



Характеристика генов и их экспрессия, ассоциированная с ростовыми показателями цыплят-бройлеров под действием различных кормовых добавок (обзор)

© 2026. Е. А. Сизова, К. С. Нечитайло, К. В. Рязанцева, Д. Е. Шошин, Т. А. Семьнин✉, А. С. Бардакова

ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», г. Оренбург, Российская Федерация

Для производства мяса птицы необходимы высокопродуктивные кроссы, поэтому идентификация и степень проявления генов, вовлеченных в формирование продуктивных признаков цыплят-бройлеров, являются важным шагом на пути к увеличению выхода мяса и улучшению его качества. Изучение генов, отвечающих за ростовые показатели, позволит повысить скороспелость птицы и снизить затраты на корма и обслуживание. В данном обзоре проведен поиск и изучение ряда генов, участвующих в формировании мышечной и жировой ткани, а также генов, регулирующих транспорт нутриентов у цыплят-бройлеров, что, в свою очередь, является важной составляющей для производства достаточного количества мяса птицы. В ходе изучения литературных данных было выяснено, что за формирование мышечной ткани отвечает перечень генов, таких как *GH*, *MYOG*, *MYOD*, *MSTN*, *IGF-1*, *FGF2*, влияющих непосредственно на показатели роста у цыплят-бройлеров. За формирование жировой ткани отвечают гены – *LEP*, *AdipoQ*, *FABP2*, *ACACA*, *PPARA*, *FASN*. Транспорт нутриентов, необходимых для нормального роста тканей и организма в целом, контролирует группа генов – *SLC2A1*, *SLC2A2*, *SLC2A3*, *SLC7A1*, *SLC7A2*, *SLC7A5*, *SLC7A6*, *SLC7A7*, *SLC38A2*. Проведенный анализ литературных данных показал, что использование кормовых добавок, имеющих в составе фитобиотики, пребиотики, пробиотики и синбиотики влияет на активность генов. Это способствует формированию мышечной массы, позволяет поддерживать физиологическое состояние птицы, предотвратит развитие заболеваний, ускорит темпы роста и повысит продуктивность бройлеров.

Ключевые слова: продуктивность, птицеводство, проявление признаков, миогенез, липогенез, мышечная ткань, *Gallus Gallus*, кормовой фактор

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук» (тема № FNWZ-2024-0002).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сизова Е. А., Нечитайло К. С., Рязанцева К. В., Шошин Д. Е., Семьнин Т. А., Бардакова А. С. Характеристика генов и их экспрессия, ассоциированная с ростовыми показателями цыплят-бройлеров под действием различных кормовых добавок (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2026;27(2):272–288.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.272-288>

Поступила в редакцию: 17.04.2025

Принята к публикации: 30.03.2026

Доработана после рецензирования: 09.06.2025

Опубликована онлайн: 27.04.2026

Characteristics of genes and their expression associated with the growth rates of broiler chickens under the influence of various feed additives (review)

© 2026. Elena A. Sizova, Ksenia S. Nechitailo, Kristina V. Ryazantseva, Daniil E. Shoshin, Timofey A. Semynin✉, Alexandra S. Bardakova

Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russian Federation

Highly productive crosses are necessary for the production of poultry meat, therefore, the identification and degree of manifestation of the genes involved in the formation of productive traits of broiler chickens is an important step towards increasing meat yield and improving its quality. The study of the genes responsible for growth indicators will increase the bird precocity and reduce feed and maintenance costs. This review searches for and studies a number of genes involved in the formation of muscle and fat tissue, as well as genes regulating nutrient transport in broiler chickens, which, in turn, is an important component for the production of sufficient quantities of poultry meat. During the study of literature data, it was found out that such genes as *GH*, *MYOG*, *MYOD*, *MSTN*, *IGF-1*, *FGF2* are responsible for muscle tissue formation, these are the main genes that directly affect growth performance in broiler chickens. For the formation of adipose tissue, such genes as *LEP*, *AdipoQ*, *FABP2*, *ACACA*, *PPARA*, *FASN* are responsible. A number of genes such as *SLC2A1*, *SLC2A2*, *SLC2A3*, *SLC7A1*, *SLC7A2*, *SLC7A5*, *SLC7A6*, *SLC7A7*, and *SLC38A2* are responsible for the transport of nutri-

ents required for normal growth of tissues and the body as a whole. Literature data analysis has shown that the use of feed additives with the addition of phytobiotics, prebiotics, probiotics and synbiotics, affects the activity of genes. This contributes to the formation of muscle mass, lets support the physiological state of the bird, prevent the development of diseases, accelerate the growth rate and increase the productivity of broilers.

Key words: productivity, poultry farming, manifestation of traits, myogenesis, lipogenesis, muscle tissue, Gallus Gallus, feed factor

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences (theme No. FNWZ-2024-0002).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citation: Sizova E. A., Nechitailo K. S., Ryazantseva K. V., Shoshin D. E., Semynin T. A., Bardakova A. S. Characteristics of genes and their expression associated with the growth rates of broiler chickens under the influence of various feed additives (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2026;27(2):272–288. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.272-288>

Received: 17.04.2025

Revised: 09.06.2025

Accepted for publication: 30.03.2026

Published online: 27.04.2026

Экспрессия генов жизненно важный клеточный процесс реализации наследственной информации, благодаря которому ген проявляет свой потенциал в конкретном фенотипическом признаке организма¹ [1].

Фундаментальной единицей ДНК является ген. Вся генетическая информация об организме закодирована в виде нуклеотидов. Гены состоят из ДНК, которая представляет собой длинную нить нуклеотидных мономеров. Фосфатная группа, пентоза (дезоксирибоза) и одно из азотистых оснований – аденин (А), тимин (Т), цитозин (С) или гуанин (Г) – составляют эти мономеры. В состав гена входят четыре нуклеотида² [2].

Гены экспрессируются только тогда, когда это необходимо, и экспрессия генов регулируется определенными факторами. Экспериментальные исследования показали, что ген, несущий информацию, не активен все время и может быть активирован или деактивирован как в прокариотических, так и эукариотических организмах. Каждая черта живого организма определяется генами, которые формируют различные признаки, такие как рост, цвет глаз, волос и кожи, группу крови и генетические аномалии³ [3].

Первое упоминание «gene expression» в базе данных PubMed датируется 1946 г., при этом по запросу «gene expression» во временном диапазоне с 1946 по 2025 г. система выдает 1817697 результатов. За последние 30 лет

с 1995 по 2025 г. количество исследований, посвященных теме «gene expression», выросло почти в 4 раза (рис. 1).

Таким образом, с каждым годом мы наблюдаем экспоненциальный рост научных публикаций по теме экспрессии генов, и растущий интерес к генетическим исследованиям.

Применение генетических методов исследования позволяет более точно оценить на молекулярном уровне влияние паратипических факторов на процессы, определяющие формирование фенотипов животных, в первую очередь продуктивности и их устойчивости к неблагоприятным факторам [4]. Изучая транскрипционную активность отдельных генов или всего транскриптома в целом, можно выявить специфические биологически активные свойства нутрицевтиков и ингредиентов кормов, которые могут быть скрыты при оценке фенотипа [5]. Например, ранее изучалась экспрессия генов у сельскохозяйственной птицы, связанных с такими признаками, как:

- инициация воспаления;
- апоптоз;
- антимикробная и противовирусная активность;
- миогенез в период эмбрионального развития;
- устойчивость к токсическим и лекарственным веществам;
- антиоксидантная защита, адаптация к тепловому стрессу.

¹Цаценко Л. В. Генетика: курс лекций. Краснодар: КубГАУ, 2015. 31 с.

²Gene – Structure, Types & Characteristics [Электронный ресурс].

URL: <https://www.geeksforgoeks.org/gene/?ysclid=m840mubdu7401442867/> (дата обращения: 11.03.25).

³Фомченко Н. Е., Фадеева И. В. Экспрессия генов прокариот и эукариот: учебно-методическое пособие для студентов I курса всех факультетов медицинских вузов. Гомель: ГомГМУ, 2016. 32 с.

