

Е.А. Йылдырым<sup>1,2</sup> ✉Л.А. Ильина<sup>1,2</sup>Г.Ю. Лаптев<sup>1</sup>В.А. Филиппова<sup>1,2</sup>А.В. Дубровин<sup>1</sup>Д.Г. Тюрина<sup>1</sup>К.А. Соколова<sup>1,2</sup>В.А. Заикин<sup>1</sup>Е.С. Пономарева<sup>1</sup>И.А. Ключникова<sup>1,2</sup>В.И. Фисинин<sup>3</sup>И.А. Егоров<sup>3</sup>Т.А. Егорова<sup>3</sup>В.А. Манукян<sup>3</sup>Т.Н. Ленкова<sup>3</sup>О.Н. Дегтярева<sup>3</sup><sup>1</sup>ООО «БИОТРОФ+», Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Пушкин, Санкт-Петербург, Россия<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства, Сергиев Посад, Россия

✉ deniz@biotrof.ru

Поступила в редакцию: 10.10.2024

Одобрена после рецензирования: 15.01.2025

Принята к публикации: 30.01.2025

© Йылдырым Е.А., Ильина Л.А., Лаптев Г.Ю., Филиппова В.А., Дубровин А.В., Тюрина Д.Г., Соколова К.А., Заикин В.А., Пономарева Е.С., Ключникова И.А., Фисинин В.И., Егоров И.А., Егорова Т.А., Манукян В.А., Ленкова Т.Н., Дегтярева О.Н.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-391-02-87-94

Elena A. Yildirim<sup>1,2</sup> ✉Larisa A. Ilyina<sup>1,2</sup>George Yu. Laptev<sup>1</sup>Valentina A. Filippova<sup>1,2</sup>Andrey V. Dubrovin<sup>1</sup>Darya G. Turina<sup>1</sup>Ksenia A. Sokolova<sup>1,2</sup>Vasily A. Zaikin<sup>1</sup>Ekaterina S. Ponomareva<sup>1</sup>Irina A. Klyuchnikova<sup>1,2</sup>Vladimir I. Fisinin<sup>3</sup>Ivan A. Egorov<sup>3</sup>Tatiana A. Egorova<sup>3</sup>Vardges A. Manukyan<sup>3</sup>Tatiana N. Lenkova<sup>3</sup>Olga N. Degtyareva<sup>3</sup><sup>1</sup>«БИОТРОФ+» Ltd, Saint-Petersburg, Russia<sup>2</sup>Saint Petersburg State Agrarian University, Pushkin, Saint Petersburg, Russia<sup>3</sup>All-Russian Scientific Research and Technological Institute of Poultry Farming, Sergiev Posad, Russia

✉ deniz@biotrof.ru

Received by the editorial office: 10.10.2024

Accepted in revised: 15.01.2025

Accepted for publication: 30.01.2025

© Yildirim E.A., Ilyina L.A., Laptev G.Yu., Filippova V.A., Dubrovin A.V., Turina D.G., Sokolova K.A., Zaikin V.A., Ponomareva E.S., Klyuchnikova I.A., Fisinin V.I., Egorov I.A., Egorova T.A., Manukyan V.A., Lenkova T.N., Degtyareva O.N.

# Влияние различных форм лизина и метионина в рационе бройлеров на профиль транскрипции ключевых генов

## РЕЗЮМЕ

**Цель исследования** — оценить влияние комбикормов с пониженной (на 5%) питательностью по лизину, метионину и обменной энергии при включении в них лизина и метионина в различных формах при их взаимодействии с полом бройлеров на профиль транскрипции ключевых генов, регулирующих антиоксидантную защиту, иммунную систему, воспаление и апоптоз, продуктивность и барьерную функцию эпителия ЖКТ.

**Методы.** Эксперимент проводили в СГЦ «Загорское ЭПХ» в 2024 г. на мясной птице кросса «Смена 9» с суточного до 35-суточного возраста. Состав рациона контрольной группы I включал основной рацион (ОР) с применением монохлоргидрата лизина и DL-метионина, опытной II — ОР с применением сульфата лизина и гидроксиданалога метионина, опытной III — ОР с пониженными (на 5%) уровнями лизина в форме монохлоргидрата, DL-метионина и обменной энергии, опытной IV — ОР с пониженными (на 5%) уровнями сульфата лизина, гидроксиданалога метионина и обменной энергии. Анализ экспрессии генов проводили с помощью *Real-time PCR* с обратной транскрипцией.

**Результаты.** Живая масса петушков и курочек в опытных группах II и IV была несколько выше по сравнению с контролем I, тогда как в группе III — ниже. Изменение состава рациона у петушков и курочек оказало во многих случаях значительное влияние на экспрессию ряда ключевых генов. У петушков экспрессия *PTGS2* в опытных группах II–IV резко возрастала (от 4,9 до 52,0 раз) по сравнению с контролем I, тогда как у курочек возрастала лишь в 1,5–2,3 раза. Экспрессия мРНК гена *Muc2* у курочек снижалась в опытной группе II в 1,9 раза по сравнению с группой I, тогда как у петушков, напротив, повышалась в 3,1 раза.

**Ключевые слова:** цыплята-бройлеры, питательные вещества, аминокислоты, лизин, метионин, экспрессия генов, количественная ПЦР

**Для цитирования:** Йылдырым Е.А. и др. Влияние различных форм лизина и метионина в рационе бройлеров на профиль транскрипции ключевых генов. *Аграрная наука*. 2025; 391(02): 87–94.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-87-94>

# Effect of different forms of lysine and methionine in broiler diets on the key genes transcriptional profile

## ABSTRACT

**The aim of the study** was to evaluate the effect of compound feeds with reduced (by 5%) nutritional content of lysine, methionine and metabolic energy when lysine and methionine are included in them in various forms during their interaction with broiler sex on the transcription profile of key genes regulating antioxidant protection, the immune system, inflammation and apoptosis, productivity and barrier function of the gastrointestinal epithelium.

**Methods.** The experiment was carried out at the “Zagorskoye” in 2024 on a poultry meat of the “Smena 9” cross from 1 to 35 days of age.

