

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1427](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1427)

EDN: PQCEBS

УДК 636.5.033: 636.03:612.118



Факторы естественной противоинойфекционной резистентности сыворотки крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres: связь с составом кишечного микробиома и ассоциации с зоотехническими показателями продуктивности

Д.Г. Дерябин¹, Л.В. Власенко¹, И.Ф. Каримов^{1,2}, Г.К. Дускаев¹¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий
Российской академии наук, Оренбург, Российская Федерация²Оренбургский государственный медицинский университет Министерства
здравоохранения Российской Федерации, Оренбург, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Исследование бактерицидных факторов сыворотки крови является традиционным подходом к оценке уровня естественной противоинойфекционной резистентности сельскохозяйственных животных и птицы.

Целью исследования явился анализ возможных взаимосвязей профиля гуморальных факторов естественной противоинойфекционной резистентности и состава кишечного микробиома сельскохозяйственной птицы, а также поиск ассоциаций названных иммунологических и микробиологических параметров с эффективностью мясного птицеводства.

Материалы и методы. В исследование включены 28 групп цыплят-бройлеров, находившихся на базовом рационе, а также выкармливаемых с использованием различных добавок (пробиотик, антибиотик, малые молекулы растительного происхождения и их сочетания). В полученных от них образцах сыворотки крови определены бактерицидная активность (БАК) по отношению к *Escherichia coli*, лизоцимная активность (ЛАК) по степени лизиса *Micrococcus luteus* var. *lysodeikticus*, а также активность тромбocyтaрно-го катионного белка – ТКБ (бета-лизи́на) в тесте ингибирования *Bacillus subtilis*. Состав кишечных микробиомов исследован методом высокопроизводительного секвенирования на платформе MiSeq (Illumina Inc., США). Межгрупповые различия эффективности птицеводства оценены с использованием стандартных зоотехнических индексов.

Результаты. Показана обратная зависимость между уровнями БАСК и ЛАСК как показателей высокого уровня естественной резистентности организма птицы, а с другой – активностью ТКБ (бета-лизина) как индикатора истощения названных защитных механизмов. Определены перечни бактериальных таксонов, присутствие которых в микробиоме кишечника цыплят-бройлеров является условием для нормального развития естественного иммунитета (20 родов) или его «срыва» с индукцией воспалительного процесса, сопровождающегося дегрануляцией тромбоцитов (17 родов). Установлено, что повышенный уровень ТКБ ассоциирован с увеличенным расходом корма на прирост 1 кг биомассы, а присутствие в кишечном микробиоме ряда ТКБ-индуцирующих таксонов помимо негативного воздействия на конверсию корма в ряде случаев результируется в уменьшении итогового веса цыплят-бройлеров.

Заключение. Результаты исследования обосновывают анализ баланса сывороточных факторов (БАСК+ЛАСК)/ТКБ как информативных параметров, зависящих от состава кишечного микробиома и ассоциированных с эффективностью кормления сельскохозяйственной птицы.

Ключевые слова: цыплята-бройлеры; естественный иммунитет; бактерицидная активность сыворотки крови; лизоцимная активность сыворотки крови; тромбоцитарный катионный белок (бета-лизин); кишечный микробиом; эффективность птицеводства

Для цитирования. Дерябин, Д. Г., Власенко, Л. В., Каримов, И. Ф., & Дускаев, Г. К. (2026). Факторы естественной противоинойфекционной резистентности сыворотки крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres: связь с составом кишечного микробиома и ассоциации с зоотехническими показателями продуктивности. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 29–54. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1427>

Innate immunity components in the blood serum of Arbor Acres broiler chickens: Links with the gut microbiome composition and associations with zootechnical productivity indicators

D.G. Deryabin¹, L.V. Vlasenko¹, I.F. Karimov^{1,2}, G.K. Duskaev¹

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

*²Orenburg State Medical University of the Ministry of Health of Russia,
Orenburg, Russian Federation*

Abstract

Background. Evaluation of blood serum bactericidal indices is a traditional approach to assessing the innate immune defense of farm animals and poultry.

The **purpose** of this study was to analyze the links between the serum innate immunity components and the gut microbiome composition in Arbor Acres broiler chickens, as well as to search for associations between these immunological and microbiological parameters and the poultry farming efficiency.

Materials and methods. The analysis included 28 broilers chicken's groups fed a basal diet and also receiving various feed additives (probiotic, antibiotic, plant-derived compounds or their compositions). Individual chicken blood samples were collected and assessed for serum bactericidal activity (SBA) against *Escherichia coli*, serum lysozyme activity (SLA) in the *Micrococcus luteus* var. *lysodeikticus* lysis assay, and platelet cationic protein – PCP (also known as beta-lysin) in the *Bacillus subtilis* inhibition test. Chicken gut microbiomes were studied by high-throughput sequencing using the MiSeq platform (Illumina Inc., USA). Intergroup differences in poultry farming efficiency were assessed using zootechnical lot indicators.

Results. An opposite distribution was shown between SBA and SLA levels as indicators of a sufficient innate immune response, in contrast to PCP (beta-lysine) activity, which marks depletion of anti-infective defense mechanisms. Lists of the gut microbiome bacterial taxa that are significant for the innate immunity development have been identified, including 20 genera that ensure its normal state and 17 genera that involved in the defense “breakdown”, accompanied by platelet degranulation. It was found that elevated serum PCP levels were associated with increased feed intake per kg biomass gain, as several PCP-inducing bacteria in the gut microbiome not only negatively affected the feed conversion ratio but also reduced the achieved broiler chickens weight.

Conclusion. The study results showed the (SBA+LSA)/PCP balance in the blood serum of broiler chickens is an informative biomarker dependent on the gut microbiome composition and suitable for monitoring of feed efficiency in poultry farming.

Keywords: broiler chickens; innate immunity; serum bactericidal activity; serum lysozyme activity; platelet cationic protein (beta-lysin); gut microbiome; poultry farming efficiency

For citation. Deryabin, D. G., Vlasenko, L. V., Karimov, I. F., & Duskaev, G. K. (2026). Innate immunity components in the blood serum of Arbor Acres broiler chickens: Links with the gut microbiome composition and associations with zootechnical productivity indicators. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 29–54. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1427>

Введение

Гуморальные (сывороточные) бактерицидные факторы являются важной составляющей естественного противои инфекционного иммунитета сельскохозяйственных животных и птицы, обеспечивающих им неспец-

ифическую устойчивость к широкому кругу бактериальных патогенов [15]. При этом в основе данного защитного механизма лежит присутствие в сыворотке крови нескольких белков и белковых систем, дифференцированно реализующих свой антимикробный потенциал через прямое воздействие на жизнеспособность грамотрицательных и грамположительных бактерий [29].

Среди подобных факторов в животноводческой (птицеводческой) и ветеринарной практике наиболее распространенным является анализ «бактерицидной активности сыворотки крови» (сокр. – БАСК), тестируемой в отношении различных штаммов *Escherichia coli* и преимущественно определяемой активностью белков системы комплемента, при активации по классическому или альтернативному путям формирующих мембраноатакующий комплекс, направленный на клеточную стенку грамотрицательных бактерий [21]. В качестве другого часто определяемого параметра следует назвать «лизосимную активность сыворотки крови» (сокр. – ЛАСК), обусловленную активностью фермента лизоцима (мурамидазы; КФ 3.2.1.17), расщепляющего пептидогликан (муреин) в клетках *Micrococcus luteus var. lysodeikticus* и других грамположительных бактерий, клеточная стенка которых состоит из лизоцим-чувствительного муреина [24]. Третьим распространенным тестом является определение активности термостабильного сывороточного бактерицидного фактора – бета-лизина, оцениваемого в отношении *Bacillus subtilis* и названного так в противоположность термочувствительному альфа-лизину, в дальнейшем охарактеризованному как комплемент (см. выше) [26]. При этом по современным представлениям бета-лизин является катионным антимикробным пептидом, появляющимся в сыворотке крови в результате дегрануляции тромбоцитов, что определило его название как «тромбоцитарного катионного белка» (сокр. – ТКБ) [1].

В современной лабораторной практике анализ БАСК, ЛАСК и ТКБ остаётся традиционным подходом к оценке уровня естественной противoinфекционной резистентности сельскохозяйственных животных и птицы при различных физиологических и патологических состояниях [11], а также всё чаще используется для оценки эффективности вновь разрабатываемых кормовых добавок неорганической [18] и органической [27] природы. В то же время причины модифицирующих эффектов кормовых добавок остаются во многом ещё не изученными и предположительно могут опосредоваться первичным воздействием на микробиом кишечника сельскохозяйственных животных и птицы, в дальнейшем определяю-

щих состояние естественного противоинфекционного иммунитета через генерацию различных стимулирующих и супрессирующих сигналов [30].

