 4. Относительная численность (% от всех прочтений) на уровне филума идентифицированных микроорганизмов в слепой кишке птицы I и II групп
 Примечание: * другие — таксоны, численность каждого из которых не превышала 2% от общего числа идентифицированных микроорганизмов

Fig. 4. Relative abundance (% of all reads) at the phylum level of identified microorganisms in the cecum of poultry groups I and II
 Note: * others — taxa, the number of each of which did not exceed 2% of the total number of identified microorganisms



цыплят-бройлеров приводило к изменениям в микробиоме слепой кишки птицы и способствовало увеличению доли бактерий филумов *Bacteroidota* (+7,59%) и *Bacillota* (+19,2%) в сравнении с обработанными отрубями без минеральной добавки (рис. 4).

Было отмечено более высокое содержание бактериальных таксонов *Bacteroidaceae* (+4,57%) и *Oscillospiraceae* (+14,5%), *unclassified Oscillospiraceae* (+7,49%), *Faecalibacterium* (+3,25%) и *Phocaeicola* (+4,76%) (рис. 5)

В то же время отмечалось снижение доли бактериального семейства *Rikenellaceae* (-22%), что закономерно на уровне рода было связано с меньшим содержанием микроорганизмов таксонов *Alistipes* (-16,1%) и *Rikenella* (-5,41%) (рис. 6).

Расчет индексов Chao1 и ACE показал достоверно более высокие значения во II группе в сравнении с I, что свидетельствовало о большем богатстве бактериального сообщества при использовании экструдированных отрубей вместе с известняковой мукой (табл. 4).

Анализ индексов альфа-разнообразия, таких как Fisher's alpha, Simpson и Shannon, достоверных различий при сравнении экспериментальных групп не показал.

Вычисление показателей бета-разнообразия показало различия в организации бактериальных сообществ в слепой кишке цыплят-бройлеров при сравнении I и II ($p = 0,042$) групп (рис. 7).

Использование в рационе совместно экструдированных пшеничных отрубей с известняковой мукой приводило к увеличению доли бактерий, относящихся к различным таксономическим группам, которые разлагают целлюлозу и являются активными продуцентами короткоцепочечных жирных кислот, таких как бутират и пропионат [39–41]. Предполагаем, что это могло быть одной из причин, способствующей более активному усвоению кальция и отложению его в костях.

Метаболиты кишечной микробиоты, в особенности бутират, являются важным источником энергии для энтероцитов и играют важную роль в здоровье кишечника

Таблица 4. Индексы альфа-разнообразия
 Table 4. Alpha diversity indices

Показатель	группа		P-value
	I	II	
Chao1	212,50 ± 2,50	243,50 ± 9,50	0,04
ACE	219,70 ± 2,49	250,90 ± 9,32	0,04
Fisher's alpha	32,40 ± 0,35	38,30 ± 2,70	0,07
Simpson	0,85 ± 0,06	0,96 ± 0,02	0,39
Shannon	3,40 ± 0,49	4,05 ± 0,45	0,25

Рис. 5. Относительная численность (% от всех прочтений) на уровне семейства идентифицированных микроорганизмов в слепой кишке птицы I и II групп
 Примечание: * другие — таксоны, численность каждого из которых не превышала 2% от общего числа идентифицированных микроорганизмов

Fig. 5. Relative abundance (% of all reads) at the family level, of identified microorganisms in the cecum of poultry groups I and II
 Note: * others were taxa, the number of each of which did not exceed 2% of the total number of identified microorganisms.

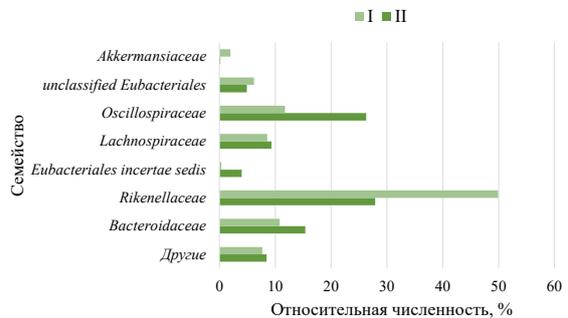


Рис. 6. Относительная численность (% от всех прочтений) на уровне рода идентифицированных микроорганизмов в слепой кишке птицы I и II опытных групп
 Примечание: * другие — таксоны, численность каждого из которых не превышала 2% от общего числа идентифицированных микроорганизмов

Fig. 6. Relative abundance (% of all reads), at the family level, of identified microorganisms in the cecum of poultry from experimental groups I and II
 Note: * others were taxa, the number of each of which did not exceed 2% of the total number of identified microorganisms.