**Results.** The live weight of rooster and hens in experimental groups II and IV was slightly higher compared to control I, whereas in group III it was lower. In many cases, changes in the composition of the diet of rooster and hens had a significant impact on the expression of a number of key genes. In roosters, *PTGS2* expression in experimental groups II–IV increased sharply (from 4.9 to 52.0 times) compared with control I, whereas in hens it increased only 1.5–2.3 times. The expression of the *Muc2* gene mRNA in hens decreased in experimental group II by 1.9 times compared with group I, whereas in roosters, on the contrary, it increased by 3.1 times.

**Key words:** broiler chickens, nutrients, amino acids, lysine, methionine, gene expression, quantitative PCR

**For citation:** Yildirim E.A. et al. The effect of various forms of lysine and methionine in the broiler diet on the transcription profile of key genes. *Agrarian science*. 2025; 391(02): 87–94 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-87-94>

## Введение/Introduction

Важнейшим условием повышения экономической эффективности отраслей животноводства и птицеводства является наличие конкурентоспособной отечественной племенной базы. В отечественном селекционно-генетическом центре «Смена» была проведена многолетняя работа по созданию высокопродуктивного кросса бройлеров «Смена 9».

Основа раскрытия хорошего генетического потенциала животных и птиц — это научно обоснованное кормление. Протеин — важное в кормлении вещество, которое поддерживает продуктивность, способствует росту новых тканей, восстановлению поврежденных, служит источником энергии [1], играет решающую роль в оптимизации роста и развития птиц [2]. Поэтому крайне важным представляется совершенствование методов коррекции содержания протеина в рационе для удовлетворения всех потребностей сельскохозяйственной птицы. Избыточное содержание белка в организме животных и птиц будет выводиться в виде аммиака, и, наоборот, низкое количество белка отрицательно влияет на показатели роста [3].

Интересно, что различия по количеству и качеству белка в рационе могут отмечаться и между полами. Так, F.M. Hernandez *и соавт.* [4] показали, что рационы, содержащие пониженный уровень сырого протеина, в меньшей степени влияли на продуктивность самцов-бройлеров, нежели самок. Изменение содержания белка и одновременно энергии в рационе птиц в соответствии с их конкретными потребностями — это эффективная стратегия повышения продуктивности и снижения уровня стресса [5].

Содержание отдельных аминокислот в рационе должно точно соответствовать потребностям птицы [6]. Ввод в рацион кормовых кристаллических аминокислот предоставил возможность разработать экономически эффективные рационы с низким содержанием протеина при сохранении оптимального использования белка птицами.

Лизин — наиболее важная аминокислота в рационах бройлеров [7]. Монохлоргидрат лизина содержит минимум 78% лизина [8]. Сульфат лизина имеет минимальное содержание лизина — 46,8–51%.

Ряд исследований показали, что биоэффективность сульфата лизина по сравнению с монохлоргидратом лизина была аналогичной при использовании суточного привеса и конверсии корма в качестве критериев оценки [9]. Таким образом, несмотря на включение в рацион бройлеров сульфата лизина, учитывая его более низкую стоимость, может быть экономически целесообразно.

Стоит отметить, что в рацион бройлеров добавляют синтетический DL-метионин, содержащий около 99% действующего вещества,

или гидроксипропаналог метионина, содержащий 88% действующего вещества [10]. Гидроксипропаналог метионина не имеет в своей структуре аминогруппы, но имеет гидроксильную группу у асимметричного атома углерода, а DL-метионин обладает аминогруппой [11]. Данное различие в химической структуре приводит к существенным отличиям между гидроксипропаналогом метионина и DL-метионином в отношении всасывания, транспорта в организме и метаболизма в различных тканях [12].

Информация о биологической эффективности различных форм лизина и метионина является важным фактором для увеличения рентабельности производства, составления правильных рецептур кормов и увеличения продуктивности птиц [13]. Несмотря на то что в настоящее время проведено несколько метаанализов биологической эффективности данных соединений, результаты их значительно различаются [10].

Важно, что различия в составе питательных веществ и энергии в рационе могут оказать значительное влияние на экспрессию генов у птицы [14]. Представляет интерес дальнейшее изучение влияния кормления на транскриптом и последующее его влияние на фенотип птиц [15]. Синергия между генетическим потенциалом, потреблением питательных веществ и энергии определяет показатели роста бройлеров, в то же время реакция генов-кандидатов у бройлеров на подобного рода манипуляции с составом рационов может приоткрыть механизмы взаимодействия.

*Цель исследования* — оценить влияние комбикормов с пониженной (на 5%) питательностью по лизину, метионину и обменной энергии при включении в них лизина и метионина в различных формах при их взаимодействии с полом бройлеров на профиль транскрипции ключевых генов, регулирующих антиоксидантную защиту, иммунную систему, воспаление и апоптоз, продуктивность и барьерную функцию эпителия ЖКТ.

## Материалы и методы исследования / Materials and methods

Эксперимент проводили в СГЦ «Загорское ЭПХ» (Московская обл., Сергиево-Посадский р-н, г. Сергиев Посад, Россия) в 2024 г. на мясной птице кросса «Смена 9» с суточного до 35-суточного возраста.

Птиц содержали в клеточных батареях (Big Dutchman, Германия) по 36 голов в группе (18 курочек и 18 петушков).

Схема опыта представлена в таблице 1.

Таблица 1. Схема опыта на мясной птице кросса «Смена 9»  
Table 1. The scheme of the experiment on the meat poultry of the cross «Smena 9»

Группа	Состав рациона
Контрольная I	ОП с применением монохлоргидрата лизина и DL-метионина
Опытная II	ОП с применением сульфата лизина и гидроксипропаналога метионина
Опытная III	ОП с пониженными (на 5%) уровнями лизина в форме монохлоргидрата, DL-метионина и обменной энергии
Опытная IV	ОП с пониженными (на 5%) уровнями сульфата лизина, гидроксипропаналога метионина и обменной энергии

Нормы посадки, световой, температурный и влажностный режимы, фронт кормления и поения во все возрастные периоды соответствовали рекомендациям для кросса. ОР был сбалансирован по питательным веществам согласно руководству по работе с кроссом<sup>1</sup>.