В этой связи *целью* настоящего исследования явился анализ возможных взаимосвязей профиля гуморальных факторов естественной противоинфекционной резистентности и состава кишечного микробиома сельскохозяйственной птицы, сформированных на фоне применения различных кормовых добавок, а также поиск ассоциаций названных иммунологических и микробиологических параметров с продуктивностью птицеводства.

Материалы и методы исследования

Объектами изучения являлись цыплята-бройлеры кросса Arbor Acres (Aviagen LLC, Россия), из которых на всем протяжении исследования (2019-2024 гг.) были сформированы 5 контрольных и 23 экспериментальных групп по 15-30 голов каждая. Контрольные группы выкармливались до возраста 42 суток с использованием двухфазного базового рациона, рекомендуемого для птиц данного кросса [14], в то время как в схемы кормления отдельных экспериментальных групп в дополнение к базовому рациону входили: пробиотическая добавка на основе *Bacillus cereus* IP 5832 (Laboratoires AVENTIS, Франция) [17], антибиотик хлортетрациклин (ООО ПО «Сиббиофарм», Россия) [4; 5], а также химически синтезированные аналоги малых молекул растительного происхождения – гамма-октанолактон, 7-гидроксикумарин, ванилин/ванилиновая кислота, 4-гексилрезорцинол, кверцетин или их комбинации [4; 5; 6; 7; 16; 17; 28].

Содержание птиц осуществлялось в соответствии с нормативами, оговорёнными в Модельном законе Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств «Об обращении с животными», ст.20, № 29-17 от 31.10.2007 г. В динамике экспериментов у цыплят-бройлеров контрольных и опытных групп измерялись: живая масса, среднесуточный и абсолютный прирост, сохранность поголовья, поедаемость корма. Исходя из количества потребленного корма (за весь период эксперимента) и величины абсолютного прироста живой массы птицы рассчитывали затраты корма на 1 кг прироста живой массы [8]. Детали экспериментов описаны в публикациях [4; 5; 6; 7; 16; 17; 28].

Для количественной оценки профиля гуморальных *факторов естественной противоинфекционной резистентности* у 42-суточных цыплят-бройлеров прижизненно был проведен забор крови из подкрыльцовой вены в вакуумные пробирки с коагулянтом – активатором свертывания

(Zhejiang Gongdong Medical Technology Co, Ltd, Китай). После ретракции сгустков сыворотки отделяли центрифугированием при 1500 об/мин.

Дальнейшие исследования, основанные на измерении оптических плотностей (ОП) бактериальных суспензий, проводили в микропланшетном формате с использованием ридера Infinite 200 (Tecan Austria GmbH, Австрия), снаряженного светофильтрами 450 и 610 нм.

Бактерицидную активность сыворотки крови (БАСК) определяли по степени подавления роста *Escherichia coli* K12 TG1 в жидкой питательной среде с добавлением (опыт) и без добавления (контроль) испытуемой сыворотки. Расчет БАСК проводили по формуле:

$$\text{БАСК} = 100 - \left(\frac{\text{ОП}_\text{после инкубации} - \text{ОП}_\text{до инкубации}}{\text{ОП}_\text{к после инкубации} - \text{ОП}_\text{к до инкубации}} \right) \times 100\%,$$

где ОП_п и ОП_к – значения оптической плотности опытных и контрольных проб до и после 3 часов инкубации при 37°C [11].

Лизоцимную активность сыворотки крови (ЛАСК) тестировали по отношению к *Micrococcus luteus* var. *lysodeikticus* ATCC 4698. Микробную суспензию разводили в фосфатном буфере (pH=7,2-7,4), а тестируемую сыворотку предварительно инактивировали нагреванием в водяной бане (56°C, 30 минут) для устранения комплемент-зависимой цитотоксичности. Степень лизиса бактериальной культуры определяли по формуле:

$$\text{ЛАСК} = \left(\frac{\text{ОП}_\text{до инкубации} - \text{ОП}_\text{после инкубации}}{\text{ОП}_\text{до инкубации}} - \frac{\text{ОП}_\text{к до инкубации} - \text{ОП}_\text{к после инкубации}}{\text{ОП}_\text{к до инкубации}} \right) \times 100\%,$$

где ОП_п и ОП_к – значения оптической плотности опытных и контрольных проб до и после инкубации в течение 1 часа при 37°C [12].

Оценка активности тромбоцитарного катионного белка – ТКБ (бета-лизина) была проведена по отношению к *Bacillus subtilis* ГИСК 010011. При этом суточную тест-культуру разводили в 0,75 М растворе сахарозы (pH=6,2), сыворотку крови термоинактивировали в описанном выше режиме, а их смеси инкубировали в течение 2 часов при 37°C. Активность ТКБ рассчитывали по формуле:

$$\text{ТКБ} = \frac{\text{ОП}_\text{до инкубации} - \text{ОП}_\text{после инкубации}}{\text{ОП}_\text{до инкубации}} \times 100\%,$$

где ОП – значения оптической плотности опытных проб до и после инкубации [11].

Для исследования состава *кишечного микробиома* цыплят-бройлеров в возрасте 42 суток гуманно забивали, после чего у рандомно выбранных птиц контрольных и экспериментальных групп в асептических условиях производили отбор содержимого парных слепых кишок в стерильные криогенные пробирки, которые хранили в морозильной камере 803CV (Thermo Fisher Scientific, Германия) при температуре -80°C. Выделение тотальной ДНК из

отобранных проб в проводили с использованием наборов Fast DNA SPIN Kit for Feces (MP Biomedicals Inc., США) или QIAamp Fast DNA Stool Mini Kit (Qiagen GmbH, Германия). Качество выделенной ДНК контролировали с помощью электрофореза в 1 % агарозном геле, а концентрацию определяли с использованием набора для высокочувствительного анализа dsDNA на флуориметре Qubit 4 (Life Technologies, США). Дальнейшая подготовка библиотек ДНК, ориентированных на область V3-V4 гена 16S рПНК, а также их высокопроизводительное парное секвенирование 2×250 п.н. выполнено на платформе MiSeq (Illumina Inc., США) с использованием соответствующих наборов реагентов в соответствии с рекомендациями производителя. Таксономическая принадлежность полученных прочтений проведена в соответствии с интернет-браузером NCBI и базой данных GTDB.

Статистический анализ полученных результатов выполнен с использованием программного пакета Statistica 8.0 (StatSoft Inc., США); первичные данные и результаты их анализа хранились в многофункциональном приложении Microsoft Excel 2019 (Microsoft, США). Распределение анализируемых величин было оценено с использованием модуля «непараметрическая статистика» и представлено в формате медианных [Q1–Q3] значений. Соответствия между уровнями маркеров естественной противомикробной резистентности, относительными долями бактериальных таксонов в кишечном микробиоме и зоотехническими параметрами проанализированы с применением модуля «корреляционный анализ»; для оценки силы влияния рассчитывали коэффициент детерминации r^2 . При построении «тепловой карты» группировка бактериальных таксонов проведена с использованием модуля «кластерный анализ». Рассматриваемыми уровнями статистической значимости являлись значения $p < 0,05$; $p < 0,01$ и $p < 0,001$.

Результаты исследования и их обсуждение

Тестирование исследуемых сывороток крови против *E. coli* K12 TG1, *M. luteus* var. *lysodeikticus* ATCC 4698 и *B. subtilis* ГИСК 010011 позволило дать комплексную оценку присутствующих в них бактерицидных факторов в отношении модельных грамотрицательного и грамположительных микроорганизмов. При этом интегральная БАСК против *E. coli* K12 TG1 характеризовалась медианным значением 29,90 % с межквартирным размахом [Q1–Q3], показывающим разброс 50 % центральных данных, в диапазоне 27,40–41,88 %. ЛАСК, оценивающая интенсивность гидролиза пептидогликана в клетках *M. luteus* var. *lysodeikticus*

АТСС 4698 в аналогичном формате представления данных составила 43,52 [41,15–48,00] %. В свою очередь подавление жизнеспособности *B. subtilis* ГИСК 010011 как проявление активности ТКБ, описывалось значениями 60,06 [55,30–71,90] %.

Сравнение сывороток крови цыплят-бройлеров контрольных и опытных групп не позволило зафиксировать статистически значимых различий, хотя использование кормовых добавок обеспечивало более широкий разброс определяемых значений и в ряде случаев приводило к существенному росту их бактерицидного потенциала. Так наиболее высокие уровни БАСК, соответствующие четвертому квартилю [$Q4_{\text{БАСК}}$], были достигнуты с использованием 4-гексилрезорцинола и его комбинаций с 7-гидроксикумарином и гамма-октанолактоном, а наиболее высокая активность лизоцима [$Q4_{\text{ЛАСК}}$] отмечена в группах, получавших ванилиновую кислоту (ванилин), гамма-октанолактон и их сочетание. Кроме того, при анализе межгруппового распределения названных гуморальных факторов между ними обнаруживалась слабая положительная корреляционная взаимосвязь: $r=0,4126$; $p=0,0291$ (рис. 1А), согласующаяся с представлениями о бактерицидной активности сыворотки крови в отношении грамотрицательных бактерий как результате взаимодополняющего действия белков системы комплемента и лизоцима [3]. При этом наиболее выраженное совместное повышение БАСК и ЛАСК [$Q4_{\text{БАСК}}$]:[$Q4_{\text{ЛАСК}}$] было показано в экспериментальных группах с кормовым использованием кверцетина: изолированно или в комбинации с 7-гидроксикумарином.