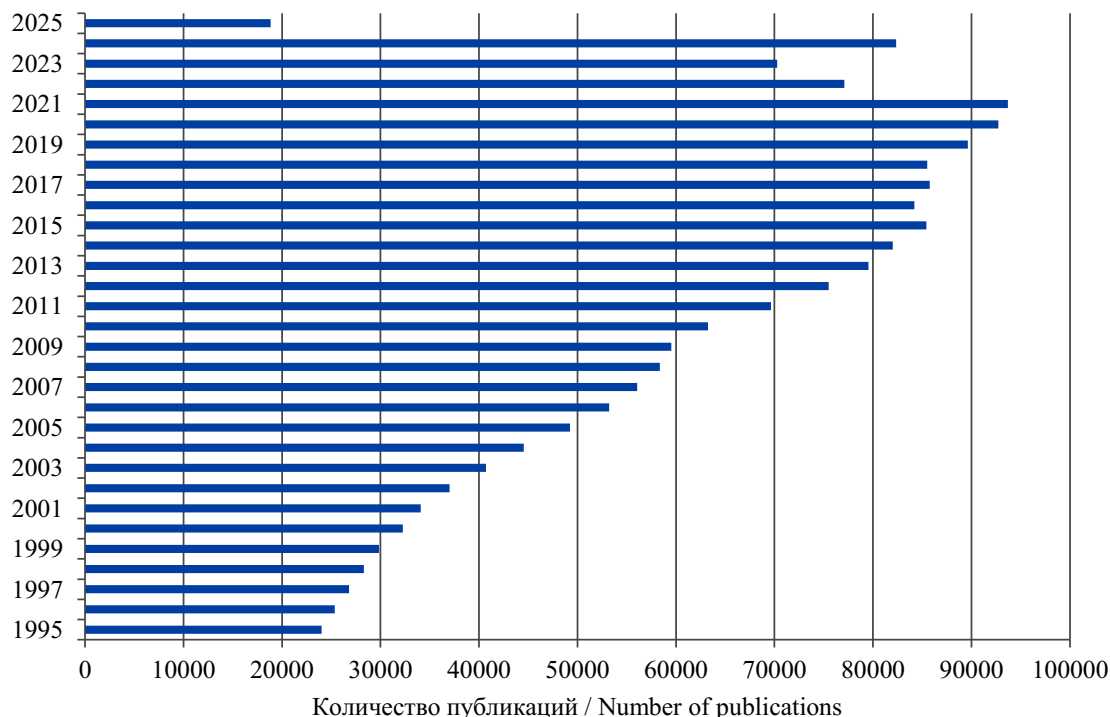


Рис. 1. Количество научных статей, опубликованных по ключевому запросу «gene expression» в базе данных PubMed с 1995 по 2025 г. /

Fig. 1. The number of scientific articles published on the «gene expression» key query in the PubMed database from 1995 to 2025

Тепловой стресс – одно из самых негативных явлений в жизни сельскохозяйственных животных. Птицы, подвергшиеся хроническому тепловому стрессу, теряют запасы гликогена в мышцах, что приводит к получению темного, плотного и сухого мяса [6].

Однако влияние уровня транскрипционной активности целевых генов, определяемое воздействием питательных и биологически активных веществ рациона на формирование хозяйственно полезных и биологических признаков изучено недостаточно [7, 8]. Более того, для птицеводства особый интерес представляют гены, связанные с ростом, мясной продуктивностью, устойчивостью к неблагоприятным факторам, что и определяет актуальность данного исследования. Исходя из вышеизложенного, поиск литературных данных по видам генов, отвечающих за показатели продуктивности цыплят-бройлеров, а именно скорость роста мышечной, жировой и костной ткани, является актуальным.

Цель обзора – провести анализ литературных данных, отражающих перечень и экспрессию генов, ассоциированных с ростовыми показателями мышечной и жировой тканей, отвечающих за транспорт веществ, необходимых для оптимального продуктивного эффекта цыплят-бройлеров при применении

кормовых добавок различного функционала, в том числе в комбинации с фитобиотическими, пробиотическими, пребиотическими и синбиотическими компонентами.

Материал и методы. Рассмотренные источники научной литературы включают отечественных и зарубежных авторов. Они посвящены исследованиям в области применения молекулярно-генетических методов, необходимых для анализа уровня экспрессии генов, связанных с ростовыми показателями различных тканей, а также с усвоением питательных веществ у сельскохозяйственной птицы. Поиск осуществляли по следующим ключевым словам: продуктивность, птицеводство, проявление признаков, миогенез, липогенез, мышечная ткань, *Gallus Gallus*, кормовой фактор. Критерий включения публикаций в обзорную статью – работы, изданные преимущественно за последние 10-15 лет, а также исследования по ключевым генам (*GH*, *MYOG*, *LEP*, *FASN* и другие). Исключались статьи без доступа к полному тексту. Весь поиск литературных данных и научных статей осуществляли с помощью мониторинга международных и российских электронных библиотечных систем: eLIBRARY.RU, PubMed, Cyberleninka, Web of Science, Master Journal List, Elsevier.

Основная часть. Миогенез. Гены, ассоциированные с ростом мышечной ткани. За формирование скелетной мышечной ткани, особенно в процессе эмбриогенеза, отвечает миогенез. Если углубиться в литературу, то миогенез – это сложный, точно регулируемый процесс развития скелетной мышечной ткани, начинающийся во время эмбрионального развития с формирования мышечных клеток-предшественников из мезодермы, который контролируется специфическими транскрипционными факторами MYF5, MYOD, MRF4, PAX7 и PAX3. Миобласты пролиферируют, а затем сливаются вместе, образуя многоядерные миоциты, которые в дальнейшем развиваются в зрелые мышечные волокна [9].

Сателлитные клетки остаются неподвижными во время нормального мышечного гомеостаза, но могут быть активированы для пролиферации и дифференцировки, что способствует росту и восстановлению мышц [10]. Экспрессия миогенных регуляторных факторов (MRF), таких как MYOD и MYOG, управляет поэтапной дифференцировкой миобластов в функциональные мышечные волокна, которая происходит в 3 стадии (рис. 2):

- первая стадия – завершение клеточного цикла и начало экспрессии определенных генов;
- вторая стадия – выравнивание миобластов друг с другом;
- третья стадия – это собственно слияние клеток. На этом этапе решающее значение имеет наличие ионов кальция.

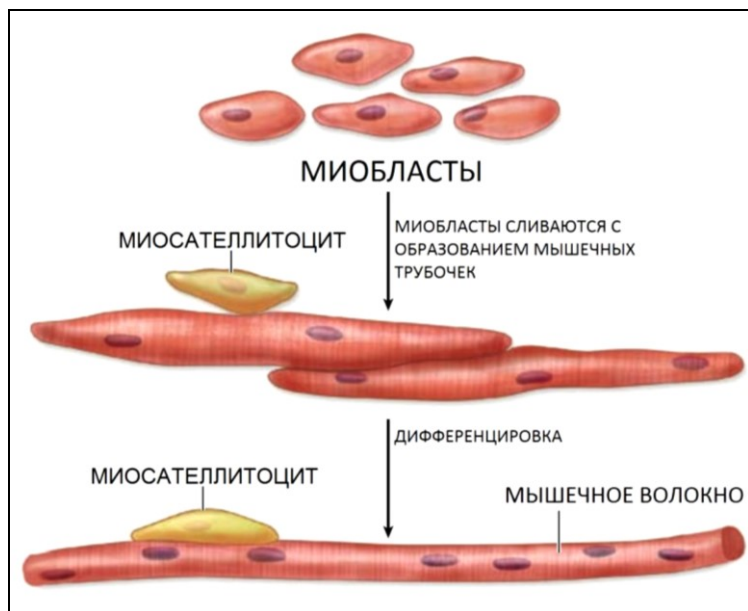


Рис. 2. Схема развития скелетной мышцы⁴ /
Fig. 2. Skeletal muscle development scheme⁴

Слияние включает в себя присоединение актина к плазматической мембране, за которым следует плотное прилегание и создание поры, которая впоследствии быстро расширяется [11].

Определение уровня экспрессии генов, отвечающих за ростовые показатели сельскохозяйственной птицы, необходимо для отбора особей с желаемыми показателями, такими как высокая скорость роста и живая масса. Перечень генов, ассоциированных с ростовыми показателями скелетной мышечной ткани, представлен в таблице 1.

Соматотропин (СТГ) или гормон роста – это белок, состоящий из 191 аминокислоты, который кодируется геном *GN*. Данный белок секретируется передней долей гипофиза и является стимулятором роста костной и хрящевой тканей и внутренних органов. Соматотропин, имея рецепторы на клетках печени, способен стимулировать образование соматомединов – белковых соединений, через которые СТГ способен регулировать ростовые действия всех тканей. Существует 7 типов соматомединов: A1, A2, B1, B2, B3, B4, C⁵.

⁴Бурганова Г. Р., Плюшкина А. С., Андреева Д. И., Гумерова А. А., Киясов А. П. Мышечная ткань: учебно-методическое пособие. Казань, 2018. 44 с.

URL: https://kpfu.ru/portal/docs/F_510699241/Uch_met_posobie_Myshechnaya_tkan_2018_.pdf

⁵Шушкевич Н. И. Биохимия гормонов: учебное пособие по медицинской биохимии. Владимир: изд-во Владимирского ГУ, 2009. 68 с.