При постановке опыта были соблюдены требования Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (ETS № 123, г. Страсбург, 1986<sup>2</sup>).

Условия содержания птиц соответствовали требованиям<sup>3</sup>.

Учитывали сохранность поголовья и живую массу бройлеров путем индивидуального взвешивания всего поголовья по группам.

Абдоминальный жир и убойный выход рассчитывали согласно общепринятым методикам<sup>4</sup>.

В конце эксперимента птицу декапитуировали и проводили отбор тканей слепых отростков кишечника для анализа экспрессии генов. Анализ проводили с помощью Real-time PCR с обратной транскрипцией. РНК выделяли с использованием мини-набора Aurum™ Total RNA (Bio-Rad, Hercules, США). кДНК получали с использованием iScript™ Reverse Transcription Supermix (Bio-Rad, США).

Для анализа экспрессии мРНК были выбраны праймеры, которые представлены в таблице 2.

В качестве референсного контроля использовали праймеры на ген «домашнего хозяйства» — белка бета-актина (*ACTB*). При построении графиков, отражающих влияние комбикормов с нормальной и пониженной питательностью по обменной энергии, а также лизина и метионина в различных формах на экспрессию ключевых генов у петушков кросса «Смена 9» отрицательные значения на оси x означали понижение уровня экспрессии в опытных группах II–IV по сравнению с контрольной группой I, уровень экспрессии в которой условно принят за 1 (кратность отклонений представлена красным цветом), положительные значения — увеличение уровня экспрессии (кратность отклонений представлена синим цветом).

Реакцию амплификации проводили с использованием SsoAdvanced™ Universal SYBR® Green Supermix (Bio-Rad, США) с использованием амплификатора детектирующего «ДТлайт» («ДНК-Технология», Россия). Режим и условия амплификации были следующими: 5 мин. при 95 °С; 30 сек. при 95 °С, 30 сек. при 60 °С, 30 сек. при 70 °С (40 циклов).

Математическую и статистическую обработку результатов осуществляли методом многофакторного дисперсионного анализа (ANOVA)

**Таблица 2. Праймеры, использованные при изучении экспрессии генов у бройлеров кросса «Смена 9»**  
**Table 2. Primers used in the study of gene expression in broilers of the cross “Smena 9”**

Ген, фермент	Последовательность праймеров (5'→3'), используемых для количественной ПЦР
<i>Гены антиоксидантной защиты</i>	
<i>SOD1</i> , супероксиддисмутаза 1	F: CGGGCCAGTAAAGGTTACTGGAA, R: TGTTGTCTCCAAATTCATGCACATG
<i>Гены иммунитета</i>	
<i>AvBD1</i> , β-дефензин 1	F: CCGTTTCTGTCCACCGTCA R: CCTTTCGTAATAATCCCTTC
<i>AvBD2</i> , β-дефензин 2	F: GCACTCCAGGTTTCTCCA R: GGCGTCCGACTTTGATTA
<i>AvBD9</i> , птичий бета-дефензин 9	F: AACACCGTCAAGCATCTCACA, R: CGTCTTCTGGCTGTAAGCTGGA
<i>AvBD10</i> , птичий бета-дефензин 9	F: GCTCTTCGCTGTCTCCTCT, R: CCAGAGATGGTGAAGGTG
<i>AvBD11</i> , птичий бета-дефензин 11	F: AGTCTGCAATTCGTTAGAGGCG R: GGATGTGGTTTCCAAGGGTTTA
<i>Гены воспаления и апоптоза</i>	
<i>IL6</i> , интерлейкин 6	F: AGGACGAGATGTGCAAGAAGTTC R: TTGGGCAGGTTGAGGTTGTT
<i>IL8L2 (IL8)</i> , интерлейкин 8	F: GGAAGAGAGGTTGTGCTTGGGA R: TAACATGAGGCACCGATGTG
<i>PTGS2</i> , простагландин-эндопероксидаза	F: TCGAGATCACACTTGATTGACA, R: TTTGTGCCTTGTGGGTCCAG
<i>Casp6</i> , каспаза 6	F: CAGAGGAGACAAGTGCCAGA, R: CCAGGAGCCGTTTACAGTTT
<i>Ген мясной продуктивности</i>	
<i>SGLT2</i> , натрий-глюкозного котранспортер 2-го типа	F: ACCAAGTACTGCAAGGCGAA, R: TGAGGGTTCCTCTTCTGGCT
<i>Ген барьерной функции эпителия ЖКТ</i>	
<i>MUC2</i> , муцин 2	F: CTGGCTCCTTGTGGCTCCTC R: AGCTGCATGACTGGAGACAAGT

в программах Microsoft Excel XP/2003, R-Studio v. 1.1.453<sup>5</sup> (США). Средние значения сравнивались с использованием теста достоверно значимой разницы Тьюки (HSD) и функции TukeyHSD в пакете R Stats Package (США).

### Результаты и обсуждение / Results and discussion

Основные зоотехнические показатели бройлеров кросса «Смена 9» представлены в таблице 3.

Сохранность поголовья за время выращивания составила 100% по всем группам.

Живая масса петушков и курочек в опытных группах II и IV была несколько выше по сравнению с контролем I ( $p \leq 0,05$ ), тогда как в группе III, напротив, несколько ниже ( $p \leq 0,05$ ). Это свидетельствует в пользу лучшей биологической активности сульфата лизина и гидроксиданалога метионина по сравнению с комбинацией лизина в форме монолоргидрата и DL-метионина на фоне ОР с пониженными (на 5%) уровнями лизина, метионина и обменной энергии.

<sup>1</sup> Руководство по работе с птицей мясного кросса «Смена 9» с аутосексной материнской родительской формой / Д.Н. Ефимов, А.В. Егорова, Ж.В. Емануйлова и др.; под ред. В.И. Фисинина и Д.Н. Ефимова. Сергиев Посад, 2021; 95.