С другой стороны, между уровнями БАСК и ТКБ зафиксирована слабая отрицательная корреляционная взаимосвязь: $r=-0,4574$; $p=0,0144$ (рис. 1Б), характеризующая их как в определенной степени альтернативные факторы неспецифического гуморального иммунитета сельскохозяйственных животных и птицы [10]. В подобном контексте высокий уровень БАСК может рассматриваться как индикатор высокой естественной противомикробной резистентности, истощение которого при воздействии различных экстремальных факторов ведет к индукции эндогенного воспаления с дегрануляцией тромбоцитов и компенсаторным высвобождением ТКБ [1; 13]. При этом в анализируемой выборке наиболее высокие значения активности данного фактора [$Q4_{\text{ТКБ}}$] установлены в группах цыплят-бройлеров, выкармливаемых с использованием гамма-октанолактона (изолированно или в комбинации с ванилиновой кислотой), в то время как зона его пересечения со сниженными значениями БАСК [$Q1_{\text{БАСК}}$]:[$Q4_{\text{ТКБ}}$] не включала ни одного наблюдения.

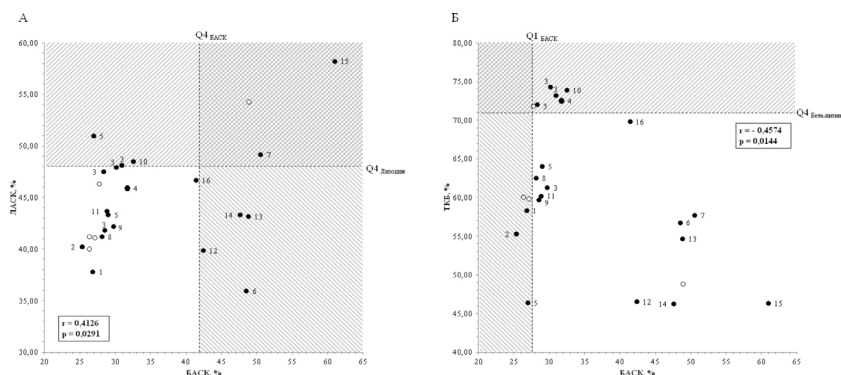


Рис. 1. Распределение величин, характеризующих активность бактерицидных факторов сыворотки крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres на плоскостях «БАСК:ЛАСК» (А) и «БАСК:ТКБ» (Б).

Обозначения: белые круги – контрольные группы, черные круги – экспериментальные группы, получавшие различные кормовые добавки, в том числе: 1 – пробиотический препарат на основе *B. cereus* IP 5832, 2 – антибиотик хлортетрациклин, 3 – гамма-октанолактон, 4 – 7-гидроксикумарин, 5 – ванилиновая кислота (ванилин), 6 – 4-гексилрезорцинол, 7 – кверцетин, 8 – пробиотический препарат на основе *B. cereus* IP 5832 и 7-гидроксикумарин, 9 – антибиотик хлортетрациклин и гамма-октанолактон, 10 – гамма-октанолактон и ванилиновая кислота (ванилин), 11 – антибиотик хлортетрациклин и 7-гидроксикумарин, 12 – гамма-октанолактон и 4-гексилрезорцинол, 13 – 7-гидроксикумарин и 4-гексилрезорцинол, 14 – гамма-октанолактон, 7-гидроксикумарин и 4-гексилрезорцинол, 15 – 7-гидроксикумарин и кверцетин, 16 – 7-гидроксикумарин и ванилиновая кислота (ванилин). Штриховкой выделены зоны, соответствующие первому [Q1] и четвертому [Q4] квартилям.

Fig. 1. Distribution of values characterizing the activity of bactericidal factors in the blood serum of Arbor Acres crossbred broiler chickens on the “BASK:LASK” (A) and “BASK:TKB” (B) planes. Legend: white circles – control groups; black circles – experimental groups receiving various feed additives, including: 1 – a probiotic preparation based on *B. cereus* IP 5832, 2 – the antibiotic chlortetracycline, 3 – gamma-octanolactone, 4 – 7-hydroxycoumarin, 5 – vanillic acid (vanillin), 6 – 4-hexylresorcinol, 7 – quercetin, 8 – a probiotic preparation based on *B. cereus* IP 5832 and 7-hydroxycoumarin, 9 – the antibiotic chlortetracycline and gamma-octanolactone, 10 – gamma-octanolactone and vanillic acid (vanillin), 11 – the antibiotic chlortetracycline and 7-hydroxycoumarin, 12 – gamma-octanolactone and 4-hexylresorcinol, 13 – 7-hydroxycoumarin and 4-hexylresorcinol, 14 – gamma-octanolactone, 7-hydroxycoumarin, and 4-hexylresorcinol; 15 – 7-hydroxycoumarin and quercetin; 16 – 7-hydroxycoumarin and vanillic acid (vanillin). The shaded areas correspond to the first [Q1] and fourth [Q4] quartiles.

С целью анализа причин, повлекших сочетанное изменение профиля БАСК:ЛАСК:ТКБ при различных режимах кормления, на следующем этапе исследования нами были охарактеризованы зависимости названных факторов естественной противоинойфекционной резистентности от состава кишечного микробиома цыплят-бройлеров, потенциально способного вызывать их индукцию/истощение.

Проведенное с этой целью множественное параллельное секвенирование переменных участков гена 16S рРНК показало присутствие в кишечных микробиомах цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres восьми крупных таксономических групп – филумов, среди которых доминировали *Bacillota* и *Bacteroidota*, обнаруженные в 100% анализируемых проб и составляющие 75,65 [58,00–81,58] % и 22,18 [13,49–41,19] % от общей численности идентифицированных прочтений, соответственно. В свою очередь каждый из филумов *Actinomycetota*, *Pseudomonadota*, *Cyanobacteriota* и *Thermodesulfobacteriota* присутствовал не менее чем в 50 % анализируемых микробиомов, представляя не более 1 % от их относительной численности, а филумы *Mycoplasmata* и *Verrucomicrobiota* обнаруживались лишь спорадически с относительной численностью $\leq 0,01$ %. Дальнейший биоинформатический анализ выделял в составе названных филумов 16 классов, подразделяемых на 23 порядка, 36 семейств, на наиболее детализированном таксономическом уровне представленных 112 родами.

Последующее проведение множественного корреляционного анализа позволило идентифицировать 37 бактериальных родов или приравненных к ним таксономических категорий, на статистически значимом уровне ($p < 0,05$) ассоциированных с вариациями активности гуморальных факторов естественной противоинойфекционной резистентности.

Представление полученных данных в формате «тепловой карты» (рис. 2) свидетельствовало о разделении значимых родов на два примерно равновеликих кластера, первый из которых (кластер I) включал 20 бактериальных таксонов, прямо ассоциированных с высокими уровнями БАСК+ЛАСК, и обратно – с активностью ТКБ. При этом умеренно выраженные положительные корреляционные связи с уровнем БАСК (в диапазоне значений r от 0,5 до 0,7 и более) зафиксированы для родов *Bacteroides*, *Lachnospira*, *Ruthenibacterium*, *Vampirovibrio*, *Peptacetobacter*, *Dielma*, *Anaeroplasmata*, *Anaerotignum* и *Lawsonibacter*. Два, входящие в состав кластера I, рода (*Hungatella* и упомянутый выше *Peptacetobacter*) с аналогичной силой положительно коррелировали с активностью лизоцима, в то время как для 14 родов установлена статистически значимая отрицательная взаимосвязь с уровнем ТКБ.

В свою очередь кластер II включал 17 родов, для 10 из которых констатируются слабые отрицательные корреляционные связи (в диапазоне значений r от -0,3 до -0,5) с уровнем БАСК, а для 4 – с уровнем ЛАСК. В свою очередь роды *Aestuariuspira*, *Alistipes*, *Subdoligranulum*, *Anaerofilum*, *Thomasclavelia* (*Clostridium* XVIII) и *Fusicatenibacter* с аналогичной силой

положительно коррелировали с активностью ТКБ, а наиболее высокий коэффициент корреляции в паре «бактериальный таксон : ТКБ» зафиксирован для рода *Parasutterella* ($r=0,5910$; $p=0,0009$), одновременно обратно ассоциированного с уровнем БАСК ($r=-0,4328$; $p=0,0214$).