Таблица 1 – Гены, ассоциированные с ростом скелетной мышечной ткани /
Table 1 – Genes associated with skeletal muscle tissue growth

Ген / Gene	Белок / Protein	Функция / Function	Материал для исследования / Research material	Ссылка / Reference
<i>GH</i>	Соматотропин / Somatotropin	Эмбриональный и постэмбриональный рост тканей / Embryonic and postembryonic tissue growth	Передняя доля гипофиза, печень / Anterior pituitary gland, liver	[12, 13]
<i>MYOG</i>	Миогенин / Myogenin	Развитие скелетных мышц / Skeletal muscle development	Скелетные мышцы / Skeletal muscles	[14]
<i>MYOD1</i>	Фактор миогенной дифференцировки 1 / Myogenic differentiation factor 1	Развитие скелетных мышц / Skeletal muscle development	Скелетные мышцы / Skeletal muscles	[15]
<i>MSTN</i>	Миостатин или фактор дифференциации 8 / Myostatin or differentiation factor 8	Подавление роста и дифференцировки мышечной ткани / Inhibition of muscle growth and differentiation	Скелетные мышцы / Skeletal muscles	[16, 17, 18, 19]
<i>TGF-beta</i>	Миостатин, новый член суперсемейства TGF-бета / Myostatin, a new member of the TGF-beta superfamily	Негативный регулятор роста скелетных мышц у животных / Negative regulator of skeletal muscle growth in animals	Скелетные мышцы / Skeletal muscles	[20]
<i>IGF-1</i>	Инсулиноподобный фактор роста 1 / Insulin-like growth factor 1	Стимулирует развитие костей и тканей / Stimulates bone and tissue development	Печень, скелетные мышцы / Liver, skeletal muscles	[21, 22, 23]
<i>FGF2</i>	Фактор роста фибробластов 2 / Fibroblast growth factor 2	Играет важную роль в регуляции роста и развития клеток мышечной и костной ткани / Plays an important role in regulating the growth and development of muscle and bone tissue cells.	Мышечная, хрящевая ткани / Muscle, cartilage tissue	[24]
<i>PAX3</i>	Транскрипционный фактор 3 / Transcription factor 3	Формирования скелетных мышц в эмбриональный период / Skeletal muscle formation in the embryonic period	Скелетные мышцы / Skeletal muscles	[25]
<i>PAX7</i>	Транскрипционный фактор 7 / Transcription factor 7	Регенерации мышечной ткани в постэмбриональный период / Regeneration of muscle tissue in the postembryonic period	Скелетные мышцы / Skeletal muscles	

Соматомедины типа А усиливают деление клеток хрящевой ткани, синтез ДНК, РНК, белка и коллагена. Соматомедины типа В стимулируют синтез ДНК и белка в клетках нервной ткани. Соматомедины типа С действуют на жировую и мышечную ткани, где стимулируют поглощение ими глюкозы и тормозят липолиз в жировой ткани, активируют синтез глюкозы в печени из веществ неуглеводной природы [12].

Развитие скелетных мышц определяется в основном пролиферацией и дифференциацией миобластов, которые являются предшественниками мышечных клеток. Миогенные регуляторные факторы и стимуляторы роста имеют решающее значение для развития мышц у сельскохозяйственных животных [13]. Белки миогенных регуляторных факторов и фактора миоцитарного энхансера 2 (MEF2) являются ключевыми факторами транскрипции, которые положительно участвуют в регуляции развития скелетных мышц. Семейство факторов транскрипции MRF состоит из группы основных спирально-петлево-спиральных белков: миогенный фактор дифференцировки 1 (MyoD1); миогенный фактор 5 (Myf5); миогенин и MRF4. Семейство MEF2 состоит из четырех членов – MEF2A, B, C и D. С другой стороны, миостатин (MSTN), член суперсемейства трансформирующего фактора роста β (TGF-β), секретлируемого скелетными мышцами, действует как мощный отрицательный регулятор дифференцировки и роста мышц [14].

На экспрессию генов, участвующих в развитии мышц, существенное влияние оказывают миостатин и миоенин, два важнейших регулятора миогенеза. Взаимодействие между этими факторами имеет решающее значение для понимания дифференциации и роста мышц.

Известно, что *MYOG* – это ген, кодирующий белок миоенин, относящийся к семейству миогенных регуляторных факторов, связанных с пролиферацией и дифференцировкой миоцитов и обеспечивающих рост и развитие скелетных мышц у животных, в том числе в постнатальном периоде онтогенеза. Способствует развитию генов антимикробной (*Gal9*, *Gal10*) и противовирусной защиты (*IRF7*), а также противовоспалительных генов *IL6* и *IL8* [15].

Миостатин – это белок, который кодируется геном *MSTN*, относится к суперсемейству трансформирующих факторов роста TGF- β . Он экспрессируется клетками скелетных мышц животных и человека, основная функция – ограничение роста и дифференцировки мышечных клеток. Мутации в этом гене приводят к гиперплазии мышечных волокон в эмбриональном периоде и их гипертрофии в постэмбриональных периодах онтогенеза [16].

Миостатин более распространен в скелетных мышцах с преобладающим гликолитическим метаболизмом, чем в мышцах с преобладающим окислительным метаболизмом. В меньших концентрациях он обнаруживается в сердце и жировой ткани. Как и другие белки этого семейства, он синтезируется на рибосомах шероховатой эндоплазматической сети в виде белка-предшественника [17].

Помимо того, что миостатин у кур играет важную роль в контроле роста и дифференциации скелетных мышц, данный белок также может участвовать в регуляции роста жировой ткани [18]. Миостатин, называемый фактором дифференциации роста 8 (GDF 8), отрицательный регулятор роста у кур, был охарактеризован на уровне нуклеотидов и белков. Миостатин является перспективной молекулой, связанной с контролем роста у кур, которую можно рассматривать для определения генетических маркеров роста и других экономически важных признаков для дальнейшего использования в селекционной программе, а также для быстрого улучшения признаков роста путем подавления его экспрессии с помощью РНК-интерференции и редактирования генов у птицы [19, 20].

IGF-1 (инсулиноподобный фактор роста 1) – отвечает за рост скелетной мышечной ткани, отложение жира, формирование тушки и качество мяса у кур [21]. Рецептор инсулиноподобного фактора роста 1 (IGF1 R) представляет собой мембранный гликопротеин, опосредующий большинство биологических активностей IGF-1 и IGF-2, которые оказывают важное влияние на рост цыплят, характеристики тушки и качества мяса. Два рецептора (IGF1R и IGF2R) были обнаружены у млекопитающих, но только один (IGF1R) был выявлен у птиц [22]. *IGF-1* стимулирует пролиферацию и дифференциацию миоцитов – клеток-предшественников мышечных волокон. Это приводит к росту мышечной массы и улучшению качества мяса. Данный ген регулирует рост и развитие костной системы, способствуя минерализации и укреплению костной ткани, что особенно важно для быстрорастущих пород птицы. Генетические особенности породы могут влиять на уровень синтеза *IGF-1* [23].

FGF2 – фактор роста фибробластов 2, представляет собой белок, который кодируется одноименным геном и играет важную роль в регуляции роста и развития клеток мышечной и костной ткани. В контексте продуктивности бройлеров FGF2 имеет значительное влияние на такие показатели, как скорость роста, масса тела и качество мяса. Данный белок отвечает за стимуляцию роста мышечной ткани, развитие костной ткани, образование новых кровеносных сосудов и нормальное заживление ран. Экспрессия этого гена необходима для правильного построения мышечных волокон в эмбриональном периоде [24].

PAX3 и PAX7 – это транскрипционные факторы, которые выполняют важную роль в развитии тканей. PAX3 регулирует нервный ствол и, вместе со своим гомологичным PAX7, также экспрессируется в некоторых частях центральной нервной системы. Оба фактора являются ключевыми регуляторами миогенеза, где PAX3 играет важную роль во время раннего формирования скелетных мышц у эмбриона, в то время как PAX7 преобладает во время постнатального развития и регенерации мышц у взрослого организма [25].

Липогенез. Гены, ассоциированные с ростом жировой ткани. Исследования кур (*Gallus Gallus*) оказали значительное влияние на фундаментальную биологию. За последние 80 лет селекционное разведение

достигло впечатляющего прогресса в показателях как яичной, так и мясной продуктивности. Современный коммерческий бройлер является продуктом интенсивного отбора, направленного на быстрый рост и увеличение мышечной массы на протяжении многих поколений. С этими успехами связано множество нежелательных признаков, таких как асцит и хромота, снижение плодовитости и устойчивости к инфекционным заболеваниям. Отбор на быстрый рост также сопровождался повышенным отложением жира у этих животных. Избыточный жир является серьезной проблемой для современной бройлерной промышленности, поскольку он снижает выход мяса с туши, что в свою очередь понижает эффективность использования кормов. Кроме того, избыточный жир отталкивает потребителей и создаёт дополнительные трудности в процессе переработки [26].

Липогенез – это процесс синтеза липидов из избытков глюкозы для последующего мета-

болического использования⁶. Благодаря липогенезу синтезируются триглицериды, которые запасают энергию в виде жировой ткани. Если говорить о чувствительности липогенеза к изменениям в рационе, то полиненасыщенные жирные кислоты снижают липогенез, подавляя экспрессию генов в печени, включая синтазы жирных кислот. Диета, богатая углеводами, наоборот, стимулирует липогенез как в печени, так и жировой ткани, что приводит к повышению уровня триглицеридов в плазме после приема пищи. Голодание снижает липогенез в жировой ткани, что в сочетании с повышенной скоростью липолиза приводит к чистой потере триглицеридов из жировых клеток.

Накопление жира определяется балансом между его синтезом и расщеплением (липолиз). Липогенез включает процессы синтеза жирных кислот и последующего синтеза триглицеридов и происходит как в печени, так и жировой ткани (рис. 3) [27].