<sup>2</sup> Европейская конвенция о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях. \*Страсбург, 18 марта 1986 года. <https://base.garant.ru/4090914/>

<sup>3</sup> Методика проведения научных и производственных исследований по кормлению сельскохозяйственной птицы. Молекулярно-генетические методы определения микрофлоры кишечника / под общей ред. В.И. Фисинина. ВНИТИП, Сергиев Посад, 2013.

<sup>4</sup> Методические рекомендации по проведению разделки тушек и органолептической оценки качества мяса

и яиц сельскохозяйственной птицы и морфологии яиц / разработ. В.С. Лукашенко, М.А. Лысенко, Т.А. Столяр и др. ВНИТИП. 2001.

<sup>5</sup> <https://rstudio.com>

Таблица 3. Зоотехнические показатели выращивания бройлеров «Смена 9»

Table 3. Zootechnical indicators of broiler growing "Smena 9"

Показатель	Группа			
	контрольная I	опытная II	опытная III	опытная IV
Живая масса в возрасте суток, г	43,30 ± 0,10	44,00 ± 0,12	43,50 ± 0,10	44,10 ± 0,11
Живая масса в возрасте 14 суток, г	510,0 ± 9,0	520,0 ± 7,7	497,0 ± 6,8	529,0 ± 8,1
Живая масса в возрасте 21 суток, г	920,0 ± 12,3	936,0 ± 13,2	893,0 ± 10,3*	952,0 ± 11,2
Живая масса курочек в возрасте 35 суток, г	2090,0 ± 19,2	2149,0 ± 17,6*	2044,0 ± 14,5*	2132,0 ± 12,5*
Живая масса петушков в возрасте 35 суток, г	2392,0 ± 20,4	2467,0 ± 21,3*	2359,0 ± 20,0	2462,0 ± 18,4*
Убойный выход, %	72,3	72,7	71,5	72,8
Абдоминальный жир, %	1,85	1,23*	1,40*	1,10*

Примечание: \*  $p \leq 0,05$  при сравнении опытных групп с контрольной I согласно критерию Стьюдента.

Ранее, напротив, показано, что DL-метионин обладает более высокой активностью в качестве источника метионина у бройлеров, чем гидроксианалог метионина на эквиволярной основе [10], тогда как в другом исследовании показано, что оба соединения обладают одинаковой активностью [16].

Ряд исследователей показали, что биоэффективность сульфата лизина по сравнению с монохлоргидратом лизина часто практически идентична [9]. Выход абдоминального жира в данном исследовании в опытных группах II–IV был ниже по сравнению с контролем I ( $p \leq 0,05$ ).

Влияние комбикормов с нормальной и пониженной питательностью по обменной энергии, а также лизина и метионина в различных формах на экспрессию ключевых генов у петушков кросса «Смена 9» представлено на рисунке 1, у курочек — на рисунке 2.

Отметим, что изменение состава рациона у петушков (рис. 1) и курочек (рис. 2) оказало во многих случаях значительное влияние ( $p \leq 0,05$ ) на экспрессию ряда ключевых генов, регулирующих антиоксидантную защиту, иммунную систему, воспаление, апоптоз, продуктивность и

Рис. 1. Влияние комбикормов с нормальной и пониженной питательностью по обменной энергии, а также лизина и метионина в различных формах на экспрессию ключевых генов у петушков кросса «Смена 9»: отрицательные значения на оси x означают понижение уровня экспрессии в опытных группах II–IV по сравнению с контрольной группой I, уровень экспрессии в которой условно принят за 1 (кратность отклонений представлена красным цветом), положительные значения — увеличение уровня экспрессии (кратность отклонений представлена синим цветом), 0 — отсутствие экспрессии гена

Fig. 1. The effect of compound feeds with normal and reduced nutritional value in terms of metabolic energy, as well as lysine and methionine in various forms on the expression of key genes in roosters of the "Smena 9" cross: negative values on the x axis mean a decrease in the expression level in experimental groups II–IV compared with control group I, the expression level in which is conventionally taken as 1 (the multiplicity of deviations is represented in red), positive values — an increase in the level of expression (the multiplicity of deviations is represented in blue), 0 — no gene expression

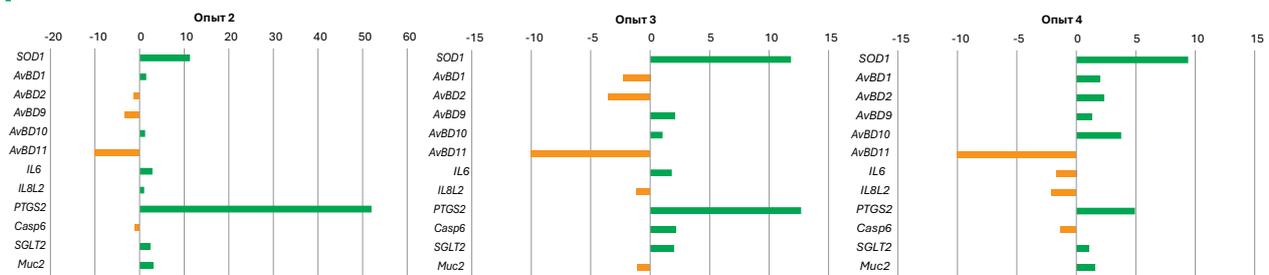
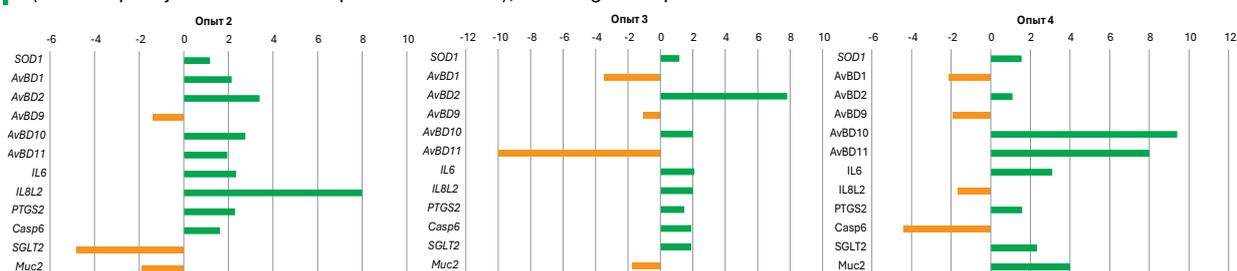