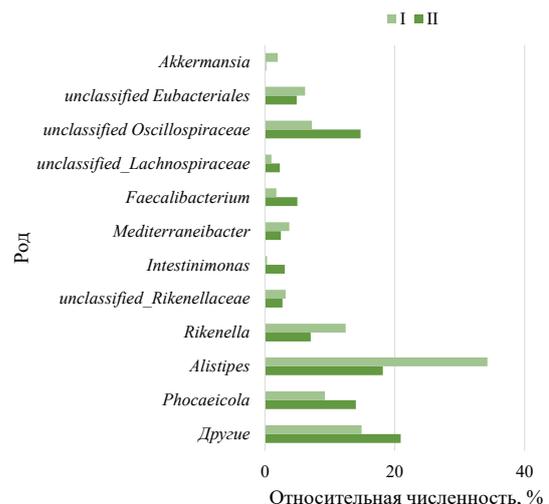
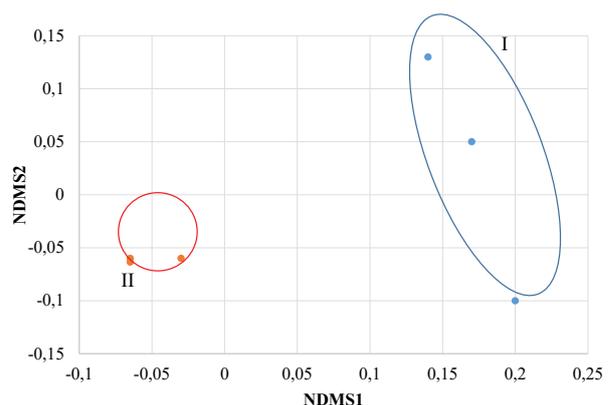


Рис. 7. Бета-разнообразие микробиоты слепого отростка кишечника цыплят-бройлеров I и II групп с использованием статистического метода PERMANOVA, неметрического многомерного масштабирования и несходства Брея — Кертиса ($n = 3$)

Fig. 7. Beta diversity of microbiota of the caecum of broiler chickens of groups I and II using the statistical method PERMANOVA, non-metric multidimensional scaling and Bray — Curtis dissimilarity ($n = 3$)



птицы. Отмечается, что бутират, ацетат и пропионат оказывают влияние на пролиферацию клеток эпителия слизистой оболочки кишечника (тем самым увеличивая площадь всасывания), способствуют увеличению транспорта кальция и его всасывания [38, 42].

Выводы/Conclusions

Использование в рационе экструдированных компонентов совместно с карбонатом кальция приводило к изменениям в процессах пищеварения и минеральном обмене. Была отмечена положительная динамика в усвоении питательных веществ из корма в опытной группе в сравнении с контролем, что выражалось в увеличении переваримости сырого жира на 8,5% ($p \leq 0,05$).

Исследование элементного состава показало увеличение содержания железа (+ 66%, $p \leq 0,05$), цинка (+ 49,3%, $p \leq 0,05$) и магния (+ 30,6%, $p \leq 0,05$) в костной

ткани, кальция (+ 6,9%, $p \leq 0,05$), цинка (+ 23%, $p \leq 0,05$), меди (+ 13,3%, $p \leq 0,05$) и магния (20,1%, $p \leq 0,05$) в бедренной кости птицы, получавшей в рационе обработанные экструзией пшеничные отруби с карбонатом кальция в сравнении с контролем.

В микробиоме слепой кишки наблюдалось увеличение доли бактерий таксонов *Bacteroidaceae* (+4,57%) и *Oscillospiraceae* (+14,5%), *unclassified Oscillospiraceae* (+7,49%), осуществляющих расщепление целлюлозы и синтез короткоцепочечных кислот (бутирата, пропионата) у птицы в группе, получавшей с рационом известняковою муку.

Таким образом, результаты исследования показали перспективы применения экструдированных пшеничных отрубей, обогащенных кальцием в рационах кормления сельскохозяйственной птицы. Полученные данные могут быть использованы в рамках функциональной и экономической оптимизации рационов.