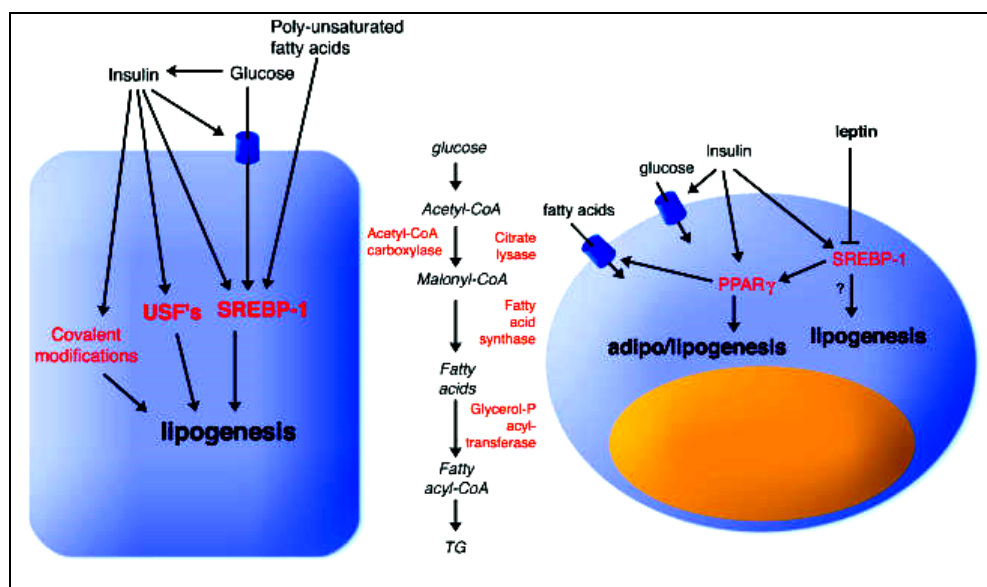


Рис. 3. Регуляция липогенеза в гепатоцитах (слева) и адипоцитах (справа) [27] /
 Fig. 3. Regulation of lipogenesis in hepatocytes (left) and adipocytes (right) [27]

Формирование жировой ткани у сельскохозяйственной птицы контролируется множеством генов, связанных с метаболизмом липидов и энергетическим обменом. Гены работают в комплексе, влияя на различные аспекты липидного обмена, включая синтез, транспортировку и хранение жиров. Пони-

вание генетической основы жиорообразования важно для селекции бройлеров с оптимальными характеристиками мяса и продуктивности. Перечень генов, ассоциированных с ростом жировой ткани у цыплят-бройлеров, представлен в таблице 2.

⁶Lipogenesis [Электронный ресурс]. URL: <https://www.biologyonline.com/dictionary/lipogenesis/> (дата обращения: 12.03.25).

Таблица 2 – Гены, ассоциированные с ростом жировой ткани у цыплят-бройлеров /
Table 2 – Genes associated with adipose tissue growth in broiler chickens

Ген / Gene	Белок / Protein	Функция / Function	Материал для исследования / Research material	Ссылка / Reference
<i>LEP</i>	Лептин / Leptin	Регуляция энергетического обмена и нормализация чувства голода / Regulation of energy metabolism and normalization of hunger	Венозная кровь / Venous blood	[28, 29]
<i>AdipoQ</i>	Адипонектин / Adiponectin	Поддержка уровня глюкозы, расщепление жирных кислот / Glucose level support, fatty acid breakdown	Сыворотка крови, мышечная ткань / Blood serum, muscle tissue	[30]
<i>FABP2</i>	Белок, связывающий жирные кислоты 2 / Fatty acid binding protein 2	Синтез богатых триглицеридами липопротеинов / Synthesis of triglyceride-rich lipoproteins.	Цельная кровь, тонкий кишечник / Whole blood, small intestine	[31]
<i>ACACA</i>	Ацетил-КоА-карбоксилаза / Acetyl-CoA carboxylase	Синтез жирных кислот / Synthesis of fatty acids	Печень, жировая ткань / Liver, adipose tissue	[32]
<i>PPARα</i>	Транскрипционный фактор / The transcription factor	Регулировка дифференцировки адипоцитов / Regulation of adipocyte differentiation	Печень, жировая ткань, почки / Liver, adipose tissue, kidneys	[33]
<i>FASN</i>	Синтаза жирных кислот / Fatty acid synthase	Синтез жирных кислот, регуляция энергетического баланса / Synthesis of fatty acids, regulation of energy balance	Печень, жировая ткань / Liver, adipose tissue	[34, 35]

Лептин – это белок, кодируемый геном *LEP*, участвует в регуляции потребления пищи и энергетического баланса у млекопитающих. Несмотря на текущие споры о существовании гена лептина в геноме курицы, существование лептиноподобного иммунореактивного вещества и функционального рецептора лептина (*LEPR*) было подтверждено [28]. Кроме того, экзогенный мышинный или человеческий лептин оказывает на домашнюю птицу такое же воздействие, как и на млекопитающих. Лептин в основном секретируется жировой тканью млекопитающих, оказывая прямое влияние на липолиз и липогенез жировой ткани. У птиц печень является основным источником лептина и основным органом для липогенеза [29].

Адипонектин – это гормон, кодируемый геном *AdipoQ*, который влияет на утилизацию глюкозы, чувствительность к инсулину и энергетический гомеостаз. Учёными из Китая было проведено исследование влияния адипонектина на отложение липидов у бройлеров. Для лечения птицы использовались росиглитазон и дексаметазон. Всего 120 23-дневных самцов бройлеров кросса Кобб были случайным образом разделены на 3 группы для 3 недель лечения.

Был установлен уровень адипонектина в сыворотке крови и состав жирных кислот в мышцах. Уровни экспрессии адипонектина, рецепторов адипонектина (*adipoR1*, *adipoR2*) и генов, связанных с метаболизмом липидов, в мышцах были измерены с помощью ПЦР в реальном времени. Росиглитазон увеличил концентрацию адипонектина в сыворотке крови, уровень экспрессии адипонектина и *adipoR1*, в то время как дексаметазон показал противоположный эффект. Содержание внутримышечного жира, общее содержание жирных кислот, насыщенных жирных кислот и мононенасыщенных жирных кислот снизилось в группе лечения росиглитазоном. В группе лечения росиглитазоном уровни экспрессии липогенных генов и белков снижались в мышцах, тогда как уровни экспрессии генов липолиза увеличились. Эти результаты показали, что росиглитазон и дексаметазон могут регулировать экспрессию адипонектина в мышцах бройлеров [30].

Биологический механизм отложения абдоминального жира, по-видимому, важен как для понимания ожирения у людей, так и для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных. Сокращение отложения абдоминального жира может позволить

значительно повысить эффективность кормления и ценность туши. Белки, связывающие жирные кислоты (FABP), относятся к семейству малых цитоплазматических белков. Считается, что члены семейства FABP играют роль в поглощении, транспорте и метаболизме жирных кислот [31].

Ацетил-коэнзим А карбоксилаза альфа (ACACA) и белок, связывающий жирные кислоты 2 (FABP2), являются ключевыми факторами липогенеза и транспорта. Они могут играть решающую роль в изменчивости веса абдоминальной жировой ткани у растущих цыплят [32].

Рецептор, активируемый пролифератором пероксисом α (PPAR α), является лиганд-активируемым фактором транскрипции, который участвует в липидном метаболизме различных тканей. Данный рецептор способствует расщеплению, утилизации и катаболизму жирных кислот путём регуляции генов, участвующих в транспорте, связывании и регуляции жирных кислот. PPAR α необходим для процесса кетогенеза и активируется в условиях энергетического голодания [33].

Синтаза жирных кислот (FASN) является ключевым ферментом липогенеза [34]. Следует отметить, что влияние различных факторов питания на экспрессию гена *FASN* у цыплят-бройлеров изучалось в ряде работ. Так, использование эфирных масел черного перца и масла семян редьки в качестве кормовой добавки показало, что экспрессия мРНК гена *FASN* была снижена [35].

Гены, ассоциированные с усвоением питательных веществ. Цыплята-бройлеры характеризуются быстрым ростом и развитием, которые могут быть достигнуты только тогда, когда удовлетворяются потребности животного в энергии и питательных веществах. У цыплят задержка в доступе к корму после вылупления связана с нежелательными последствиями, которые включают снижение показателей роста, неэффективное использование питательных веществ и снижение роста грудных мышц [36]. Эти негативные последствия могут быть частично обусловлены неправильным развитием желудочно-кишечного тракта и иммунной системы. Кроме того, это может привести к преждевременному истощению запасов энергии, поскольку усиление липогенеза в печени не происходит до начала кормления,

при этом уровень гликогена снижается у цыплят к началу поедания корма [37].

Главным местом усвоения питательных веществ является тонкий кишечник, так как рост и продуктивность птицы зависит от способности кишечника переваривать и усваивать питательные вещества [38]. За транспорт аминокислот отвечают гены семейства переносчиков растворённых веществ или SLC (*solute carrier family*). В таблице 3 представлен перечень генов, отвечающих за транспорт нутриентов в организме цыплят-бройлеров.

GLUT представляют собой семейство белков-транспортёров глюкозы, которые транспортируют глюкозу двунаправленно через клеточные мембраны путем облегчённой диффузии. Они являются членами семейства переносчиков растворённых веществ 2A (SLC2A). У млекопитающих ген *SLC2A1* кодирует основной белок GLUT гематоэнцефалического барьера. Кодируемый белок расположен в основном вдоль поверхности клетки и в клеточной мембране. GLUT1 может отвечать за конститутивное или базальное поглощение глюкозы в клетках и может транспортировать широкий спектр альдоз, включая пентозу и гексозу [39].