Рис. 2. Влияние комбикормов с нормальной и пониженной питательностью по обменной энергии, а также лизина и метионина в различных формах на экспрессию ключевых генов у курочек кросса «Смена 9»: отрицательные значения на оси x означают понижение уровня экспрессии в опытных группах II–IV по сравнению с контрольной группой I, уровень экспрессии в которой условно принят за 1 (кратность отклонений представлена красным цветом), положительные значения — увеличение уровня экспрессии (кратность отклонений представлена синим цветом), 0 — отсутствие экспрессии гена

Fig. 2. The effect of compound feeds with normal and reduced nutritional value in terms of metabolic energy, as well as lysine and methionine in various forms on the expression of key genes in chickens of the "Smena 9" cross: negative values on the x axis mean a decrease in the expression level in experimental groups II–IV compared with control group I, the expression level in which is conventionally taken as 1 (the multiplicity of deviations is represented in red), positive values — an increase in the level of expression (the multiplicity of deviations is represented in blue), 0 — no gene expression



барьерную функцию эпителия ЖКТ. Эти данные говорят о том, что изменение рациона может приводить к изменению регуляции некоторых ключевых генов у птиц, что может указывать на физиологическую адаптацию.

Что касается изменения генов антиоксидантной защиты, то следует отметить, что домашняя птица, как и все аэробные живые организмы, способна вырабатывать активные формы кислорода для регуляции физиологических процессов организма, в норме поддерживая их уровень на низких значениях для стабилизации окислительно-восстановительного баланса [17].

Гипервыработка свободных радикалов, приводящая к окислительному стрессу, — основной фактор, вызывающий негативные последствия у животных и птиц. У птицы сформировались интегрированные системы антиоксидантной защиты, такие как SOD1 (супероксиддисмутаза 1). Супероксиддисмутаза 1 участвует в регуляции выработки свободных радикалов и поддержания баланса между антиоксидантами и прооксидантами [18]. У петушков экспрессия SOD1 в опытных группах II–IV резко возросла (от 9,4 до 11,8 раза) по сравнению с контролем I ( $p \leq 0,05$ ), тогда как у курочек не имела достоверных различий с контролем I в группах II и III и повышалась незначительно в группе IV ( $p \leq 0,05$ ).

Изменение состава рациона в опытных группах (что в большей степени касается групп петушков) могло «вмешаться» в окислительно-восстановительный баланс и привело к активации звена эндогенной антиоксидантной системы. F.M. Hernandez и соавт. [4] показали, что снижение сырого протеина в рационе бройлеров на 1,5% отрицательно сказалось на продуктивности петушков, но не курочек, в рационе которых сырой протеин можно было снизить до 3% без каких-либо последствий для продуктивности. При этом наблюдалась значительная взаимосвязь между уровнем сырого протеина и полом в отношении экспрессии генов CAT2, PEPT2 и ASCT11. Возможно, у курочек имеются иные компенсаторные механизмы преодоления кормовых стрессов или сам стресс имеет меньшее негативное влияние в отношении курочек.

Такую же тенденцию, связанную с полом, сохранял уровень экспрессии мРНК PTGS2 (простагландин-эндопероксидсинтазы) у бройлеров. Так, у петушков экспрессия PTGS2 в опытных группах II–IV резко возросла (от 4,9 до 52,0 раз) по сравнению с контролем I ( $p \leq 0,05$ ), тогда как у курочек увеличивалась лишь в 1,5–2,3 раза ( $p \leq 0,05$ ). PTGS2 считается важнейшим провоспалительным медиатором [19].

Активация данного гена может ухудшить продуктивность бройлеров в условиях промышленного выращивания [20], ведь усиление иммунного ответа приводит к значительным потерям

энергии кормов, поскольку для иммунной регуляции требуется огромное количество как энергии, так и питательных веществ [21]. L. Kern и соавт. предположили, что механизм, который может быть задействован в провоспалительных реакциях у петушков, может заключаться в более высокой массе тела по сравнению с курочками [22].

Кроме того, экспрессия гена SGLT2 в слепых отростках кишечника петушков и курочек в ответ на изменение рациона демонстрировала различные уровни. Так, например, экспрессия данного гена у курочек была снижена в опытной группе II в 5,0 раз по сравнению с группой I ( $p \leq 0,05$ ), тогда как у петушков, напротив, повышена в 2,4 раза ( $p \leq 0,05$ ). SGLT2 — это ген, который кодирует котранспортеры натрия и глюкозы [23], а значит, участвует во всасывании питательных веществ и снабжении организма энергией.

Потенциальная разница в усвоении питательных веществ в кишечнике у петушков и курочек может приводить к разнице в скорости всасывания питательных веществ и, следовательно, к наблюдаемой разнице в массе тела между полами. Ранее было проведено несколько исследований для определения различий в экспрессии переносчиков питательных веществ у курочек и петушков. Показано, что у индюшат-самок, напротив, был выше уровень экспрессии гена SGLT1 по сравнению с самцами [24].

Стоит отметить, что экспрессия гена Muc2 в слепых отростках кишечника петушков и курочек изменялась по-разному в зависимости от используемого рациона. Например, экспрессия мРНК данного гена у курочек снижалась в опытной группе II в 1,9 раза по сравнению с группой I ( $p \leq 0,05$ ), тогда как у петушков, напротив, повышалась в 3,1 раза ( $p \leq 0,05$ ). Эпителий кишечного тракта покрыт слоем слизи, состоящим преимущественно из гликопротеинов муцина, которые синтезируются бокаловидными клетками [25]. Муцин влияет на защиту кишечника от кислот, пищеварительных ферментов и патогенов, фильтрацию питательных веществ в желудочно-кишечном тракте, их переваривание и всасывание [26].

Преыдушие исследования показали, что экспрессия генов муцинов в кишечнике может рассматриваться как биомаркер барьерной функции [27]. Было показано, что белки и специфические аминокислоты изменяют секрецию муцина Muc2 в ответ на состав рациона. Это связано с тем, что белки и аминокислоты, содержащиеся в кормах, способны напрямую взаимодействовать с бокаловидными клетками, вызывая изменения секреции муцина [28].