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.

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.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 23-16-00165.
<https://rscf.ru/project/23-16-00165/>

FUNDING

This research was funded by Russian Science Foundation No. 23-16-00165.
<https://rscf.ru/project/23-16-00165/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Asasi R., Ahmadi H., Torshizi M.A.K., Torshizi R.V., Shariatmadari F. Assessing the nutritional equivalency of DL-methionine and L-methionine in broiler chickens: a meta-analytical study. *Poultry Science*. 2023; 102(12): 103143. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103143>
- Moita V.H.C., Kim S.W. Nutritional and Functional Roles of Phytase and Xylanase Enhancing the Intestinal Health and Growth of Nursery Pigs and Broiler Chickens. *Animals*. 2022; 12(23): 3322. <https://doi.org/10.3390/ani12233322>
- Lang W., Hong P., Li R., Zhang H., Huang Y., Zheng X. Growth performance and intestinal morphology of Hyline chickens fed diets with different diet particle sizes. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2019; 103(2): 518–524. <https://doi.org/10.1111/jpn.13046>
- Deng Z., Duarte M.E., Jang K.B., Kim S.W. Soy protein concentrate replacing animal protein supplements and its impacts on intestinal immune status, intestinal oxidative stress status, nutrient digestibility, mucosa-associated microbiota, and growth performance of nursery pigs. *Journal of Animal Science*. 2022; 100(10): skac255. <https://doi.org/10.1093/jas/skac255>
- Shang Q., Wu D., Liu H., Mahfuz S., Piao X. The Impact of Wheat Bran on the Morphology and Physiology of the Gastrointestinal Tract in Broiler Chickens. *Animals*. 2020; 10(10): 1831. <https://doi.org/10.3390/ani10101831>
- Adedokun S.A., Adeola O. Regression-Derived Ileal Endogenous Amino Acid Losses in Broiler Chickens and Cannulated Pigs Fed Corn Fiber, Wheat Bran, and Pectin. *Animals*. 2020; 10(11): 2145. <https://doi.org/10.3390/ani10112145>
- Tejeda O.J., Kim W.K. Role of Dietary Fiber in Poultry Nutrition. *Animals*. 2021; 11(2): 461. <https://doi.org/10.3390/ani11020461>
- Röhe I., Zentek J. Lignocellulose as an insoluble fiber source in poultry nutrition: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2021; 12: 82. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00594-y>
- Yang J., Qin K., Sun Y., Yang X. Microbiota-accessible fiber activates short-chain fatty acid and bile acid metabolism to improve intestinal mucus barrier in broiler chickens. *Microbiology Spectrum*. 2024; 12(1): e02065-23. <https://doi.org/10.1128/spectrum.02065-23>
- Lin Y., Olukosi O.A. Qualitative and quantitative profiles of jejunal oligosaccharides and cecal short-chain fatty acids in broiler chickens receiving different dietary levels of fiber, protein and exogenous enzymes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021; 101(12): 5190–5201. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11165>
- Okrathok S., Sirisopapong M., Mermillod P., Khempaka S. Modified dietary fiber from cassava pulp affects the cecal microbial population, short-chain fatty acid, and ammonia production in broiler chickens. *Poultry Science*. 2023; 102(1): 102265. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102265>
- Kim O.-H. *et al.* High-phytate/low-calcium diet is a risk factor for crystal nephropathies, renal phosphate wasting, and bone loss. *eLife*. 2020; 9: e52709. <https://doi.org/10.7554/eLife.52709>
- Torre M., Rodriguez A.R., Saura-Calixto F. Effects of dietary fiber and phytic acid on mineral availability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1991; 30(1): 1–22. <https://doi.org/10.1080/10408399109527539>