Ген *SLC2A2* кодирует гликопротеин. Кодируемый белок регулирует двунаправленный транспорт глюкозы через клетки печени, β -клетки панкреатических островков, которые хранят и выделяют инсулин, эпителиальные клетки почек и клетки кишечника. Подобно млекопитающим, у кур наблюдается обильная экспрессия GLUT2 в печени, β -клетках поджелудочной железы, почках и тонком кишечнике [40].

GLUT3 млекопитающих облегчает поглощение глюкозы, 2-дезоксиглюкозы, галактозы, маннозы, ксилозы, фукозы и других моносахаридов через клеточную мембрану и кодируется геном *SLC2A3*. Известно, что GLUT3 кур является нейрональным переносчиком глюкозы и имеет 70 % сходства с последовательностью человека [41]. Нейрональные функции GLUT1 и GLUT3 схожи у кур и млекопитающих. У кур повышение регуляции GLUT1 и GLUT3 связано с образованием плотных соединений в гематоэнцефалическом барьере [42].

GLUT4 присутствует почти исключительно в чувствительных к инсулину тканях, таких как мышечная и жировая ткань, является чувствительным к инсулину транспортёром глюкозы, ответственным за быстрый транспорт глюкозы после стимуляции инсулина у млекопитающих [43].

Таблица 3 – Гены, ассоциированные с транспортом нутриентов в организме цыплят-бройлеров /
Table 3 – Genes associated with nutrient transport in broiler chickens

Ген / Gene	Белок / Protein	Функция / Function	Материал для исследования / Research material	Ссылка / Reference
<i>SLC2A1</i>	Переносчик гексоз GLUT1 / The GLUT1 hexose transporter	Транспорт глюкозы, фруктозы, галктозы, пентозы, гексозы / Transport of glucose, fructose, galactose, pentose, hexose	Тонкий кишечник, скелетные мышцы, печень / Small intestine, skeletal muscles, liver	[39]
<i>SLC2A2</i>	Переносчик гексоз GLUT2 / The GLUT2 hexose transporter		Тонкий кишечник, печень / Small intestine, liver	[40]
<i>SLC2A3</i>	Переносчик гексоз GLUT3 / The GLUT3 hexose transporter		Гипоталамус, печень / Hypothalamus, liver	[41, 42]
<i>GLUT</i>	GLUT4 – мембранные белки-транспортеры глюкозы / The GLUT4 membrane proteins – glucose transporters	Быстрый транспорт глюкозы / Rapid transport of glucose	Мышечная и жировая ткань / muscle and fat tissue	[43]
<i>SLC7A1</i>	Переносчик аминокислот CAT1 / The CAT1 amino acid transporter	Транспорт катионных аминокислот / Transport of cationic amino acids	Тонкий кишечник, грудные мышцы / Small intestine, pectoral muscles	[44]
<i>SLC7A2</i>	Переносчик аминокислот CAT2 / The CAT2 amino acid transporter			[45]
<i>SLC7A5</i>	Переносчик аминокислот LAT1 / Amino acid transporter LAT1	Транспорт L-аминокислот / Transport of L-amino acids	Тонкий кишечник, грудные мышцы / Small intestine, pectoral muscles	[46, 47]
<i>SLC7A6</i>	Переносчик аминокислот yLAT2 / Amino acid transporter yLAT2	Транспорт yL-аминокислот / Transport of yL-amino acids		
<i>SLC7A7</i>	Переносчик аминокислот LAT3 / Amino acid transporter LAT3			
<i>SLC38A2</i>	Переносчик аминокислот SNAT2 / Amino acid transporter SNAT2	Транспорт нейтральных аминокислот / Transport of neutral amino acids		

Существует несколько транспортеров незаменимых аминокислот, которые не могут быть синтезированы в организме, и аминокислот, которые могут быть использованы в качестве субстратов для глюконеогенеза. К ним относятся натрий-независимые катионные переносчики аминокислот CAT1 и CAT2, кодируемые генами *SLC7A1* и *SLC7A2* соответственно [44, 45]. Большой нейтральный переносчик аминокислот LAT1 и Y + L переносчик аминокислот yLAT2, которые кодируются генами *SLC7A5* и *SLC7A6* соответственно и натрий-связанный нейтральный переносчик аминокислот 2 SNAT2, кодируемый геном *SLC38A2* [46]. В рационе молодых цыплят аминокислоты метионин и лизин являются распространёнными компонентами и транспортируются переносчиками LAT1 и SNAT2 или CAT1, CAT2 и yLAT2 соответственно. По крайней мере, двое из этих транспортеров (LAT1 и SNAT2) активируются у млекопитающих, когда присутствуют повышенные уровни транспортируемых ими субстратов [47].

Влияние использования фитобиотических и пробиотических веществ в качестве кормовых добавок. Значимую роль в поддержании здоровой микрофлоры кишечника цыплят-бройлеров играют такие вещества, как фитобиотики, пробиотики, пребиотики, синбиотики, витамины, ферменты, минеральные вещества и аминокислоты. Эти соединения способствуют росту и развитию птицы, обладают антимикробным эффектом и поддерживают нормальную микрофлору кишечника [48].

Микробиота желудочно-кишечного тракта является ключевым фактором развития и регуляции иммунитета, пищеварения и усвоения питательных веществ у птицы [49]. Микробиота может модулироваться биологически активными веществами, такими как пребиотики, пробиотики или синбиотики [50]. Эти биологически активные соединения могут непосредственно модулировать микробиом кишечника и, следовательно, косвенно влиять на процессы в организме. В таблице 4 представлены примеры веществ, используемых в кормлении сельскохозяйственной птицы.

Таблица 4 – Фитобиотики, пребиотики и пробиотики, используемые в птицеводстве и их свойства /
Table 4 – Phytobiotics, prebiotics and probiotics used in poultry farming and their properties

Вещество / Substance	Свойства / Properties	Пример / Example	Ссылка / Reference
Фитобиотики / Phytobiotics	Повышение устойчивости к окислительному стрессу / Increasing resistance to oxidative stress	Инулин, цикорий обыкновенный, зверобой продырявленный, левзея сафлоровидная, тимьян ползучий / Inulin, chicory, amber, safflower leucea, creeping thyme	[51]
	Улучшение пищеварения, повышение иммунитета, антибактериальное действие, улучшение качества мяса / Improved digestion, increased immunity, antibacterial effect, improved meat quality	Тимьян – <i>Thymus vulgaris</i> : обладает сильными антибактериальными свойствами / Thyme – <i>Thymus vulgaris</i> : has strong antibacterial properties. Чеснок – <i>Allium sativum</i> : широкий спектр антимикробной активности, стимулирует иммунитет / Garlic – <i>Allium sativum</i> : a wide range of antimicrobial activity, stimulates the immune system	[52, 53]
	Антимикробная активность и положительное влияние на кишечную микробиоту / Antimicrobial activity and positive effect on intestinal microbiota	Экстракт лука – увеличение относительной численности лактококков в подвздошной кишке и <i>лактобактерий</i> в слепой кишке / Onion extract – an increase in the relative abundance of lactococci in the ileum and lactobacilli in the caecum.	[54]
	Улучшение роста, продуктивности бройлеров и антиоксидантной стабильности мяса / Improving the growth, productivity of broilers and antioxidant stability of meat	Экстракт кизила – улучшает рост и антиоксидантный статус действует как антиоксидант, увеличивая срок хранения замороженного мяса птицы / Dogwood extract - improves growth and antioxidant status, acts as an antioxidant, increasing the shelf life of frozen poultry meat	[55]
Пробиотики / Probiotics	Поддержание здоровой микрофлоры, укрепление иммунной системы / Maintaining a healthy microflora, Strengthening the immune system	<i>Lactobacillus spp.</i> ; <i>Bifidobacterium spp.</i> ; <i>Enterococcus faecium</i> ; <i>Bacillus spp.</i> ; <i>Saccharomyces boulardii</i>	[56, 57]
	Поддержание здоровой микрофлоры, укрепление иммунной системы, снижение риска кишечных инфекций / Maintaining a healthy microflora, strengthening the immune system, reducing the risk of intestinal infections	Инулин способствует росту бифидобактерий и лактобацилл / Inulin promotes the growth of bifidobacteria and lactobacilli. Фруктоолигосахариды (ФОС) стимулируют рост пробиотических бактерий / Fructooligosaccharides (FOS) stimulate the growth of probiotic bacteria.	
Синбиотики / Synbiotics	Стимуляция роста полезной микрофлоры, снижение риска кишечных инфекций / Stimulating the growth of beneficial microflora, reducing the risk of intestinal infections	«Биовестин-лакто», «Максилак», «Мальтидофилос», «Ламинолакт», «Бифидобаек», «Линекс Форте», «Биоформ Комплекс» / «Biovestin-lacto», «Maxilak» «Maltidofilus», «Laminolact», «Bifidobak», «Linex Forte», «Biform Complex»	

Выявлены ростостимулирующие свойства биоактивных соединений растительного происхождения, проявившиеся в увеличении живой массы цыплят-бройлеров и активации генов, связанных с ростом и развитием скелетных мышц (*MYOG*) и синтезом жирных кислот (*FASN*), а также интенсификацией метаболизма. Повышение экспрессии *MSTN* под влиянием биологически активных компонентов, входящих в состав экстракта тимьяна ползучего, обосновывает целесообразность проведения дальнейших исследований по определению оптимального уровня включения данного экстракта. Полученные данные являются нутригенным обоснованием для разработки новой фитокомбинации для повышения мясной продуктивности цыплят-бройлеров на основе оптимального соотношения экстрактов цикория обыкновенного (*Cichorium intubus* L.), зверобоя продырявленного (*Hypericum perforatum* L.), сафлора красильного (*Carthamus tinctorius* L.) и тимьяна ползучего (*Thymus serpyllum* L.) [51].