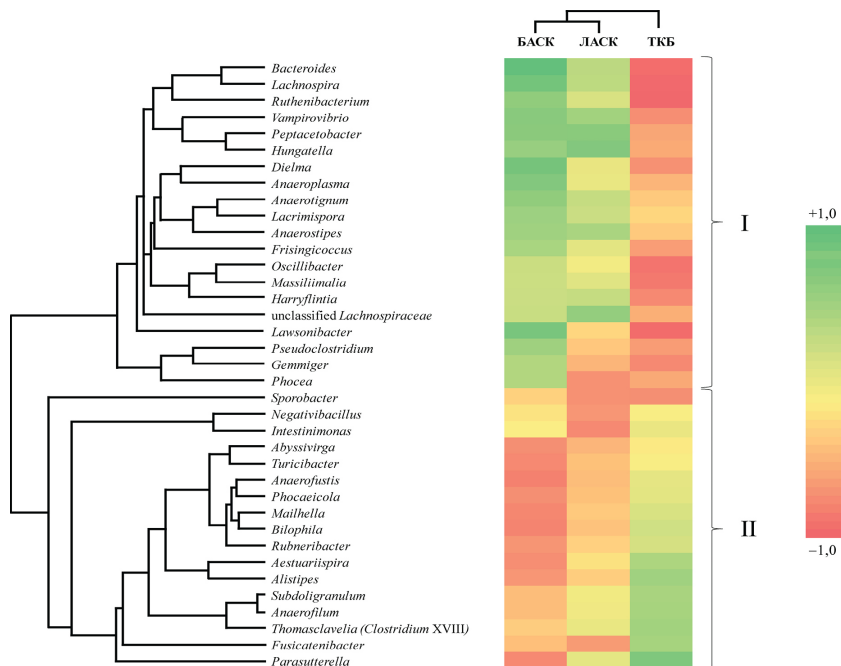


Рис. 2. Тепловая карта, представляющая ассоциации бактериальных таксонов, присутствующих в кишечном микробиоме (слева) с уровнями гуморальных факторов естественной противоинойфекционной резистентности в сыворотке крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres (сверху). Градации цвета отражают степень взаимосвязи: от прямой (зеленый) до обратной (красный). Справа указаны кластеры I и II, альтернативно связанные с активностями БАСК/ЛАСК/ТКБ.

Fig. 2. A heat map showing the associations between bacterial taxa present in the gut microbiome (left) and the levels of humoral factors of innate anti-infective resistance in the blood serum of Arbor Acres crossbred broiler chickens (top). The color gradations reflect the degree of correlation: from positive (green) to negative (red). Clusters I and II, which are alternatively associated with BASK/LASK/TKB activities, are shown on the right.

Дополнительный анализ микробного сообщества кишечника птицы показал наличие множественных сильных положительных коэффициентов корреляции ($r>0,7$; $p<0,001$), связывающих отдельные присутствующие

в нем бактериальные таксоны. В наибольшей степени это было характерно для представителей I кластера, 15 из 20 входящих в который родов формировали разветвленную корреляционную плеяду, каждый из членов которой был ассоциирован с другими от 1 до 7 корреляционными связями (рис. 3). Тем самым совокупность полученных данных, включающая высокую степень структурированности I кластера, характерного для птиц с высоким уровнем естественной противоинойфекционной резистентности (БАСК+ЛАСК), позволяет рассматривать его как часть «корового микробиома», обеспечивающего нормальное развитие защитных иммунных реакций у цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres.

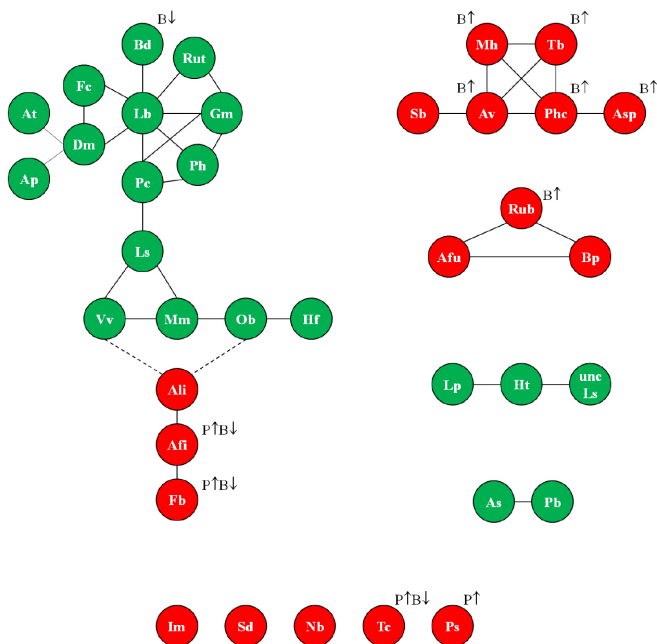


Рис. 3. Корреляционные взаимосвязи, характеризующие совместное присутствие бактериальных таксонов в кишечном микробиоме цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres. Прямые взаимосвязи указаны сплошными линиями, обратные – пунктирными линиями.

Зеленым цветом выделены таксоны I кластера, красным – II кластера (см. рис. 2). Буквенные обозначения: Bd – *Bacteroides*; Ls – *Lachnospira*; Rut – *Ruthenibacterium*; Vv – *Vampirovibrio*; Pb – *Peptacetobacter*; Ht – *Hungatella*; Dm – *Dielma*; Ap – *Anaerospira*; At – *Anaerostipes*; Lm – *Lacrimispora*; As – *Anaerostipes*; Fc – *Frisingicoccus*; Ob – *Oscillibacter*; Mm – *Massiliimalia*; Hf – *Harryflintia*; unc – unclassified *Lachnospiraceae*; Lb – *Lawsonibacter*; Pc – *Pseudoclostridium*;

Ge – *Gemmiger*; Ph – *Phoceia*; Sb – *Sporobacter*; Nb – *Negativibacillus*; Im – *Intestinimonas*; Av – *Abyssivirga*; Tb – *Turicibacter*; Afu – *Anaerofustis*; Phc – *Phocaeicola*; Mh – *Mailhella*; Bp – *Bilophila*; Rub – *Rubneribacter*; Asp – *Aestuariaispira*; Ali – *Alistipes*; Sg – *Subdoligranulum*; Afi – *Anaerofilum*; Tc – *Thomasclavelia* (*Clostridium* XVIII); Fb – *Fusicatenibacter*; Pt – *Parasutterella*. Дополнительные обозначения (возле таксонов): P – расход корма на 1 кг биомассы; B – вес (живая масса) цыплят-бройлеров на 42 сут.; направление стрелок показывает повышение или снижение соответствующих параметров продуктивности.

Fig. 3. Correlation relationships characterizing the co-occurrence of bacterial taxa in the gut microbiome of Arbor Acres crossbred broiler chickens. Direct relationships are indicated by solid lines; inverse relationships by dashed lines.

Taxa from Cluster I are highlighted in green, and those from Cluster II in red (see Fig. 2). Letter abbreviations: Bd – *Bacteroides*; Ls – *Lachnospira*; Rut – *Ruthenibacterium*; Vv – *Vampirovibrio*; Pb – *Peptacetobacter*; Ht – *Hungatella*; Dm – *Dielma*; Ap – *Anaeroplasma*; At – *Anaerotignum*; Lm – *Lacrimispora*; As – *Anaerostipes*; Fc – *Frisingicoccus*; Ob – *Oscillibacter*; Mm – *Massiliimalia*; Hf – *Harryflintia*; uncles – unclassified *Lachnospiraceae*; Lb – *Lawsonibacter*; Pc – *Pseudoclostridium*; Ge – *Gemmiger*; Ph – *Phoceia*; Sb – *Sporobacter*; Nb – *Negativibacillus*; Im – *Intestinimonas*; Av – *Abyssivirga*; Tb – *Turicibacter*; Afu – *Anaerofustis*; Phc – *Phocaeicola*; Mh – *Mailhella*; Bp – *Bilophila*; Rub – *Rubneribacter*; Asp – *Aestuariaispira*; Ali – *Alistipes*; Sg – *Subdoligranulum*; Afi – *Anaerofilum*; Tc – *Thomasclavelia* (*Clostridium* XVIII); Fb – *Fusicatenibacter*; Pt – *Parasutterella*.

Additional symbols (next to taxa): P – feed consumption per 1 kg of biomass; W – weight (live weight) of broiler chickens at 42 days; the direction of the arrows indicates an increase or decrease in the corresponding productivity parameters.