REFERENCES

- Asasi R., Ahmadi H., Torshizi M.A.K., Torshizi R.V., Shariatmadari F. Assessing the nutritional equivalency of DL-methionine and L-methionine in broiler chickens: a meta-analytical study. *Poultry Science*. 2023; 102(12): 103143. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103143>
- Moita V.H.C., Kim S.W. Nutritional and Functional Roles of Phytase and Xylanase Enhancing the Intestinal Health and Growth of Nursery Pigs and Broiler Chickens. *Animals*. 2022; 12(23): 3322. <https://doi.org/10.3390/ani12233322>
- Lang W., Hong P., Li R., Zhang H., Huang Y., Zheng X. Growth performance and intestinal morphology of Hyline chickens fed diets with different diet particle sizes. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2019; 103(2): 518–524. <https://doi.org/10.1111/jpn.13046>
- Deng Z., Duarte M.E., Jang K.B., Kim S.W. Soy protein concentrate replacing animal protein supplements and its impacts on intestinal immune status, intestinal oxidative stress status, nutrient digestibility, mucosa-associated microbiota, and growth performance of nursery pigs. *Journal of Animal Science*. 2022; 100(10): skac255. <https://doi.org/10.1093/jas/skac255>
- Shang Q., Wu D., Liu H., Mahfuz S., Piao X. The Impact of Wheat Bran on the Morphology and Physiology of the Gastrointestinal Tract in Broiler Chickens. *Animals*. 2020; 10(10): 1831. <https://doi.org/10.3390/ani10101831>
- Adedokun S.A., Adeola O. Regression-Derived Ileal Endogenous Amino Acid Losses in Broiler Chickens and Cannulated Pigs Fed Corn Fiber, Wheat Bran, and Pectin. *Animals*. 2020; 10(11): 2145. <https://doi.org/10.3390/ani10112145>
- Tejeda O.J., Kim W.K. Role of Dietary Fiber in Poultry Nutrition. *Animals*. 2021; 11(2): 461. <https://doi.org/10.3390/ani11020461>
- Röhe I., Zentek J. Lignocellulose as an insoluble fiber source in poultry nutrition: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2021; 12: 82. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00594-y>
- Yang J., Qin K., Sun Y., Yang X. Microbiota-accessible fiber activates short-chain fatty acid and bile acid metabolism to improve intestinal mucus barrier in broiler chickens. *Microbiology Spectrum*. 2024; 12(1): e02065-23. <https://doi.org/10.1128/spectrum.02065-23>
- Lin Y., Olukosi O.A. Qualitative and quantitative profiles of jejunal oligosaccharides and cecal short-chain fatty acids in broiler chickens receiving different dietary levels of fiber, protein and exogenous enzymes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021; 101(12): 5190–5201. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11165>
- Okrathok S., Sirisopapong M., Mermillod P., Khempaka S. Modified dietary fiber from cassava pulp affects the cecal microbial population, short-chain fatty acid, and ammonia production in broiler chickens. *Poultry Science*. 2023; 102(1): 102265. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102265>
- Kim O.-H. *et al.* High-phytate/low-calcium diet is a risk factor for crystal nephropathies, renal phosphate wasting, and bone loss. *eLife*. 2020; 9: e52709. <https://doi.org/10.7554/eLife.52709>
- Torre M., Rodriguez A.R., Saura-Calixto F. Effects of dietary fiber and phytic acid on mineral availability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1991; 30(1): 1–22. <https://doi.org/10.1080/10408399109527539>