Фитобиотические добавки можно представить как сложный комплекс биологических соединений растительного происхождения, которые включают широкий спектр растений, трав, фруктов и продуктов переработки, таких как масла, соки, экстракты, фенольные соединения, каротиноиды, танины, фитостерины, азотосодержащие вещества [52]. Анализ литературы продемонстрировал перспективы использования фитобиотиков в птицеводстве благодаря выраженному положительному влиянию на продуктивность, неспецифическую резистентность и физиологическое состояние птицы [53]. Фитобиотики являются одной из исследуемых альтернатив антибиотикам у птицы и домашнего скота из-за их антимикробной активности и положительного влияния на микробиоту кишечника и продуктивные свойства. Они повышают активность пищеварительных ферментов, усиливают конверсию кормов и, следовательно, улучшают продуктивные параметры сельскохозяйственных животных. Эти усовершенствования в функции пищеварения были связаны с ростом полезной микрофлоры кишечника у бройлеров, например молочнокислых бактерий – лактобактерий (*Lactobacillus*, *Acidophilus*) и бифидобактерий (*Bifidobacterium bifidum*) [54].

Например, в одной из статей описывался эксперимент по кормлению цыплят-бройлеров кросса Ross 308 экстрактом кизиловой вишни. Результаты показали, что 200 мг/кг экстракта значительно увеличили уровень экспрессии генов переносчиков глюкозы *GLUT*, что способствовало набору массы [55].

Пребиотики можно представить как биологические активные добавки немикробного происхождения, которые не перевариваются в кишечнике и способны оказывать положительный эффект на организм через стимуляцию роста метаболической активности нормальной микрофлоры кишечника. Пробиотики, наоборот, являются веществами микробного происхождения, оказывающие благоприятные эффекты на физиологические функции, биохимические и поведенческие реакции организма через оптимизацию его микробного статуса. Синбиотики представляют собой комбинацию пребиотиков и пробиотиков. Добавление синбиотических добавок в рацион кормления цыплят-бройлеров способствует лучшему перевариванию питательных веществ. К тому же активность пробиотиков и пребиотиков направлена на нормализацию микрофлоры желудочно-кишечного тракта бройлеров. [56, 57].

Заключение. Промышленное производство мяса цыплят-бройлеров базируется на выращивании высокопродуктивных и скороспелых кроссов. Однако существует множество факторов, способных негативно влиять на скорость роста, массу, аппетит и усвояемость корма у выращиваемой птицы. Поэтому одной из целей птицеводства является поиск кормовых добавок, которые способны изменять активность различных генов, отвечающих за показатели продуктивности у бройлеров. Анализ литературных данных показал, что за рост и развитие мышечной и скелетной мышечной ткани у цыплят-бройлеров, отвечает ряд генов – *GH*, *MYOG*, *MYOD*, *MSTN*, *IGF-1*, *FGF 2*, за формирование жировой ткани – *LEP*, *AdipoQ*, *FABP2*, *ACACA*, *PPARA*, *FASN*, за транспорт нутриентов – *SLC2A1*, *SLC2A2*, *SLC2A3*, *SLC7A1*, *SLC7A2*, *SLC7A5*, *SLC7A6*, *SLC7A7*, *SLC38A2*. В работах многих авторов показано, что на экспрессию генов влияют различные добавки – фитобиотики, пребиотики, пробиотики и синбиотики.

References

1. Андреев В. П. Ген: структурно-функциональная организация единиц генетической информации. Журнал Гродненского государственного медицинского университета. 2007;4(20):143–152. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19091988> EDN: QBUNWH
Andreyev V. P. Gene: structural and functional organization of genetic information units. *Zhurnal Grodnenskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta* = Journal of the Grodno State Medical University. 2007;4(20):143–152. (In Belarus). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19091988>
2. Travers A., Muskhelishvili G. DNA structure and function. *The FEBS journal*. 2015;282(12):2279–2295. DOI: <https://doi.org/10.1111/febs.13307>
3. Маслакова А. А., Долгих В. А., Землянская Е. В. Регуляция экспрессии генов, или что заставляет гены работать. *Природа*. 2023;(10(1298)):13–18. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032874X23100022> EDN: SAFRXR
Maslakova A. A., Dolgikh V. A., Zemlyanskaya E. V. Regulation of gene expression, or what enables genes to operate. *Priroda*. 2023;(10(1298)):13–18. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032874X23100022>
4. Ёлдырым Е. А., Грозина А. А., Вертипрахов В. Г., Ильина Л. А., Филиппова В. А., Лаптев Г. Ю. и др. Экспрессия генов, ассоциированных с иммунитетом, в тканях слепых отростков кишечника и поджелудочной железы цыплят-бройлеров (*Gallus Gallus L.*) при экспериментальном т-2 токсикозе. *Сельскохозяйственная биология*. 2021;56(4):664–681. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.4.664rus> EDN: VZYFUA
Yildirim E. A., Grozina A. A., Vertiprakhov V. G., Ilyina L. A., Filippova V. A., Laptev G. Yu. et al. Effect of t-2 toxin on expression of genes associated with immunity in tissues of the blind processes of the intestinal and pancreas of broilers (*Gallus Gallus L.*). *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2021;56(4):664–681. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.4.664rus>
5. Титов В. Ю., Долгорукова А. М., Кочиш И. И., Мясникова О. В., Никонов И. Н. Особенности метаболизма оксида азота в эмбрионах разных видов птиц как генетически обусловленный признак, связанный с мясной продуктивностью. *Сельскохозяйственная биология*. 2022;57(2):343–355. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.2.343rus> EDN: WQVEIJ
Titov V. Yu., Dolgorukova A. M., Kochish I. I., Myasnikova O. V., Nikonov I. N. Features of nitric oxide metabolism in embryos of different bird species as genetically determined sign associated with meat productivity. *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2022;57(2):343–355. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.2.343rus>
6. Gonzalez-Rivas P. A., Chauhan S. S., Ha M., Fegan N., Dunshea F. R., Warner R. D. Effects of heat stress on animal physiology, metabolism, and meat quality: A review. *Meat Science*. 2020;162:108025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108025>
7. Лаптев Г. Ю., Ёлдырым Е. А., Ильина Л. А., Филиппова В. А., Калиткина К. А., Пономарева Е. С. и др. Экспрессия генов иммунитета и адаптации и состав микробиома у родительского поголовья кур и петухов (*Gallus Gallus L.*) линий СМ5 и СМ9 кросса Смена 9. *Сельскохозяйственная биология*. 2023;58(2):313–332. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.2.313rus> EDN: DILLIU
Laptev G. Yu., Yildirim E. A., Ilyina L. A., Filippova V. A., Kalitkina K. A., Ponomareva E. S. et al. Expression of genes of immune response and adaptation and cecal microbiome composition in males and females of chickens (*Gallus Gallus L.*) in CM5 and CM9 preparental lines of Smena 9 cross. *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2023;58(2):313–332. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.2.313rus>
8. Боголюбова Н. В., Некрасов Р. В., Никанова Д. А., Зеленченкова А. А., Колесник Н. С., Рыков Р. А. и др. Биохимические и молекулярно-генетические индикаторы антиоксидантной защиты и иммунитета у петушков (*gallus gallus domesticus*) разных генотипов. *Сельскохозяйственная биология*. 2023;58(4):669–684. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.4.669rus> EDN: KFERWG
Bogolyubova N. V., Nekrasov R. V., Nikanova D. A., Zelenchenkova A. A., Kolesnik N. S., Rikov R. A. et al. Biochemical and molecular genetic indicators of antioxidant protection and immunity in male chicks (*gallus gallus domesticus*) of different genotypes. *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2023;58(4):669–684. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.4.669rus>
9. Ларкина Т. А., Деметьева Н. В. Влияние генов на формирование скелетных мышц у кур. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023;11(137):19. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.38> EDN: DHITTA
Larkina T. A., Dementeva N. V. Influence of genes on skeletal muscle formation in chickens. *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = International Research Journal. 2023;11(137):19. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.38>
10. Shi X., Garry D. J. Muscle stem cells in development, regeneration, and disease. *Genes&Development*. 2006;20:1692–1708. DOI: <https://doi.org/10.1101/gad.1419406>
11. Meadows E., Cho J. H., Flynn J. M., Klein W. H. Myogenin regulates a distinct genetic program in adult muscle stem cells. *Developmental Biology*. 2008;322(2): 406–414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2008.07.024>