В противоположность этому, представители II кластера были относительно разрознены, в том числе 5 из них (*Intestinimonas*, *Subdoligranulum*, *Negativibacillus*, *Thomasclavelia* (*Clostridium* XVIII) и *Parasutterella*) не показали значимых взаимосвязей с какими-либо другими членами микробного сообщества, а трехкомпонентная ассоциация «*Alistipes* – *Anaerofilum* – *Fusicatenibacter*» демонстрировала выраженную обратную взаимосвязь ($r < -0,7$; $p < 0,001$) с описанной выше корреляционной плеядой I кластера (рис. 3). При этом присутствие названных выше бактериальных таксонов в составе кишечного микробиома птицы представляется неблагоприятным феноменом, являющимся вероятной причиной истощения гуморальных факторов естественной противомикробной резистентности (БАСК+ЛАСК) с последующей компенсаторной индукцией ТКБ.

В контексте проведенного исследования представляется важным, что наличие и численность ряда бактериальных таксонов II кластера в кишечных микробиомах модулировалось использованием кормовых добавок, обладающих прямым антибактериальным эффектом [2] или нарушающих химическую коммуникацию в бактериальных сообществах [20]. В частности, относительное содержание родов *Subdoligranulum* и *Anaerofilum* имело тенденцию к снижению в присутствии 4-гексилрезорцинола, а роды

Thomasclavelia (*Clostridium* XVIII) и *Fusicatenibacter* частично ингибировались в присутствии кверцетина. В свою очередь присутствие рода *Parasutterella* наиболее выражено отрицательно коррелировало с кормовым использованием 7-гидроксикумарина ($r=-0,3894$ $p=0,0406$). Соответственно, приведенные выше данные могут частично объяснять эффекты кормовых добавок на профиль факторов естественной противоинойфекционной резистентности сыворотки крови цыплят-бройлеров через воздействие на компоненты их кишечного микробиома, ассоциированные с изменением баланса (БАСК+ЛАСК):ТКБ.

В завершение исследования уровни факторов естественной резистентности, состав кишечных микробиомов цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres и эффекты кормовых добавок были сопоставлены с зоотехническими показателями продуктивности, принятыми для оценки эффективности мясного птицеводства [8].

В первом варианте анализа единственная статистически значимая ассоциация ($r=0,4585$; $p=0,0141$) была зафиксирована между уровнем ТКБ и расходом корма на 1 кг биомассы (рис. 4). При этом наиболее вероятным объяснением подобной зависимости является перенаправление питательных веществ в сторону от продуктивных метаболических процессов с их расходом на активацию иммунного ответа и поддержание воспаления [22], маркером которых является повышенный уровень ТКБ.

В свою очередь, оценка роли микробиома показала связь повышенного расхода корма на 1 кг биомассы с рядом бактериальных таксонов, для которых ранее была продемонстрирована ассоциированность с повышенным уровнем сывороточного ТКБ (рис. 3). В частности, снижение эффективности конверсии корма в биомассу зафиксировано для родов *Parasutterella* ($r=0,6922$; $p=0,00005$), *Anaerofilum* ($r=0,6962$; $p=0,00003$), *Thomasclavelia* (*Clostridium* XVIII) ($r=0,4333$ $p=0,0213$) и *Fusicatenibacter* ($r=0,4218$; $p=0,0254$), что в трёх последних случаях сопровождалось статистически значимым негативным эффектом на итоговый вес тела птицы к 42 суткам выкармливания. В то же время указанные зависимости в связке «микробиом – продуктивность» не могут быть интерпретированы как однозначно однонаправленные: для некоторых таксонов II кластера показан стимулирующий эффект на итоговую биомассу, потенциально объясняемый не столько их взаимодействием с систему естественной противоинойфекционной резистентности, сколько вероятной реализацией метаболических путей, важных для эффективного пластического метаболизма в теле птицы.

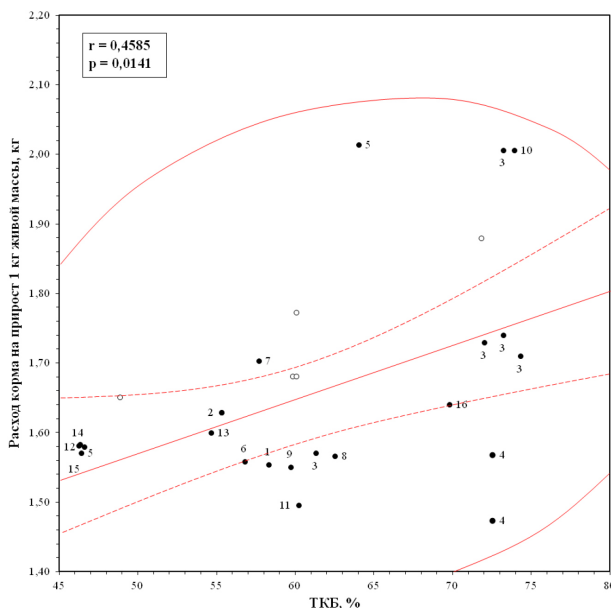


Рис. 4. Распределение величин, характеризующих расход корма на 1 кг биомассы, в зависимости от уровней ТКБ в сыворотке крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres.

Обозначения 1-16 аналогичны рис. 1. Красными линиями обозначены параметры связи между анализируемыми параметрами: сплошная линия отражает коэффициент линейной регрессии; пунктирные линии обозначают 95 % доверительный интервал; сплошная линия эллипса ограничивает облако рассеяния значений исследуемой выборки.

Fig. 4. Distribution of values characterizing feed conversion per 1 kg of biomass, depending on TKB levels in the blood serum of Arbor Acres crossbred broiler chickens.

Legend 1–16 is the same as in Fig. 1. The red lines indicate the relationships between the analyzed parameters: the solid line represents the linear regression coefficient; the dashed lines denote the 95% confidence interval; the solid line of the ellipse bounds the scatter plot of the values from the study sample.

Наконец, учет эффектов отдельных кормовых добавок показал, что некоторые из них, вызывающие сопряженные изменения в составах кишечных микробиомов и профилях факторов естественной резистентности, позволяют снижать расход корма на прирост 1 кг биомассы. Указанная тенденция обнаруживалась для пробиотического препарата на основе *B. cereus* IP 5832, антибиотика хлортетрациклина и 4-гексилрезорцинола, будучи наиболее выраженной при кормовом использовании 7-гидроксикумарина ($r = -0,4570$; $p = 0,0145$).

Заключение

Результаты проведенного исследования впервые позволяют оценить ассоциации профиля факторов естественной противомикробной резистентности в сыворотке крови цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres с составом их кишечного микробиома, а также рядом показателей сельскохозяйственной продуктивности, и на этой основе сформировать представления о причинно-следственных взаимосвязях в системе «микробиом – естественный иммунитет – эффективность птицеводства».

Во-первых, четко обозначена обратная зависимость между уровнями БАСК и ЛАСК как показателей высокого уровня естественной устойчивости организма птицы к бактериальной агрессии, а с другой – повышенной активностью ТКБ (бета-лизуна) как индикатора истощения названных защитных механизмов.

Во-вторых, определены перечни бактериальных таксонов, присутствие которых в микробиоме кишечника цыплят-бройлеров является условием для нормального развития естественного иммунитета или его «срыва» с индукцией воспалительного процесса, сопровождающегося дегрануляцией тромбоцитов.

В-третьих, показано, что развитие эндогенного воспаления, обусловленного определенными членами кишечного микробиома и характеризующегося изменением баланса (БАСК+ЛАСК)/ТКБ, негативно сказывается на эффективности птицеводства, в частности – снижает конверсию корма в биомассу и в ряде случаев результируется в уменьшении итогового веса цыплят-бройлеров.

Указанные взаимосвязи могут быть проиллюстрированы на примере бактерий рода *Parasutterella*, на наиболее высоком таксономическом уровне относящихся к филуму *Pseudomonadota* (рис. 5). При этом ранее для представителей данного таксона, обнаруживаемого в микробиомах человека и животных, показана статистически значимая ассоциация с высокоточным уровнем бактериальных липополисахаридов (ЛПС), отражающей степень эндотоксинемии [9] и ассоциированной с развитием ряда патологий, включая воспалительные заболевания кишечника [25]. В рассматриваемом же случае аналогичная эндотоксинемия представляется наиболее вероятной причиной снижения БАСК (как следствия активации белков системы комплемента на циркулирующих ЛПС) с одновременным ростом уровня сывороточного ТКБ (как результата связывания ЛПС и комплексов «ЛПС-комплемент» с соответствующими рецепторами на поверхности активируемых тромбоцитов) [23]. В свою очередь эндотоксинемия и

обусловленные ей воспалительные реакции видятся условием для перенаправления питательных веществ в сторону от продуктивных метаболических процессов с нарушением процесса конверсии корма в биомассу.