14. Claye S.S., Idouraine A., Weber C.W. In vitro mineral binding capacity of five fiber sources and their insoluble components for copper and zinc. *Plant Foods for Human Nutrition*. 1996; 49(4): 257–269. <https://doi.org/10.1007/BF01091975>
15. Reinhold J.G., Garcia J.S., Garzon P. Binding of iron by fiber of wheat and maize. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 1981; 34(7): 1384–1391. <https://doi.org/10.1093/ajcn/34.7.1384>
16. Mironeasa S., Cojovanu I., Mironeasa C., Ungureanu-luga M. A Review of the Changes Produced by Extrusion Cooking on the Bioactive Compounds from Vegetal Sources. *Antioxidants*. 2023; 12(7): 1453. <https://doi.org/10.3390/antiox12071453>
17. Gualberto D.G., Bergman C.J., Weber C.W. Mineral binding capacity of dephytinized insoluble fiber from extruded wheat, oat and rice brans. *Plant Foods for Human Nutrition*. 1997; 51(4): 295–310. <https://doi.org/10.1023/a:1007972205452>
18. Albarracin M., Weisstaub A.R., Zuleta A., Mandalunis P., González R.J., Drago S.R. Effects of extruded whole maize, polydextrose and cellulose as sources of fibre on calcium bioavailability and metabolic parameters of growing Wistar rats. *Food & Function*. 2014; 5(4): 804–810. <https://doi.org/10.1039/c3fo60424a>
19. Galán M.G., Weisstaub A., Zuleta A., Drago S.R. Effects of extruded whole-grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) based diets on calcium absorption and bone health of growing Wistar rats. *Food & Function*. 2020; 11(1): 508–513. <https://doi.org/10.1039/c9fo01817d>
20. Курилкина М.Я., Холодилина Т.Н., Муслимова Д.М., Казачкова Н.М., Мирошникова Е.П. Воздействие экструдированных продуктов на биологическую доступность и обмен химических элементов в организме цыплят-бройлеров. *Вестник мясного скотоводства*. 2016; 2: 69–75. <https://www.elibrary.ru/waqtzr>
21. Рязанцева К.В., Нечитайло К.С., Сизова Е.А. Нормирование минерального питания цыплят-бройлеров (обзор). *Животноводство и кормопроизводство*. 2021; 104(1): 119–137. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-104-1-119>
22. Рязанцева К.В., Сизова Е.А. Химический состав костной ткани цыплят-бройлеров на фоне высокоэнергетического рациона. *Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий. Сборник VI Всероссийской (национальной) научной конференции с международным участием. Новосибирск: Золотой колос*. 2021; 406–410. <https://www.elibrary.ru/azgcww>
23. Hartcher K.M., Lum H.K. Genetic selection of broilers and welfare consequences: a review. *World's Poultry Science Journal*. 2019; 76(1): 154–167. <https://doi.org/10.1080/00439339.2019.1680025>
24. Opengart K., Bilgili S.F., Warren G.L., Baker K.T., Moore J.D., Dougherty S. Incidence, severity, and relationship of broiler footpad lesions and gait scores of market-age broilers raised under commercial conditions in the southeastern United States. *Journal of Applied Poultry Research*. 2018; 27(3): 424–432. <https://doi.org/10.3382/japr/pfy002>
25. Холодилина Т.Н., Курилкина М.Я., Атландерова К.Н. Экструзионная обработка как фактор, определяющий аминокислотный состав различных компонентов корма для цыплят-бройлеров. *Животноводство и кормопроизводство*. 2022; 105(1): 74–81. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-1-74>
26. Dhariwal A., Chong J., Habib S., King I.L., Agellon, L.B., Xia J. MicrobiomeAnalyst: A web-based tool for comprehensive statistical, visual and meta-analysis of microbiome data. *Nucleic Acids Research*. 2017; 45(W1): W180–W188. <https://doi.org/10.1093/nar/gkx295>
27. Risyahadi S.T., Sukria H.A., Retnani Y., Wijayanti I., Jayanegara A., Qomariyah N. Effects of dietary extrusion on the performance and apparent ileal digestion of broilers: a meta-analysis. *Italian Journal of Animal Science*. 2023; 22(1): 291–300. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2023.2184277>
28. Холодилина Т.Н., Яушева Е.В., Рязанцева К.В., Сизова Е.А., Нечитайло К.С. Продуктивные качества, переваримость кормов и кишечный микробиом у цыплят-бройлеров (*Gallus gallus* L.) при добавлении в рацион нативных и экструдированных углеводных компонентов. *Сельскохозяйственная биология*. 2024; 59(2): 274–288. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.2.274rus>
29. Selle P.H., Cowieson A.J., Ravindran V. Consequences of calcium interactions with phytate and phytase for poultry and pigs. *Livestock Science*. 2009; 124(1–3): 126–141. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.01.006>
30. Selle P.H., Macelline S.P., Chrystal P.V., Liu S.Y. The Contribution of Phytate-Degrading Enzymes to Chicken-Meat Production. *Animals*. 2023; 13(4): 603. <https://doi.org/10.3390/ani13040603>
31. David L.S., Anwar M.N., Abdollahi M.R., Bedford M.R., Ravindran V. Calcium Nutrition of Broilers: Current Perspectives and Challenges. *Animals*. 2023; 13(10): 1590. <https://doi.org/10.3390/ani13101590>
32. Moran E.T., Bedford M.R. Basis for the diversity and extent in loss of digestible nutrients created by dietary phytin: Emphasis on fowl and swine. *Animal Nutrition*. 2024; 16: 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.11.010>
33. Hejdysz M., Kaczmarek S.A., Kubiś M., Adamski M., Perz K., Rutkowski A. The effect of faba bean extrusion on the growth performance, nutrient utilization, metabolizable energy, excretion of sialic acids and meat quality of broiler chickens. *Animal*. 2019; 13(8): 1583–1590. <https://doi.org/10.1017/S175173111800366X>
34. Hejdysz M., Kaczmarek S.A., Rutkowski A. Effect of extrusion on the nutritional value of peas for broiler chickens. *Archives of Animal Nutrition*. 2016; 70(5): 364–377. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2016.1206736>