12. Булгакова С. В., Тренева Е. В., Захарова Н. О., Горелик С. Г. Старение и гормон роста: предположения и факты (обзор литературы). Клиническая лабораторная диагностика. 2019;64(12):708–715. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0869-2084-2019-64-12-708-715> EDN: RSBKKO
 Bulgakova S. V., Treneva E. V., Zakharova N. O., Gorelik S. G. Aging and growth hormone: assumptions and facts (literature review). *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika* = Clinical Laboratory Diagnostics. 2019;64(12):708–715. (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0869-2084-2019-64-12-708-715>
13. Mohammadabadi M., Bordbar F., Jensen J., Du M., Guo W. Key Genes Regulating Skeletal Muscle Development and Growth in Farm Animals. *Animals*. 2021;11(3):835. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani11030835>
14. Xiao Y., Wu C., Li K., Gui G., Zhang G., Yang H. Association of growth rate with hormone levels and myogenic gene expression profile in broilers. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2017;8:43. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0170-8>
15. Тюрина Д. Г., Лаптев Г. Ю., Ёылдырым Е. А., Ильина Л. А., Филиппова В. А., Бражник Е. А. и др. Продуктивность и экспрессия генов у цыплят-бройлеров (*Gallus Gallus L.*) кросса Ross 308 под влиянием антибиотиков, глиофосфата и штамма *Bacillus sp.* Сельскохозяйственная биология. 2022;57(6):1147–1165. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.6.1147rus> EDN: JWCРAX
 Tyurina D. G., Laptev G. Yu., Yildirim E. A., Plyina L. A., Filippova V. A., Brazhnik E. A. et al. Influence of antibiotics, glyphosate and a *Bacillus sp.* strain on productivity performance and gene expression in cross Ross 308 broiler chickens (*Gallus Gallus L.*). *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2022;57(6):1147–1165. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.6.1147rus>
16. Esposito P., Picciotto D., Battaglia Y., Costigliolo F., Viazzi F., Verzola D. Myostatin: Basic biology to clinical application. *Advances in Clinical Chemistry*. 2022;106:181–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.acc.2021.09.006>
17. Кукес В. Г., Газданова А. А., Фуралев В. А., Маринин В. Ф., Перков А. В., Ленкова Н. И. и др. Современное представление о биологической роли и клиническом значении миостатина – главного регулятора роста и дифференцировки мышц. Медицинский вестник Северного Кавказа. 2021;16(3):327–332. DOI: <https://doi.org/10.14300/mnnc.2021.16079> EDN: ПAHRЛ
 Kukes V. G., Gazdanova A. A., Furelev V. A., Marinin V. F., Perkov A. V., Lenkova N. I. et al. Modern conception of myostatin biological role and clinical significance as the main regulator of muscle growth and differentiation. *Meditinsky vestnik Severnogo Kavkaza* = Medical News of the North Caucasus. 2021;16(3):327–332. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14300/mnnc.2021.16079>
18. Zhiliang G., Dahai Z., Ning L., Hui L., Xuemei D., Changxin W. The single nucleotide polymorphisms of the chicken myostatin gene are associated with skeletal muscle and adipose growth. *Science in China. Series C, Life sciences*. 2004;47(1):25–30. DOI: <https://doi.org/10.1360/02yc0201>
19. Bhattacharya T. K., Reddy B. R., Chatterjee R. N., Ashwini R. Myostatin (GDF8) gene and its intriguing role in regulating growth in poultry. *The Indian Journal of Animal Sciences*. 2022;92(10):1141–1148. DOI: <https://doi.org/10.56093/ijans.v92i10.124368>
20. Сизова Е. А., Лутковская Я. В. Экспрессия генов, связанных с хозяйственно полезными признаками цыплят-бройлеров (*Gallus Gallus domesticus*), под влиянием различных паратипических факторов (обзор). Сельскохозяйственная биология. 2023;58(4):581–597. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.4.581rus> EDN: GSSMJR
 Sizova E. A., Lutkovskaya Ya. V. Expression of genes associated with economically useful traits in broiler chickens (*Gallus gallus domesticus*) under the influence of various paratypical factors (review). *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2023;58(4):581–597. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.4.581rus>
21. Kareem K. Y., Loh T. C., Foo H. L., Akit H., Samsudin A. A. Effects of dietary postbiotic and inulin on growth performance, *IGF1* and *GHR* mRNA expression, faecal microbiota and volatile fatty acids in broilers. *BMC Veterinary Research*. 2016;12(1):163. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12917-016-0790-9>
22. Lei M., Peng X., Zhou M., Luo C., Nie Q., Zhang X. Polymorphisms of the *IGF1R* gene and their genetic effects on chicken early growth and carcass traits. *BMC Genetics*. 2008;9:70. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2156-9-70>
23. Amills M., Jiménez N., Villalba D., Tor M., Molina E., Cubiló D. et al. Identification of three single nucleotide polymorphisms in the chicken insulin-like growth factor 1 and 2 genes and their associations with growth and feeding traits. *Poultry Science*. 2003;82(10):1485–1493. DOI: <https://doi.org/10.1093/ps/82.10.1485>
24. Nugent M. A., Iozzo R. V. Fibroblast growth factor-2. *The International Journal of Biochemistry Cell Biology*. 2000;32(2):115–120. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1357-2725\(99\)00123-5](https://doi.org/10.1016/s1357-2725(99)00123-5)
25. Buckingham M., Relaix F. PAX3 and PAX7 as upstream regulators of myogenesis. *Seminars in Cell & Developmental Biology*. 2015;44:115–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2015.09.017>
26. Wang H. B., Li H., Wang Q. G., Zhang X. Y., Wang S. Z., Wang Y. X., Wang X. P. Profiling of chicken adipose tissue gene expression by genome array. *BMC Genomics*. 2007;8:193. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2164-8-193>

27. Kersten S. Mechanisms of nutritional and hormonal regulation of lipogenesis. *The EMBO Reports*. 2001;2(4):282–286. DOI: <https://doi.org/10.1093/embo-reports/kve071>
28. Ohkubo T., Nishio M., Tsurudome M., Ito M., Ito Y. Existence of leptin receptor protein in chicken tissues: isolation of a monoclonal antibody against chicken leptin receptor. *General and Comparative Endocrinology*. 2007;151(3):269–273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2007.01.021>
29. Hu Y., Zhang R., Zhang Y., Li J., Grossmann R., Zhao R. In ovo leptin administration affects hepatic lipid metabolism and microRNA expression in newly hatched broiler chickens. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2012;3(1):16. DOI: <https://doi.org/10.1186/2049-1891-3-16>
30. Yan J., Gan L., Qi R., Sun C. Adiponectin decreases lipids deposition by p38 MAPK/ATF2 signaling pathway in muscle of broilers. *Molecular Biology Reports*. 2013;40(12):7017–7025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11033-013-2821-y>
31. Larkina T. A., Sazanova A. L., Fomichev K. A., Barkova O. Y., Malewski T., Jaszczak K., Sazanov A. A. HMG1A and PPARG are differently expressed in the liver of fat and lean broilers. *Journal of Applied Genetics*. 2011;52(2):225–228. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13353-010-0023-z>
32. Hu G., Wang S., Tian J., Chu L., Li H. Epistatic effect between ACACA and FABP2 gene on abdominal fat traits in broilers. *Journal of Genetics and Genomics*. 2010;37(8):505–512. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1673-8527\(09\)60070-9](https://doi.org/10.1016/S1673-8527(09)60070-9)
33. Wang H. B., Li H., Wang Q. G., Zhang X. Y., Wang S. Z., Wang Y. X., Wang X. P. Profiling of chicken adipose tissue gene expression by genome array. *BMC Genomics*. 2007;8:193. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2164-8-193>
34. Cui H. X., Zheng M. Q., Liu R. R., Zhao G. P., Chen J. L., Wen J. Liver dominant expression of fatty acid synthase (FAS) gene in two chicken breeds during intramuscular-fat development. *Molecular Biology Reports*. 2012;39(4):3479–3484. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11033-011-1120-8>
35. Kishawy A. T. Y., Al-Khalafah H. S., Nada H. S., Roushdy E. M., Zagloul A. W., Ahmed Ismail T. et al. Black Pepper or Radish Seed Oils in a New Combination of Essential Oils Modulated Broiler Chickens' Performance and Expression of Digestive Enzymes, Lipogenesis, Immunity, and Autophagy-Related Genes. *Veterinary Sciences*. 2022;9(2):43. DOI: <https://doi.org/10.3390/vetsci9020043>
36. Bigot K., Mignon-Grasteau S., Picard M., Tesseraud S. Effects of delayed feed intake on body, intestine, and muscle development in neonate broilers. *Poultry Science*. 2003;82(5):781–788. DOI: <https://doi.org/10.1093/ps/82.5.781>
37. Wang Y., Li Y., Willems E., Willemsen H., Franssens L., Koppenol A. et al. Spread of hatch and delayed feed access affect post hatch performance of female broiler chicks up to day 5. *Animal*. 2014;8(4):610–617. DOI: <https://doi.org/10.1017/S175173111400007X>
38. Kheravii S. K., Swick R. A., Choct M., Wu S. B. Upregulation of genes encoding digestive enzymes and nutrient transporters in the digestive system of broiler chickens by dietary supplementation of fiber and inclusion of coarse particle size corn. *BMC Genomics*. 2018;19(1):208. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-018-4592-2>
39. Byers M. S., Howard C., Wang X. Avian and Mammalian Facilitative Glucose Transporters. *Microarrays (Basel, Switzerland)*. 2017;6(2):7. DOI: <https://www.mdpi.com/2076-3905/6/2/7>
40. Zhang W., Summers L. H., Siegel P. B., Cline M. A., Gilbert E. R. Quantity of glucose transporter and appetite-associated factor mRNA in various tissues after insulin injection in chickens selected for low or high body weight. *Physiological Genomics*. 2013;45(22):1084–1094. DOI: <https://doi.org/10.1152/physiolgenomics.00102.2013>
41. Seki Y., Sato K., Kono T., Abe H., Akiba Y. Broiler chickens (Ross strain) lack insulin-responsive glucose transporter GLUT4 and have GLUT8 cDNA. *General and Comparative Endocrinology*. 2003;133(1):80–87. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0016-6480\(03\)00145-x](https://doi.org/10.1016/s0016-6480(03)00145-x)
42. Zhao J. P., Bao J., Wang X. J., Jiao H. C., Song Z. G., Lin H. Altered gene and protein expression of glucose transporter1 underlies dexamethasone inhibition of insulin-stimulated glucose uptake in chicken muscles. *Journal of Animal Science*. 2012;90(12):4337–4345. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.2527/jas.2012-5100>
43. Ji J., Tao Y., Zhang X., Pan J., Zhu X., Wang H. et al. Dynamic changes of blood glucose, serum biochemical parameters and gene expression in response to exogenous insulin in Arbor Acres broilers and Silky fowls. *Scientific Reports*. 2020;10(1):6697. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63549-9>
44. Al-Khalafah H. S., Shahin S. E., Omar A. E., Mohammed H. A., Mahmoud H. I., Ibrahim D. Effects of graded levels of microbial fermented or enzymatically treated dried brewer's grains on growth, digestive and nutrient transporter genes expression and cost effectiveness in broiler chickens. *BMC Veterinary Research*. 2020;16(1):424. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12917-020-02603-0>
45. Khwatenge C. N., Kimathi B. M., Nahashon S. N. Transcriptome analysis and expression of selected cationic amino acid transporters in the liver of broiler chicken fed diets with varying concentrations of lysine. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(16):5594. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21165594>
46. Taylor P. M. Role of amino acid transporters in amino acid sensing. *The American journal of clinical nutrition*. 2014;99(1):223S–230S. DOI: <https://doi.org/10.3945/ajcn.113.070086>