Несоответствие некоторых результатов ряду данных, полученных ранее [29], вероятно, связано с различными методическими особенностями проведения экспериментов, такими как генотип птицы, возраст, условия содержания.

## Выводы/Conclusion

Исследованиями на мясных курочках и петушках кросса «Смена 9» установлено, что, по данным динамики изменений живой массы птиц (как петушков, так и курочек), биологическая активность сульфата лизина и гидроксипропаргана метионина оказалась лучше по сравнению с комбинацией лизина в форме монохлоргидрата и DL-метионина (на фоне ОР с пониженными (на 5%) уровнями лизина, метионина и обменной энергии).

Было показано, что изменения в составе рациона у петушков и курочек оказали во

многих случаях значительное влияние на экспрессию ряда ключевых генов, регулирующих антиоксидантную защиту (например, *SOD1*), иммунную систему, воспаление (*PTGS2*), продуктивность (*SGLT2*) и барьерную функцию эпителия ЖКТ (*Muc2*). Эти данные свидетельствуют о том, что изменение рациона может приводить к изменению регуляции некоторых ключевых генов у птиц, что может указывать на физиологическую адаптацию и, вероятно, оказывать влияние на зоотехнические показатели.

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

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

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-66-00061 «Экспрессия генов продуктивности и резистентности кур нового отечественного кросса «Смена 9» и ее влияние на иммунитет, особенности реализации генетического потенциала продуктивности при разном энергоаминокислотном питании».

## FUNDING

The study was funded by the grant of the Russian Science Foundation No. 22-66-00061 «Expression of productivity and resistance genes in chickens of the new domestic cross «Smena 9» and its effect on immunity, features of the realization of the genetic potential of productivity with different energy-amino acid nutrition».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Muharlieni, Nursita I.W., Pangestu V.M. The Effect of Feed Protein Level on Feed Consumption, Body Weight Gain and Feed Conversion of Finisher Java Super Male Chicken. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 478: 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/478/1/012044>
- Pakiding W., Hakim M.R., Daryatmo, Linggi T.R., Elis. The influence of protein levels on body weight, body dimensions, and reproductive characteristics of local chickens treated in-ovo feeding L-Arginine for two generations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 788: 012188. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/788/1/012188>
- Houshmand M., Azhar K., Zulkifli I., Bejo M.H., Kamyab A. Effects of non-antibiotic feed additives on performance, immunity and intestinal morphology of broilers fed different levels of protein. *South African Journal of Animal Science*. 2012; 42(1): 22–32. <https://doi.org/10.4314/sajas.v42i1.3>
- Hernández F., López M., Martínez S., Megías M.D., Catalá P., Madrid J. Effect of low-protein diets and single sex on production performance, plasma metabolites, digestibility, and nitrogen excretion in 1- to 48-day-old broilers. *Poultry Science*. 2012; 91(3): 683–692. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01735>
- Awad E.A. et al. Response of broiler to reduced-protein diets under heat stress conditions. *World's Poultry Science Journal*. 2019; 75(4): 583–598. <https://doi.org/10.1017/S0043933919000576>
- Kidd M.T., McDaniel C.D., Branton S.L., Miller E.R., Boren B.B., Fancher B.I. Increasing Amino Acid Density Improves Live Performance and Carcass Yields of Commercial Broilers. *Journal of Applied Poultry Research*. 2004; 13(4): 593–604. <https://doi.org/10.1093/japr/13.4.593>
- Waldroup P.W., Oviedo-Rondon E.O. Models to Estimate Amino Acid Requirements for Broiler Chickens: A Review. *International Journal of Poultry Science*. 2002; 1(5): 106–113. <https://doi.org/10.3923/ijps.2002.106.113>
- Smiricky-Tjardes M.R., Mavromichalis I., Albin D.M., Wubben J.E., Rademacher M., Gabert V.M. Bioefficacy of L-lysine sulfate compared with feed-grade L-lysine·HCl in young pigs. *Journal of animal science*. 2004; 82(9): 2610–2614. <https://doi.org/10.2527/2004.8292610x>
- Ahmad G., Mushtaq T., Aslam Mirza M., Ahmed Z. Comparative Bioefficacy of Lysine from L-Lysine Hydrochloride or L-Lysine Sulfate in Basal Diets Containing Graded Levels of Canola Meal for Female Broiler Chickens. *Poultry Science*. 2007; 86(3): 525–530. <https://doi.org/10.1093/ps/86.3.525>
- Sauer N., Emrich K., Piepho H.-P., Lemme A., Redshaw M.S., Mosenthin R. Meta-Analysis of the Relative Efficiency of Methionine-Hydroxy-Analogue-Free-Acid Compared with DL-Methionine in Broilers Using Nonlinear Mixed Models. *Poultry Science*. 2008; 87(10): 2023–2031. <https://doi.org/10.3382/ps.2007-00514>
- Kluge H., Gessner D.K., Herzog E., Eder K. Efficacy of DL-methionine hydroxy analogue-free acid in comparison to DL-methionine in growing male white Pekin ducks. *Poultry Science*. 2016; 95(3): 590–594. <https://doi.org/10.3382/ps/pev355>
- Martin-Venegas R., Geraert P.A., Ferrer R. Conversion of the Methionine Hydroxy Analogue DL-2-Hydroxy-(4-Methylthio) Butanoic Acid to Sulfur-Containing Amino Acids in the Chicken Small Intestine. *Poultry Science*. 2006; 85(11): 1932–1938. <https://doi.org/10.1093/ps/85.11.1932>
- Zarghi H., Ghavi S. Relative biological efficacy of methionine hydroxy analogue-free acid compared to DL-methionine in the broiler chickens. *Veterinary Medicine and Science*. 2024; 10(3): e1460. <https://doi.org/10.1002/vms3.1460>
- Gelli M., Duo Y., Konda A.R., Zhang C., Holding D., Dweikat I. Identification of differentially expressed genes between sorghum genotypes with contrasting nitrogen stress tolerance by genome-wide transcriptional profiling. *BMC Genomics*. 2014; 15: 179. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-179>
- Pauletto M. et al. Nutrigenomic Effects of Long-Term Grape Pomace Supplementation in Dairy Cows. *Animals*. 2020; 10(4): 714. <https://doi.org/10.3390/ani10040714>
- Vázquez-Añón M., Kratzer D., González-Esquerria R., Yi I.G., Knight C.D. A Multiple Regression Model Approach to Contrast The Performance of 2-Hydroxy-4-Methylthio Butanoic Acid and DL-Methionine Supplementation Tested in Broiler Experiments and Reported in the Literature. *Poultry Science*. 2006; 85(4): 693–705. <https://doi.org/10.1093/ps/85.4.693>
- Surai P.F. Integrated Antioxidant Defence Network in Animals. *EC Nutrition*. 2023; 18(6): 18–20.
- Surai F. Vitagenes in avian biology and poultry health. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers. 2020; 544. ISBN 978-90-8686-353-2 <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-906-0>
- Martin-Vázquez E., Cobo-Vuilleumier N., López-Noriega L., Lorenzo P.I., Gauthier B.R. The PTGS2/COX2-PGE<sub>2</sub> signaling cascade in inflammation: Pro or anti? A case study with type 1 diabetes mellitus. *International Journal of Biological Sciences*. 2023; 19(13): 4157–4165. <https://doi.org/10.7150/ijbs.86492>
- Surai P.F., Kochish I.I., Kidd M.T. Redox Homeostasis in Poultry: Regulatory Roles of NF-κB. *Antioxidants*. 2021; 10(2): 186. <https://doi.org/10.3390/antiox10020186>
- Burdick Sanchez N.C., Broadway P.R., Carroll J.A. Influence of Yeast Products on Modulating Metabolism and Immunity in Cattle and Swine. *Animals*. 2021; 11(2): 371. <https://doi.org/10.3390/ani11020371>