14. Claye S.S., Idouraine A., Weber C.W. In vitro mineral binding capacity of five fiber sources and their insoluble components for copper and zinc. *Plant Foods for Human Nutrition*. 1996; 49(4): 257–269. <https://doi.org/10.1007/BF01091975>
15. Reinhold J.G., Garcia J.S., Garzon P. Binding of iron by fiber of wheat and maize. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 1981; 34(7): 1384–1391. <https://doi.org/10.1093/ajcn/34.7.1384>
16. Mironeasa S., Cojovanu I., Mironeasa C., Ungureanu-luga M. A Review of the Changes Produced by Extrusion Cooking on the Bioactive Compounds from Vegetal Sources. *Antioxidants*. 2023; 12(7): 1453. <https://doi.org/10.3390/antiox12071453>
17. Gualberto D.G., Bergman C.J., Weber C.W. Mineral binding capacity of dephytinized insoluble fiber from extruded wheat, oat and rice brans. *Plant Foods for Human Nutrition*. 1997; 51(4): 295–310. <https://doi.org/10.1023/a:1007972205452>
18. Albarracin M., Weisstaub A.R., Zuleta A., Mandalunis P., González R.J., Drago S.R. Effects of extruded whole maize, polydextrose and cellulose as sources of fibre on calcium bioavailability and metabolic parameters of growing Wistar rats. *Food & Function*. 2014; 5(4): 804–810. <https://doi.org/10.1039/c3fo60424a>
19. Galán M.G., Weisstaub A., Zuleta A., Drago S.R. Effects of extruded whole-grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) based diets on calcium absorption and bone health of growing Wistar rats. *Food & Function*. 2020; 11(1): 508–513. <https://doi.org/10.1039/c9fo01817d>
20. Kuriikina M.Ya., Kholodilina T.N., Muslyumova D.M., Kazachkova N.M., Miroshnikova E.P. Impact of extruded products on biological availability and exchange of chemical elements in the body of broiler chickens. *Herald of beef cattle breeding*. 2016; 2: 69–75 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/waqtzr>
21. Ryazantseva K.V., Nechitailo K.S., Sizova E.A. Broiler chickens mineral nutrition rationing (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2021; 104(1): 119–137 (in Russian). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-104-1-119>
22. Ryazantseva K.V., Sizova E.A. Chemical composition of bone tissue of broiler chickens against the background of a high-energy diet. *The role of agricultural science in the sustainable development of rural areas. Collection of the VI All-Russian (national) scientific conference with international participation*. Novosibirsk: Zolotoy kolos. 2021; 406–410 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/azgcww>
23. Hartcher K.M., Lum H.K. Genetic selection of broilers and welfare consequences: a review. *World's Poultry Science Journal*. 2019; 76(1): 154–167. <https://doi.org/10.1080/00439339.2019.1680025>
24. Opengart K., Bilgili S.F., Warren G.L., Baker K.T., Moore J.D., Dougherty S. Incidence, severity, and relationship of broiler footpad lesions and gait scores of market-age broilers raised under commercial conditions in the southeastern United States. *Journal of Applied Poultry Research*. 2018; 27(3): 424–432. <https://doi.org/10.3382/japr/pfy002>
25. Kholodilina T.N., Kuriikina M.Ya., Atlanderova K.N. Extrusion processing as factor determining the amino acid composition of various feed components for broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022; 105(1): 74–81 (in Russian). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-1-74>
26. Dhariwal A., Chong J., Habib S., King I.L., Agellon, L.B., Xia J. MicrobiomeAnalyst: A web-based tool for comprehensive statistical, visual and meta-analysis of microbiome data. *Nucleic Acids Research*. 2017; 45(W1): W180–W188. <https://doi.org/10.1093/nar/gkx295>
27. Risyahadi S.T., Sukria H.A., Retnani Y., Wijayanti I., Jayanegara A., Qomariyah N. Effects of dietary extrusion on the performance and apparent ileal digestion of broilers: a meta-analysis. *Italian Journal of Animal Science*. 2023; 22(1): 291–300. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2023.2184277>
28. Holodilina T.N., Yausheva E.V., Ryazantseva K.V., Sizova E.A., Nechitailo K.S. Productive performance, feed digestibility and gut microbiome of broiler chickens (*Gallus gallus* L.) fed diets with native and extruded carbohydrate containing ingredients. *Agricultural Biology*. 2024; 59(2): 274–288. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.2.274eng>
29. Selle P.H., Cowieson A.J., Ravindran V. Consequences of calcium interactions with phytate and phytase for poultry and pigs. *Livestock Science*. 2009; 124(1–3): 126–141. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.01.006>
30. Selle P.H., Macelline S.P., Chrystal P.V., Liu S.Y. The Contribution of Phytate-Degrading Enzymes to Chicken-Meat Production. *Animals*. 2023; 13(4): 603. <https://doi.org/10.3390/ani13040603>
31. David L.S., Anwar M.N., Abdollahi M.R., Bedford M.R., Ravindran V. Calcium Nutrition of Broilers: Current Perspectives and Challenges. *Animals*. 2023; 13(10): 1590. <https://doi.org/10.3390/ani13101590>
32. Moran E.T., Bedford M.R. Basis for the diversity and extent in loss of digestible nutrients created by dietary phytin: Emphasis on fowl and swine. *Animal Nutrition*. 2024; 16: 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.11.010>
33. Hejdysz M., Kaczmarek S.A., Kubiś M., Adamski M., Perz K., Rutkowski A. The effect of faba bean extrusion on the growth performance, nutrient utilization, metabolizable energy, excretion of sialic acids and meat quality of broiler chickens. *Animal*. 2019; 13(8): 1583–1590. <https://doi.org/10.1017/S175173111800366X>
34. Hejdysz M., Kaczmarek S.A., Rutkowski A. Effect of extrusion on the nutritional value of peas for broiler chickens. *Archives of Animal Nutrition*. 2016; 70(5): 364–377. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2016.1206736>