47. Payne J. A., Proszkowiec-Weglarz M., Ellestad L. E. Delayed access to feed alters expression of genes associated with carbohydrate and amino acid utilization in newly hatched broiler chicks. *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*. 2019;317(6):864–878. DOI: <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00117.2019>
48. Alagawany M., Elnesr S. S., Farag M. R., Tiwari R., Yatoo M. I., Karthik K. et al. Nutritional significance of amino acids, vitamins and minerals as nutraceuticals in poultry production and health – a comprehensive review. *The veterinary quarterly*. 2020;41(1):1–29. DOI: <https://doi.org/10.1080/01652176.2020.1857887>
49. Patterson J. A., Burkholder K. M. Application of prebiotics and probiotics in poultry production. *Poultry Science*. 2003;82(4):627–631. DOI: <https://doi.org/10.1093/ps/82.4.627>
50. Yang Y, Iji P. A, Choct M. Dietary modulation of gut microflora in broiler chickens: a review of the role of six kinds of alternatives to in-feed antibiotics. *World's Poultry Science Journal*. 2009;65(1):97–114. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0043933909000008>
51. Селионова М. И., Трухачев В. И., Загарин А. Ю., Беляева Н. П., Куликов Е. И. Экспрессия генов, связанных с антиоксидантной защитой, у цыплят-бройлеров под влиянием биологически активных соединений растительного происхождения. *Достижения науки и техники АПК*. 2024;38(12):41–46. DOI: https://doi.org/10.53859/02352451_2024_38_12_41 EDN: KCWHKL
- Selionova M. I., Trukhachev V. I., Zagarin A. Yu., Belyaeva N. P., Kulikov E. I. Expression of genes associated with antioxidant defence in broiler chickens under the influence of bioactive compounds of plant origin. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*. 2024;38(12):41–46. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.53859/02352451_2024_38_12_41
52. Шацких Е. В., Латыпова Е. Н. Показатели крови и продуктивность кур при использовании в рационе фитобиотических препаратов. *Аграрный вестник Урала*. 2023;23(8):78–88. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-237-08-78-88> EDN: CBPVJK
- Shatskikh E. V., Latypova E. N. Blood parameters and productivity of chickens when using phytobiotic preparations in the diet. *Agrarny vestnik Urala = Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023;23(8):78–88. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-237-08-78-88>
53. Zaikina A. S., Buryakov N. P., Buryakova M. A., Zagarin A. Y., Razhev A. A., Aleshin D. E. Impact of Supplementing Phytobiotics as a Substitute for Antibiotics in Broiler Chicken Feed on Growth Performance, Nutrient Digestibility, and Biochemical Parameters. *Veterinary Sciences*. 2022;9(12):672. DOI: <https://doi.org/10.3390/vetsci9120672>
54. Rabelo-Ruiz M., Ariza-Romero J. J., Zurita-González M. J., Martín-Platero A. M., Baños A., Maqueda M. et al. *Allium*-Based Phytobiotic Enhances Egg Production in Laying Hens through Microbial Composition Changes in Ileum and Cecum. *Animals*. 2021;11(2):448. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani11020448>
55. Ibrahim D., Moustafa A., Metwally A. S., Nassan M. A., Abdallah K., Eldemery F. et al. Potential Application of Cornelian Cherry Extract on Broiler Chickens: Growth, Expression of Antioxidant Biomarker and Glucose Transport Genes, and Oxidative Stability of Frozen Meat. *Animals*. 2021;11(4):1038. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani11041038>
56. Калоев Б. С. Экономическая эффективность комплексного использования биологически активных препаратов при выращивании цыплят-бройлеров. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021;(5-1(107)):156–159. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.107.5.026> EDN: SZROYU
- Kaloev B. S. On the economic efficiency of integrated use of biologically active substances in broiler raising. *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal*. 2021;(5-1(107)):156–159. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.107.5.026>
57. Ардагская М. Д. Пробиотики, пребиотики и метабиотики в коррекции микрoэкологических нарушений кишечника. *Медицинский совет*. 2015;(13):94–99. DOI: <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2015-13-94-99> EDN: UNSZJJ
- Ardatskaya M. D. Probiotics, prebiotics and metabiotics in the management of microecological bowel disorders. *Meditsinskyi soviet = Medical Council*. 2015;(13):94–99. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2015-13-94-99>

Вклад авторов: Сизова Е. А., Семьнин Т. А. – концепция и план исследования, анализ данных, подготовка рукописи; Нечитайло К. С., Шошин Д. Е., Бардакова А. С. – анализ данных, подготовка рукописи; Рязанцева К. В. – концепция и план исследования, подготовка рукописи.

Сведения об авторах

Сизова Елена Анатольевна, доктор биол. наук, профессор РАН, профессор, заместитель директора по научной работе, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января, д. 29, г. Оренбург, Российская Федерация, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

Нечитайло Ксения Сергеевна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января, д. 29, г. Оренбург, Российская Федерация, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8755-414X>

Рязанцева Кристина Владимировна, кандидат биол. наук, научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января, д. 29, г. Оренбург, Российская Федерация, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5134-0396>

Шошин Даниил Евгеньевич, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января д. 29, г. Оренбург, Российская Федерация, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3086-681X>

✉ **Семьнин Тимофей Андреевич**, лаборант-исследователь, аспирант, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января, д. 29, г. Оренбург, Российская Федерация, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6854-6016>, e-mail: semynin_t@mail.ru

Бардакова Александра Сергеевна, лаборант-исследователь, магистрант, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января д. 29, г. Оренбург, Российская Федерация, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6807-4690>

Author contributions: Sizova E. A., Semynin T.A. – research concept and plan, data analysis, manuscript preparation; Nechitailo K. S., Shoshin D. E., Bardakova A. S. – data analysis, manuscript preparation; Ryazantseva K. V. – research concept and plan, manuscript preparation.

Information about the authors

Elena A. Sizova, DSc in Biological Science, professor of RAS, Deputy Director for Research, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 9 Yanvarya Str., 29, Orenburg, Russian Federation, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

Ksenia S. Nechitailo, PhD in Biological Science, senior researcher, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 9 Yanvarya Str., 29, Orenburg, Russian Federation, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8755-414X>

Kristina V. Ryazantseva, PhD in Biological Science, researcher, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 9 Yanvarya Str., 29, Orenburg, Russian Federation, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5134-0396>

Daniil E. Shoshin, junior researcher, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 9 Yanvarya Str., 29, Orenburg, Russian Federation, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3086-681X>

✉ **Timofey A. Semynin**, laboratory assistant, postgraduate, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 9 Yanvarya Str., 29, Orenburg, Russian Federation, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6854-6016>, e-mail: semynin_t@mail.ru

Alexandra S. Bardakova, laboratory assistant, master student, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 9 Yanvarya Str., 29, Orenburg, Russian Federation, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6807-4690>

✉ – Для контактов / Corresponding author