22. Kern L., Mittenbühler M.J., Vesting A.J., Ostermann A.L., Wunderlich C.M., Wunderlich F.T. Obesity-Induced TNF $\alpha$  and IL-6 Signaling: The Missing Link between Obesity and Inflammation—Driven Liver and Colorectal Cancers. *Cancers*. 2019; 11(1): 24. <https://doi.org/10.3390/cancers11010024>

23. Ghezzi C., Loo D.D.F., Wright E.M. Physiology of renal glucose handling via SGLT1, SGLT2 and GLUT2. *Diabetologia*. 2018; 61(10): 2087–2097. <https://doi.org/10.1007/s00125-018-4656-5>

24. Weintraut M.L., Kim S., Dalloul R.A., Wong E.A. Expression of small intestinal nutrient transporters in embryonic and posthatch turkeys. *Poultry Science*. 2016; 95(1): 90–98. <https://doi.org/10.3382/ps/pev310>

25. Uni Z., Smirnov A., Sklan D. Pre- and posthatch development of goblet cells in the broiler small intestine: effect of delayed access to feed. *Poultry Science*. 2003; 82(2): 320–327. <https://doi.org/10.1093/ps/82.2.320>

26. Horn N.L., Donkin S.S., Applegate T.J., Adeola O. Intestinal mucin dynamics: response of broiler chicks and White Pekin ducklings to dietary threonine. *Poultry Science*. 2009; 88(9): 1906–1914. <https://doi.org/10.3382/ps.2009-00009>

27. Celi P., Verlhac V., Pérez Calvo E., Schmeisser J., Klünter A.-M. Biomarkers of gastrointestinal functionality in animal nutrition and health. *Animal Feed Science and Technology*. 2019; 250: 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2018.07.012>

28. Faure M., Moënoz D., Montigon F., Mettraux C., Breuille D., Ballèvre O. Dietary Threonine Restriction Specifically Reduces Intestinal Mucin Synthesis in Rats. *The Journal of Nutrition*. 2005; 135(3): 486–491. <https://doi.org/10.1093/jn/135.3.486>

29. Conde-Aguilera J.A., Cholet J.C.G., Lessire M., Mercier Y., Tesseraud S., van Milgen J. The level and source of free-methionine affect body composition and breast muscle traits in growing broilers. *Poultry Science*. 2016; 95(10): 2322–2331. <https://doi.org/10.3382/ps/pew105>

## ОБ АВТОРАХ

### Елена Александровна Йылдырым<sup>1,2</sup>

- доктор биологических наук, главный биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории<sup>1</sup>;
- доктор биологических наук, профессор кафедры крупного животноводства<sup>2</sup>

deniz@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5846-5105>

### Лариса Александровна Ильина<sup>1,2</sup>

- доктор биологических наук, начальник молекулярно-генетической лаборатории<sup>1</sup>;
- доктор биологических наук, профессор кафедры крупного животноводства<sup>2</sup>

ilina@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2789-4844>

### Георгий Юрьевич Лаптев<sup>1</sup>

доктор биологических наук, генеральный директор ООО «БИОТРОФ+»  
laptev@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-8795-6659>

### Валентина Анатольевна Филиппова<sup>1,2</sup>

- старший биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории<sup>1</sup>;
- заведующая лабораторией кафедры крупного животноводства<sup>2</sup>

filippova@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8789-9837>

### Андрей Валерьевич Дубровин<sup>1,2</sup>

- кандидат ветеринарных наук, биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории<sup>1</sup>;
- кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник кафедры крупного животноводства<sup>2</sup>

dubrowin.a.v@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8424-4114>

### Дарья Георгиевна Тюринина<sup>1</sup>

кандидат экономических наук, главный биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории  
tiurina@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9001-2432>

### Ксения Андреевна Соколова<sup>1,2</sup>

- биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории<sup>1</sup>;
- ассистент кафедры крупного животноводства<sup>2</sup>

ksenya.k.a@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9541-6839>

### Василий Александрович Заикин<sup>1</sup>

биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории  
dfxt@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0009-0006-8029-9955>

### Екатерина Сергеевна Пономарева<sup>1</sup>

биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории  
kate@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4336-8273>