35. Torres C.A., Korver D.R. Influences of trace mineral nutrition and maternal flock age on broiler embryo bone development. *Poultry Science*. 2018; 97(8): 2996–3003.
<https://doi.org/10.3382/ps/pey136>

36. Wen X., Wang J., Pei X., Zhang X. Zinc-based biomaterials for bone repair and regeneration: mechanism and applications. *Journal of Materials Chemistry B*. 2023; 11(48): 11405–11425.
<https://doi.org/10.1039/d3tb01874a>

37. McCabe L., Britton R.A., Parameswaran N. Prebiotic and Probiotic Regulation of Bone Health: Role of the Intestine and its Microbiome. *Current Osteoporosis Reports*. 2015; 13(6): 363–371.
<https://doi.org/10.1007/s11914-015-0292-x>

38. Shang Q.H. *et al.* Effects of wheat bran in comparison to antibiotics on growth performance, intestinal immunity, barrier function, and microbial composition in broiler chickens. *Poultry Science*. 2020; 99(10): 4929–4938.
<https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.06.031>

39. Ganesan K., Chung S.K., Vanamala J., Xu B. Causal Relationship between Diet-Induced Gut Microbiota Changes and Diabetes: A Novel Strategy to Transplant *Faecalibacterium prausnitzii* in Preventing Diabetes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2018; 19(12): 3720.
<https://doi.org/10.3390/ijms19123720>

40. Hiippala K. *et al.* The Potential of Gut Commensals in Reinforcing Intestinal Barrier Function and Alleviating Inflammation. *Nutrients*. 2018; 10(8): 988.
<https://doi.org/10.3390/nu10080988>

41. Vermeulen K. *et al.* Reduced-Particle-Size Wheat Bran Is Efficiently Colonized by a Lactic Acid-Producing Community and Reduces Levels of *Enterobacteriaceae* in the Cecal Microbiota of Broilers. *Applied and Environmental Microbiology*. 2018; 84(21): e01343-18.
<https://doi.org/10.1128/AEM.01343-18>

42. Wang J., Wu S., Zhang Y., Yang J., Hu Z. Gut microbiota and calcium balance. *Frontiers in Microbiology*. 2022; 13: 1033933.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1033933>

35. Torres C.A., Korver D.R. Influences of trace mineral nutrition and maternal flock age on broiler embryo bone development. *Poultry Science*. 2018; 97(8): 2996–3003.
<https://doi.org/10.3382/ps/pey136>