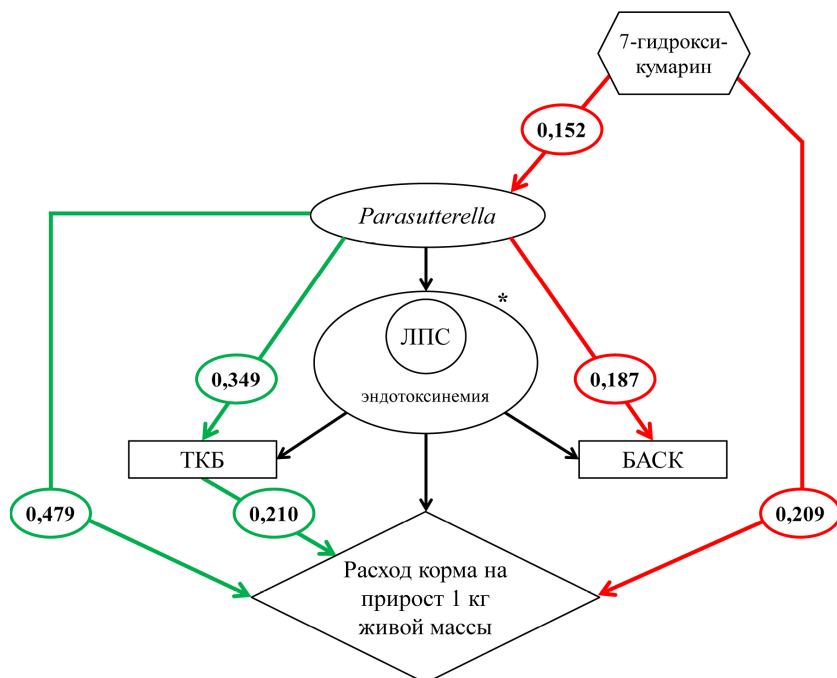


Рис. 5. Вероятные причинно-следственные взаимосвязи в системе «микробиом – естественный иммунитет – эффективность птицеводства» (на примере рода *Parasutterella*). Зеленые стрелки указывают повышающие воздействия, красные – понижающие воздействия. Цифры на стрелках показывают значения коэффициентов детерминации (r^2), отражающие силу данных воздействий.

Fig. 5. Probable cause-and-effect relationships in the “microbiome – innate immunity – poultry production efficiency” system (using the genus *Parasutterella* as an example). Green arrows indicate positive effects, while red arrows indicate negative effects. The numbers on the arrows indicate the values of the coefficients of determination (r^2), reflecting the strength of these effects.

В рассматриваемом контексте также важно, что состав кишечного микробиома, в том числе включающий бактериальные таксоны, значимые для определения баланса гуморальных факторов естественной противоинойфекционной резистентности, может модулироваться воздействием ряда кормовых добавок. В частности, в рассматриваемом выше приме-

ре относительное присутствие бактерий рода *Parasutterella* эффективно снижается в присутствии 7-гидроксикумарина – ингибитора химической коммуникации у представителей филума *Pseudomonadota* [19], что результируется в нормализации значений расхода корма на 1 кг живой массы цыплят-бройлеров кросса Arbor Acres (рис. 5).

Тем самым результаты проведенного исследования являются шагом на пути совершенствования инструментария оценки эффективности схем кормления сельскохозяйственной птицы, а именно – обосновывают анализ баланса сывороточных факторов (БАСК+ЛАСК)/ТКБ как индикаторов противо- и провоспалительных процессов, зависящих от состава кишечного микробиома и оказывающих воздействие на параметры мясной продуктивности.

Заключение комитета по этике. Протокол исследования одобрен Комитетом по этике животных ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (Постановление № 1/2019 от 25 марта 2019 г. и Постановление № 2/2022 от 28 марта 2022 г.).

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Экспериментальные группы, получавшие химически синтезированные аналоги молекул растительного происхождения (гамма-октанолактон, 7-гидроксикумарин, ванилин/ванилиновая кислота, 4-гексилрезорцинол, кверцетин или их комбинации) были проанализированы при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-16-00036-П. Экспериментальные группы, рацион которых включал пробиотическую добавку или антибиотик хлортетрациклин, были исследованы в соответствии с планом НИР ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН FNWZ-2025-0003.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность Центру коллективного пользования научным оборудованием «Персистенция микроорганизмов» (<https://ikvs.info/institut/laboratorii/czkp>) за техническую помощь в проведении анализа микробиома кишечника цыплят-бройлеров.

Список литературы

1. Бухарин, О. В., & Сулейманов, К. Г. (1998). Свойства и функции тромбоцитарного катионного белка. *Успехи современной биологии*, 118(2), 194–204. EDN: <https://elibrary.ru/YMSYTR>
2. Грозина, А. А. (2014). Состав микрофлоры желудочно-кишечного тракта у цыплят-бройлеров при воздействии пробиотика и антибиотика (по данным T-RFLP-RT-PCR). *Сельскохозяйственная биология*, (6), 46–58. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2014.6.46rus>. EDN: <https://elibrary.ru/TEPGCX>

3. Дерябин, Д. Г., Каримов, И. Ф., Манухов, И. В., Толмачева, Н. А., & Балабанов, В. П. (2012). Дифференцированная оценка бактерицидных систем сывортки крови с использованием рекомбинантных люминесцирующих штаммов *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis*. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*, 154(7), 68–73. EDN: <https://elibrary.ru/PANBJB>
4. Дусакаев, Г. К., Рахматуллин, Ш. Г., Косян, Д. Б., Русакова, Е. А., Кван, О. В., & Левахин, Г. И. (2022). Влияние совместного использования гамма-окталактона и хлортетрациклина в рационе бройлеров: живая масса, эффективность использования корма и микробиом слепого кишечника. *Аграрная наука*, (9), 47–53. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-362-9-47-53>. EDN: <https://elibrary.ru/FSEANC>
5. Дусакаев, Г. К., Лазебник, К. С., & Климова, Т. А. (2022). Оценка микробного разнообразия слепого отдела кишечника цыплят-бройлеров при введении кумарина и кормового антибиотика в рацион. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*, 17(4), 555–566. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-4-555-566>. EDN: <https://elibrary.ru/FUHJBX>
6. Дусакаев, Г. К., Русакова, Е. А., & Дерябин, Д. Г. (2022). Использование гамма-октанолактона в рационе бройлеров: микробиом кишечника. *Международный вестник ветеринарии*, (4), 152–158. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.4.152>. EDN: <https://elibrary.ru/XGADAX>
7. Дусакаев, Г. К., Власенко, Л. В., Косян, Д. Б., & Курилкина, М. Я. (2023). Влияние малых молекул растительного происхождения на микробное разнообразие слепого отдела кишечника цыплят-бройлеров. *Птицеводство*, (4), 46–51. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2023-72-4-46-516>. EDN: <https://elibrary.ru/SASHWF>
8. Егоров, И. А., Околелова, Т. М., Тищенко, А. Н., Ленкова, Т. Н., Паньков, П. Н., Езерская, А. В., ... & Громова, Т. И. (2004). *Методика проведения научных и производственных исследований по кормлению сельскохозяйственной птицы* (В. И. Фисинин & Ш. А. Имангулов, Ред.). Сергиев Посад. 44 с. EDN: <https://elibrary.ru/SWDFID>
9. Кабурова, А. Н., Драпкина, О. М., Юдин, С. М., Яфарова, А. А., Корецкий, С. Н., Покровская, М. С., ... & Серебрянская, З. З. (2022). Связь микробиоты кишечника с системным воспалением и эндотоксемией у пациентов с хронической сердечной недостаточностью и сохраненной фракцией выброса. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*, 21(9), 3315. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2022-3315>. EDN: <https://elibrary.ru/SOFRXO>
10. Ляпин, О. А., Торшков, А. А., Тайгузин, Р. Ш., Хабибуллин, Э. Г., Окунев, Д. А., & Джамбулатова, К. Д. (2022). Физиологический статус бычков при минимизации технологического прессинга комплексами антистрессантов. *Известия Оренбургского Государственного Аграрного Университета*, 4(96), 253–260. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-96-4-253-260>. EDN: <https://elibrary.ru/EUZOGG>