## ABOUT THE AUTHORS

### Elena Alexandrovna Yildirim<sup>1,2</sup>

- Doctor of Biological Sciences, Chief Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory<sup>1</sup>;
- Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Large Animal Husbandry<sup>2</sup>

deniz@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5846-5105>

### Larisa Alexandrovna Ilyina<sup>1,2</sup>

- Doctor of Biological Sciences, Head of the Molecular Genetic Laboratory<sup>1</sup>;
- Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Large Animal Husbandry<sup>2</sup>

ilina@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2789-4844>

### Georgiy Yurievich Laptev<sup>1</sup>

Doctor of Biological Sciences,  
CEO of “BIOTROF+” Ltd  
laptev@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-8795-6659>

### Valentina Anatolyevna Filippova<sup>1,2</sup>

- Senior Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory<sup>1</sup>;
- Head of the Laboratory of the Department of Large Animal Husbandry<sup>2</sup>

filippova@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8789-9837>

### Andrey Valeryevich Dubrovин<sup>1,2</sup>

- Candidate of Veterinary Sciences, Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory<sup>1</sup>;
- Candidate of Veterinary Sciences, Senior Researcher at the Department of Large Animal Husbandry<sup>2</sup>

dubrowin.a.v@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8424-4114>

### Daria Georgievna Tyurina<sup>1</sup>

Candidate of Economic Sciences, Chief Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory  
tiurina@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9001-2432>

### Ksenia Andreevna Sokolova<sup>1,2</sup>

- Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory<sup>1</sup>;
- Assistant of the Department of Large animal Husbandry<sup>2</sup>

ksenya.k.a@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9541-6839>

### Vasily Alexandrovich Zaikin<sup>1</sup>

Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory  
dfxt@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0009-0006-8029-9955>

### Ekaterrina Sergeevna Ponomareva<sup>1</sup>

Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory  
kate@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4336-8273>

**Ирина Александровна Ключникова<sup>1,2</sup>**

• биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории<sup>1</sup>;  
• аспирант<sup>2</sup>  
irina@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0009-008-6484-1235>

**Владимир Иванович Фисинин<sup>3</sup>**

доктор сельскохозяйственных наук, профессор,  
академик РАН, научный руководитель  
<https://orcid.org/0000-0003-0081-6336>

**Иван Афанасьевич Егоров<sup>3</sup>**

доктор биологических наук, профессор,  
академик РАН  
<https://orcid.org/0000-0001-9122-9553>

**Татьяна Анатольевна Егорова<sup>3</sup>**

доктор сельскохозяйственных наук, заместитель  
директора по научно-исследовательской работе  
eta164@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5102-2248>

**Вардгес Агавардович Манукян<sup>3</sup>**

доктор сельскохозяйственных наук, главный научный  
сотрудник, заведующий отделом питания птицы  
manukyan@vnitip.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4564-4427>

**Татьяна Николаевна Ленкова<sup>3</sup>**

доктор сельскохозяйственных наук, профессор  
dissovet@vnitip.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8391-5000>

**Ольга Николаевна Дегтярева<sup>3</sup>**

кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник  
fncvnitip@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7243-7381>

<sup>1</sup>ООО «БИОТРОФ+»,  
бульвар Загребский, 19/1, Санкт-Петербург, 192284,  
Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный аграрный  
университет,  
Петербургское шоссе, 2, Пушкин, Санкт-Петербург,  
196601, Россия

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский  
и технологический институт птицеводства,  
ул. Птицеградская, 10, Сергиев Посад, Московская обл.,  
141311, Россия

**Irina Alexandrovna Klyuchnikova<sup>1,2</sup>**

• Biotechnologist of the Molecular Genetic Laboratory<sup>1</sup>;  
• Graduate Student<sup>2</sup>  
irina@biotrof.ru  
<https://orcid.org/0009-008-6484-1235>

**Vladimir Ivanovich Fisinin<sup>3</sup>**

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician  
of the Russian Academy of Sciences, Scientific Supervisor  
<https://orcid.org/0000-0003-0081-6336>

**Ivan Afanasievich Egorov<sup>3</sup>**

Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician  
of the Russian Academy of Sciences  
<https://orcid.org/0000-0001-9122-9553>

**Tatyana Anatolyevna Egorova<sup>3</sup>**

Doctor of Agricultural Sciences, Deputy Director for Research  
Work  
eta164@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5102-2248>

**Vardges Aghavardovich Manukyan<sup>3</sup>**

Doctor of Agricultural Sciences, Chief Researcher,  
Head of the Poultry Nutrition Department  
manukyan@vnitip.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4564-4427>

**Tatyana Nikolaevna Lenkova<sup>3</sup>**

Doctor of Agricultural Sciences, Professor  
dissovet@vnitip.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8391-5000>

**Olga Nikolaevna Degtyareva<sup>3</sup>**

Candidate of Agricultural Sciences, Researcher  
fncvnitip@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7243-7381>

<sup>1</sup> "BIOTROF+" Ltd,  
19/1 Zagrebkiy Ave., Saint Petersburg, 1192284, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Agrarian University,  
2 Peterburgskoe Highway, Pushkin, St. Petersburg, 196601,  
Russia

<sup>3</sup> All-Russian Scientific Research and Technological Institute  
of Poultry Farming,  
10 Ptitsegradskaya Str., Sergiev Posad, Moscow region,  
141311, Russia



**Подпишитесь на Telegram канал  
ИД «Аграрная наука»**



Ежедневно вы будете получать  
свежие новости АПК  
и сельского хозяйства,  
анонсы отраслевых событий,  
знакомьтесь с результатами  
научных исследований,  
репортажами и интервью.



**Оформите подписку на информационные  
e-mail рассылки**



Дважды в неделю на ваш e-mail ящик  
будут приходить уведомления  
о топовых событиях АПК,  
аналитика, прогнозы,  
приглашения на выставки  
и конференции.

**Через наши рассылки вы можете познакомиться  
со своими товарами и услугами  
потенциальных клиентов.**

**Связаться с редакцией:  
Тел. +7 (495) 777 67 67  
(доб. 1453)  
agrovetpress@inbox.ru**