36. Wen X., Wang J., Pei X., Zhang X. Zinc-based biomaterials for bone repair and regeneration: mechanism and applications. *Journal of Materials Chemistry B*. 2023; 11(48): 11405–11425.
<https://doi.org/10.1039/d3tb01874a>

37. McCabe L., Britton R.A., Parameswaran N. Prebiotic and Probiotic Regulation of Bone Health: Role of the Intestine and its Microbiome. *Current Osteoporosis Reports*. 2015; 13(6): 363–371.
<https://doi.org/10.1007/s11914-015-0292-x>

38. Shang Q.H. *et al.* Effects of wheat bran in comparison to antibiotics on growth performance, intestinal immunity, barrier function, and microbial composition in broiler chickens. *Poultry Science*. 2020; 99(10): 4929–4938.
<https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.06.031>

39. Ganesan K., Chung S.K., Vanamala J., Xu B. Causal Relationship between Diet-Induced Gut Microbiota Changes and Diabetes: A Novel Strategy to Transplant *Faecalibacterium prausnitzii* in Preventing Diabetes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2018; 19(12): 3720.
<https://doi.org/10.3390/ijms19123720>

40. Hiippala K. *et al.* The Potential of Gut Commensals in Reinforcing Intestinal Barrier Function and Alleviating Inflammation. *Nutrients*. 2018; 10(8): 988.
<https://doi.org/10.3390/nu10080988>

41. Vermeulen K. *et al.* Reduced-Particle-Size Wheat Bran Is Efficiently Colonized by a Lactic Acid-Producing Community and Reduces Levels of *Enterobacteriaceae* in the Cecal Microbiota of Broilers. *Applied and Environmental Microbiology*. 2018; 84(21): e01343-18.
<https://doi.org/10.1128/AEM.01343-18>

42. Wang J., Wu S., Zhang Y., Yang J., Hu Z. Gut microbiota and calcium balance. *Frontiers in Microbiology*. 2022; 13: 1033933.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1033933>

ОБ АВТОРАХ

Елена Владимировна Яшуева¹

старший научный сотрудник, кандидат биологических наук
 vasilena56@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1589-2211>

Татьяна Николаевна Холодилкина^{1, 2}

ведущий научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук¹;
 доцент кафедры экологии и природопользования, кандидат
 сельскохозяйственных наук²
 xolodilina@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3946-8247>

Кристина Владимировна Рязанцева¹

младший научный сотрудник
 reger94@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5134-0396>

Елена Анатольевна Сизова^{1, 2}

ведущий научный сотрудник, доцент, доктор биологических наук,
 кандидат биологических наук¹;
 профессор научно-образовательного центра «Биологические
 системы и нанотехнологии», доцент, доктор биологических наук,
 кандидат биологических наук²
 sizova.l78@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

Татьяна Андреевна Климова¹

младший научный сотрудник
 ga-lche-nok@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4298-1663>

¹ Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, ул. 9 Января, 29, Оренбург, 46000, Россия

² Оренбургский государственный университет, пр-т Победы, 13, Оренбург, 460018, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Elena Vladimirovna Yausheva¹

Senior Researcher, Candidate of Biological Sciences
 vasilena56@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1589-2211>

Tatyana Nikolaevna Kholodilina^{1, 2}

Leading Researcher, Candidate of Agricultural Sciences¹;
 Associate Professor of the Department of Ecology and Nature
 Management, Candidate of Agricultural Sciences²
 xolodilina@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3946-8247>

Kristina Vladimirovna Ryazantseva¹

Junior Researcher
 reger94@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5134-0396>

Elena Anatolyevna Sizova^{1, 2}

Leading Researcher, Associate Professor, Doctor of Biological
 Sciences, Candidate of Biological Sciences¹;
 Professor of the Scientific and Educational Center “Biological
 Systems and Nanotechnology”, Associate Professor, Doctor
 of Biological Sciences, Candidate of Biological Sciences²
 sizova.l78@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

Tatyana Andreevna Klimova¹

Junior Research Assistant
 ga-lche-nok@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4298-1663>

¹ Federal Scientific Center for Biological Systems and Agricultural Technologies of the Russian Academy of Sciences, 29 January 9th Str., Orenburg, 46000, Russia

² Orenburg State University, 13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russia