11. Садовников, Н. В., Придыбайло, Н. Д., Верещак, Н. А., & Заслонов, А. С. (2009). *Общие и специальные методы исследования крови птиц промышленных кроссов: монография*. Екатеринбург-Санкт-Петербург: Уральская ГСХА, НПП «АВИВАК». 85 с. ISBN: 978-5-87203-260-6. EDN: <https://elibrary.ru/SNDNEX>
12. Саруханов, В. Я., Исамов, Н. Н., & Колганов, И. М. (2012). Метод определения лизоцимной активности крови у сельскохозяйственных животных. *Сельскохозяйственная биология*, 47(2), 119–122. EDN: <https://elibrary.ru/PVWOUH>
13. Серебряная, Н. Б., Якуцени, П. П., & Клишко, Н. Н. (2017). Роль тромбоцитов в патогенезе бактериальных инфекций. *Журнал инфектологии*, 9(4), 5–13. <https://doi.org/10.22625/2072-6732-2017-9-4-5-13>. EDN: <https://elibrary.ru/YNMCBD>
14. Aviagen. (2022). *Спецификации бройлерных рационов корма Arbor Acres*. https://aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/RUS_TechDocs/AA_BroilerNutritionSpecifications2022_RU.pdf
15. Abdul-Aziz, T. A., & el-Sukhon, S. N. (1996). Serum sensitivity and apathogenicity for chickens and chick embryos of *Escherichia coli* J5 strain. *Veterinary research*, 27(3), 267–271.
16. Deryabin, D. G., Kosyan, D. B., Inchagova, K. S., & Duskaev, G. K. (2023). Plant-Derived Quorum Sensing Inhibitors (Quercetin, Vanillin and Umbelliferon) Modulate Cecal Microbiome, Reduces Inflammation and Affect Production Efficiency in Broiler Chickens. *Microorganisms*, 11(5), 1326. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051326>. EDN: <https://elibrary.ru/DTQURZ>
17. Duskaev, G., Kvan, O., Kosyan, D., Rakhmatullin, S., & Levakhin, G. (2021). Coumarin derivative and *Bacillus cereus* change live weight and cecal ecology in broilers. *AIMS Agric. Food*, 6(1), 360–380. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2021022>. EDN: <https://elibrary.ru/NBMBIY>
18. ElHag, S., Motelib, A. A., Soltan, M. A., & Gawad, M. A. (2021). Growth Performance and Health Status of Broiler Chickens Treated with Natural Kaolin. *World. Vet. J.*, 11(1), 29–36. <https://doi.org/10.54203/scil.2021.wvj4>. EDN: <https://elibrary.ru/KLZDDI>
19. El-Sawy, E. R., Abdel-Aziz, M. S., Abdelmegeed, H., & Kirsch, G. (2024). Coumarins: Quorum Sensing and Biofilm Formation Inhibition. *Molecules*, 29(19), 4534. <https://doi.org/10.3390/molecules29194534>. EDN: <https://elibrary.ru/SVPTEW>
20. Falà, A. K., Álvarez-Ordóñez, A., Filloux, A., Gahan, C. G. M., & Cotter, P. D. (2022). Quorum sensing in human gut and food microbiomes: Significance and potential for therapeutic targeting. *Frontiers in microbiology*, 13, 1002185. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1002185>. EDN: <https://elibrary.ru/WRDZZC>
21. Fernández, H., Giusti, G., & Bertoglio, J. C. (1995). Effect of the complement system on the sensitivity of *Campylobacter jejuni* and *Campylobacter coli* to human blood serum. *Brazilian journal of medical and biological research*, 28(2), 227–229.

22. Gouvêa, V. N., Cooke, R. F., & Marques, R. S. (2022). Impacts of stress-induced inflammation on feed intake of beef cattle. *Front. Anim. Sci.*, 3, 962748. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.962748>. EDN: <https://elibrary.ru/ASCMWN>
23. Hamzeh-Cognasse, H., Damien, P., Chabert, A., Pozzetto, B., Cognasse, F., & Garraud, O. (2015). Platelets and infections – complex interactions with bacteria. *Frontiers in immunology*, 6, 82. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2015.00082>. EDN: <https://elibrary.ru/UUFSNX>
24. Jiang, L., Li, Y., Wang, L., Guo, J., Liu, W., Meng, G., Zhang, L., Li, M., Cong, L., & Sun, M. (2021). Recent Insights Into the Prognostic and Therapeutic Applications of Lysozymes. *Frontiers in pharmacology*, 12, 767642. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.767642>. EDN: <https://elibrary.ru/COJCZB>
25. Ju, T., Kong, J. Y., Stothard, P., & Willing, B. P. (2019). Defining the role of *Parasutterella*, a previously uncharacterized member of the core gut microbiota. *The ISME journal*, 13(6), 1520–1534. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0364-5>. EDN: <https://elibrary.ru/BSADBY>
26. Karakolev, R., Petrova-tsenin, P., Petrova, R., & Koynarski, T. (2022). Effect of Avigen immunomodulator on beta lysine activity in broilers. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 32(2), 260–265. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.1013030>. EDN: <https://elibrary.ru/SQGOMF>
27. Pashtetsky, V., Ostapchuk, P., Postnikova, O., Zubochenko, D., & Kuevda, T. (2020). Effect of *Satureja montana* essential oil on the bactericidal activity of broiler chickens blood serum. *E3S Web Conf.*, 224. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022404023>. EDN: <https://elibrary.ru/YPGURJ>
28. Shajahmetova, E., Deryabin, D., & Duskaev, G. (2021). Gamma Lactone and vanillic acid change the microbiome of broiler blind appendage. *Biotechnol. Biotechnol. Equip.*, 35(S1), S74. EDN: <https://elibrary.ru/NMEVGQ>
29. Stratton, C. W. (1988). Serum bactericidal test. *Clinical microbiology reviews*, 1(1), 19–26. <https://doi.org/10.1128/CMR.1.1.19>
30. Thaïss, C. A., Zmora, N., Levy, M., & Elinav, E. (2016). The microbiome and innate immunity. *Nature*, 535(7610), 65–74. <https://doi.org/10.1038/nature18847>. EDN: <https://elibrary.ru/WPXOTL>

References

1. Bukharin, O. V., & Suleimanov, K. G. (1998). Properties and functions of platelet cationic protein. *Advances in Modern Biology*, 118(2), 194–204. EDN: <https://elibrary.ru/YMSYTR>
2. Grozina, A. A. (2014). Composition of gastrointestinal tract microflora in broiler chickens under the effect of probiotic and antibiotic (based on T-RFLP-RT-PCR data). *Agricultural Biology*, (6), 46–58. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2014.6.46rus>. EDN: <https://elibrary.ru/TEPGCX>

3. Deryabin, D. G., Karimov, I. F., Manukhov, I. V., Tolmacheva, N. A., & Balabanov, V. P. (2012). Differentiated assessment of bactericidal systems of blood serum using recombinant luminescent strains of *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis*. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 154(7), 68–73. EDN: <https://elibrary.ru/PANBJB>
4. Duskaev, G. K., Rakhmatullin, Sh. G., Kosyan, D. B., Rusakova, E. A., Kvan, O. V., & Levakhin, G. I. (2022). Effect of combined use of gamma-octalactone and chlor-tetracycline in the diet of broilers: live weight, feed efficiency, and cecal microbiome. *Agrarian Science*, (9), 47–53. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-362-9-47-53>. EDN: <https://elibrary.ru/FSEANC>
5. Duskaev, G. K., Lazebnik, K. S., & Klimova, T. A. (2022). Assessment of microbial diversity of the cecal section of the intestine of broiler chickens when coumarin and feed antibiotic are introduced into the diet. *Vestnik of the Russian University of Peoples' Friendship. Series: Agronomy and Animal Husbandry*, 17(4), 555–566. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-4-555-566>. EDN: <https://elibrary.ru/FUHJBX>
6. Duskaev, G. K., Rusakova, E. A., & Deryabin, D. G. (2022). Use of gamma-octa-nolactone in the diet of broilers: intestinal microbiome. *International Veterinary Bulletin*, (4), 152–158. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.4.152>. EDN: <https://elibrary.ru/XGADAX>
7. Duskaev, G. K., Vlasenko, L. V., Kosyan, D. B., & Kurilkina, M. Ya. (2023). Influence of small molecules of plant origin on microbial diversity of the cecal section of the intestine of broiler chickens. *Poultry Farming*, (4), 46–51. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2023-72-4-46-516>. EDN: <https://elibrary.ru/SASHWF>
8. Egorov, I. A., Okolelova, T. M., Tishenkov, A. N., Lenkova, T. N., Pan'kov, P. N., Ezerskaya, A. V., ... & Gromova, T. I. (2004). *Methodology for conducting scientific and production studies on feeding agricultural poultry* (V. I. Fisinin & Sh. A. Imangulov, Eds.). Sergiev Posad. 44 p. EDN: <https://elibrary.ru/SWDFID>
9. Kaburova, A. N., Drapkina, O. M., Yudin, S. M., Yafarova, A. A., Koretsky, S. N., Pokrovskaya, M. S., ... & Serebryanskaya, Z. Z. (2022). Relationship of intestinal microbiota with systemic inflammation and endotoxemia in patients with chronic heart failure and preserved ejection fraction. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 21(9), 3315. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2022-3315>. EDN: <https://elibrary.ru/SOFRXO>
10. Lyapin, O. A., Torshkov, A. A., Taiguzin, R. Sh., Khabibullin, E. G., Okunev, D. A., & Dzhambulatova, K. D. (2022). Physiological status of bulls under minimization of technological pressure by complexes of anti-stress agents. *Izvestia of Orenburg State Agrarian University*, 4(96), 253–260. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-96-4-253-260>. EDN: <https://elibrary.ru/EUZOGG>
11. Sadovnikov, N. V., Pridybailo, N. D., Vereshchak, N. A., & Zaslonov, A. S. (2009). *General and special methods for studying blood of poultry of industrial crosses:*

- monograph*. Yekaterinburg–St. Petersburg: Ural State Agricultural Academy, NPP “AVIVAK”. 85 p. ISBN: 978-5-87203-260-6. EDN: <https://elibrary.ru/SNDNEX>
12. Sarukhanov, V. Ya., Isamov, N. N., & Kolganov, I. M. (2012). Method for determining lysozyme activity of blood in farm animals. *Agricultural Biology*, 47(2), 119–122. EDN: <https://elibrary.ru/PVWOUH>
 13. Serebryanaya, N. B., Yakutseni, P. P., & Klimko, N. N. (2017). The role of platelets in the pathogenesis of bacterial infections. *Journal of Infectology*, 9(4), 5–13. <https://doi.org/10.22625/2072-6732-2017-9-4-5-13>. EDN: <https://elibrary.ru/YNMCBD>
 14. Aviagen. (2022). *Arbor Acres broiler feed ration specifications*. https://aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/RUS_TechDocs/AA_BroilerNutritionSpecifications2022_RU.pdf
 15. Abdul-Aziz, T. A., & el-Sukhon, S. N. (1996). Serum sensitivity and apathogenicity for chickens and chick embryos of *Escherichia coli* J5 strain. *Veterinary research*, 27(3), 267–271.
 16. Deryabin, D. G., Kosyan, D. B., Inchagova, K. S., & Duskaev, G. K. (2023). Plant-Derived Quorum Sensing Inhibitors (Quercetin, Vanillin and Umbelliferon) Modulate Cecal Microbiome, Reduces Inflammation and Affect Production Efficiency in Broiler Chickens. *Microorganisms*, 11(5), 1326. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051326>. EDN: <https://elibrary.ru/DTQURZ>
 17. Duskaev, G., Kvan, O., Kosyan, D., Rakhmatullin, S., & Levakhin, G. (2021). Coumarin derivative and *Bacillus cereus* change live weight and cecal ecology in broilers. *AIMS Agric. Food*, 6(1), 360–380. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2021022>. EDN: <https://elibrary.ru/NBMBIY>
 18. ElHag, S., Motelib, A. A., Soltan, M. A., & Gawad, M. A. (2021). Growth Performance and Health Status of Broiler Chickens Treated with Natural Kaolin. *World. Vet. J.*, 11(1), 29–36. <https://doi.org/10.54203/scil.2021.wvj4>. EDN: <https://elibrary.ru/KLZDDI>
 19. El-Sawy, E. R., Abdel-Aziz, M. S., Abdelmegeed, H., & Kirsch, G. (2024). Coumarins: Quorum Sensing and Biofilm Formation Inhibition. *Molecules*, 29(19), 4534. <https://doi.org/10.3390/molecules29194534>. EDN: <https://elibrary.ru/SVPTEW>
 20. Falà, A. K., Álvarez-Ordóñez, A., Filloux, A., Gahan, C. G. M., & Cotter, P. D. (2022). Quorum sensing in human gut and food microbiomes: Significance and potential for therapeutic targeting. *Frontiers in microbiology*, 13, 1002185. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1002185>. EDN: <https://elibrary.ru/WRDZZC>
 21. Fernández, H., Giusti, G., & Bertoglio, J. C. (1995). Effect of the complement system on the sensitivity of *Campylobacter jejuni* and *Campylobacter coli* to human blood serum. *Brazilian journal of medical and biological research*, 28(2), 227–229.
 22. Gouvêa, V. N., Cooke, R. F., & Marques, R. S. (2022). Impacts of stress-induced inflammation on feed intake of beef cattle. *Front. Anim. Sci.*, 3, 962748. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.962748>. EDN: <https://elibrary.ru/ASCMWN>

23. Hamzeh-Cognasse, H., Damien, P., Chabert, A., Pozzetto, B., Cognasse, F., & Garraud, O. (2015). Platelets and infections – complex interactions with bacteria. *Frontiers in immunology*, 6, 82. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2015.00082>. EDN: <https://elibrary.ru/UUFSNX>
24. Jiang, L., Li, Y., Wang, L., Guo, J., Liu, W., Meng, G., Zhang, L., Li, M., Cong, L., & Sun, M. (2021). Recent Insights Into the Prognostic and Therapeutic Applications of Lysozymes. *Frontiers in pharmacology*, 12, 767642. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.767642>. EDN: <https://elibrary.ru/COJCZB>
25. Ju, T., Kong, J. Y., Stothard, P., & Willing, B. P. (2019). Defining the role of *Parasutterella*, a previously uncharacterized member of the core gut microbiota. *The ISME journal*, 13(6), 1520–1534. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0364-5>. EDN: <https://elibrary.ru/BSADBY>
26. Karakolev, R., Petrova-tsenin, P., Petrova, R., & Koynarski, T. (2022). Effect of Avigen immunomodulator on beta lysine activity in broilers. *Yüzuncü Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 32(2), 260–265. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.1013030>. EDN: <https://elibrary.ru/SQGOMF>
27. Pashtetsky, V., Ostapchuk, P., Postnikova, O., Zubochenko, D., & Kuevda, T. (2020). Effect of *Satureja montana* essential oil on the bactericidal activity of broiler chickens blood serum. *E3S Web Conf.*, 224. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022404023>. EDN: <https://elibrary.ru/YPGURJ>
28. Shajahmetova, E., Deryabin, D., & Duskaev, G. (2021). Gamma Lactone and vanillic acid change the microbiome of broiler blind appendage. *Biotechnol. Biotechnol. Equip.*, 35(S1), S74. EDN: <https://elibrary.ru/NMEVGQ>
29. Stratton, C. W. (1988). Serum bactericidal test. *Clinical microbiology reviews*, 1(1), 19–26. <https://doi.org/10.1128/CMR.1.1.19>
30. Thaiss, C. A., Zmora, N., Levy, M., & Elinav, E. (2016). The microbiome and innate immunity. *Nature*, 535(7610), 65–74. <https://doi.org/10.1038/nature18847>. EDN: <https://elibrary.ru/WPXOTL>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Дерябин Дмитрий Геннадьевич, доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории селекционно-генетических исследований в животноводстве

Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук

*ул. 9 января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
dgderyabin@yandex.ru*

Власенко Людмила Викторовна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории селекционно-генетических исследований в животноводстве

*Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук
ул. 9 января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
lv.efremova@yandex.ru*

Каримов Ильшат Файзелгаянович, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории селекционно-генетических исследований в животноводстве; доцент кафедры эпидемиологии и инфекционных болезней *Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации*
ул. 9 января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; ул. Советская, 6, г. Оренбург, 460014, Российская Федерация
ifkarimov@yandex.ru

Дускаев Галимжан Калиханович, доктор биологических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина *Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук*
ул. 9 января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
gduskaev@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Dmitry G. Deryabin, Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Research Assistant, Laboratory of Breeding and Genetic Research in Animal Husbandry *Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences*
29, 9 Yanvary Str., Orenburg, 460000, Russian Federation
dgderyabin@yandex.ru
SPIN-code: 8243-2537
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9578-7947>
ResearcherID: K-5335-2012
Scopus Author ID: 57218145388

Ludmila V. Vlasenko, Candidate of Biological Sciences, Research Assistant, Laboratory of Breeding and Genetic Research in Animal Husbandry *Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences*

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation

lv.efremova@yandex.ru

SPIN-code: 2484-2215

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3790-2783>

ResearcherID: E-8547-2017

Scopus Author ID: 55344908600

Ilshat F. Karimov, Candidate of Biological Sciences, Research Assistant, Laboratory of Breeding and Genetic Research in Animal Husbandry; Associate Professor, Department of Epidemiology and Infectious Diseases
Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State Medical University of the Ministry of Health of Russia

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 6, Sovetskaya Str., Orenburg, 460014 Russian Federation

ifkarimov@yandex.ru

SPIN-code: 2898-9150

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6853-4242>

ResearcherID: F-2041-2015

Scopus Author ID: 26650061100

Galimzhan K. Duskaev, Doctor of Biological Sciences, Professor RAS, Leading Research Assistant, Department of Feeding for Farm Animals and Feed Technology named after S.G. Leushin

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation

gduskaev@mail.ru

SPIN-code: 7297-3319

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9015-8367>

ResearcherID: N-4454-2014

Scopus Author ID: 56192764700

Поступила 28.08.2025

После рецензирования 30.09.2025

Принята 08.10.2025

Received 28.08.2025

Revised 30.09.2025

Accepted 08.10.2025