

УДК: 636.5/.6:637.5

DOI:10.52419/issn2072-2419.2025.4.250

ВЛИЯНИЕ КОРМОВОЙ МИКРОЭЛЕМЕНТНОЙ ДОБАВКИ ЖЕЛЕЗА НА ЭКСПРЕССИЮ ГЕНОВ ЕГО УСВОЕНИЯ В ДВЕНАДЦАТИПЕРСТНОЙ КИШКЕ КУР-НЕСУШЕК ТРЕТЬЕГО ПЕРИОДА ПРОДУКТИВНОСТИ

Кочиш И.И. – академик РАН, д-р с.-х. наук, проф., зав. каф. зооигиены и птицеводства имени А.К. Даниловой (ORCID 0000-0002-8502-6052); **Капитонова Е.А.*** – д-р биол. наук, проф. (ORCID 0000-0002-3549-5969); **Мясникова О.В.** – канд. с.-х. наук, доц. (ORCID 0000-0002-9869-0876); **Коновалова Е.М.** – канд. с.-х. наук, доц., асс. каф. зооигиены и птицеводства имени А.К. Даниловой (ORCID 0000-0002-3549-5969); **Коренюга М.В.** – асс. (ORCID 0000-0002-3549-5969); **Мотин М.С.** – асп. (ORCID 0000-0000-1767-2485)

ФГБОУ ВО «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина»

*kapitonovalena1110@mail.ru

Ключевые слова: куры-несушки, комбикорм, железо, интенсивность яйцекладки, экспрессия генов, метаболизм железа.

Key words: laying hens, compound feed, iron, egg laying intensity, gene expression, iron metabolism. laying hens, compound feed, iron, egg laying intensity, gene expression, iron metabolism.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РНФ, соглашение № 22-16-00009-П от 10.06.2025 г.

Поступила: 14.07.2025

Принята к публикации: 05.12.2025
Опубликована онлайн: 26.12.2025



РЕФЕРАТ

Несмотря на высокие темпы развития отечественного птицеводства и ежегодный рост валового производства пищевых яиц, еще есть резервы повышения рентабельности отрасли. Обеспечение населения высококачественными и доступными продуктами питания является основой продовольственной безопасности страны. Целью нашей работы явилось изучение возможного продуктивного долголетия кур-несушек при введении в рационы жидкой кормовой биологически активной добавки «БИО-железо» с микроэлементами. В экспериментальной работе было задействовано 120 голов кур-несушек кросса «Браун Ник». Контрольная группа птиц получала только комбикорм. Кур-несушкам опытных групп дополнительно вводилась кормовая добавка в течение 4 недель в разных нормах ввода, из расчета: 28 мкл/гол., 56 мкл/гол., 84 мкл/гол. В начале опытной работы все поголовье кур-несушек было максимально выровнено по продуктивности. Нами еженедельно учитывались основные зоотехнические показатели: яйценоскость, масса яиц, живая масса кур, сохранность поголовья и интенсивность яйцекладки. Применение отечественной жидкой био-

логически активной кормовой добавки «БИО-железо» с микроэлементами, простимулировало метаболизм птицы. Сохранность поголовья была на уровне 100 %. Масса яиц кур-несушек кросса «Браун Ник» увеличилась – на 2,1-6,1 %, средняя живая масса кур – на 1,1-2,6 %, интенсивность яйцекладки составила – 91,79-92,86 %. Полученные результаты свидетельствуют о фундаментальном процессе усвоения железа у кур-несушек, это исследование показывает, что восприимчивость ткани двенадцатиперстной кишки растет пропорционально увеличению концентрации железа в корме. Есть ограничение на запасы железа в виде ферритина в клетках кишечника, а при насыщении железом внутри клетки белки-транспортеры выводят его в кровь. В дальнейшем мы планируем оценить экспрессию этих генов в других тканях, например, в печени и матке, и пронаблюдать зависимости от разного ввода железа в рацион кур-несушек с уже полученными данными.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Птицеводство – это стратегическая подотрасль животноводства, которая обеспечивает продовольственную безопасность страны. Яичное птицеводство России ежегодно наращивает мощности производства пищевого яйца. За последние пять лет производство пищевого яйца увеличилось – на 3,9 %, при этом на экспорт в другие страны увеличилось на 7,2 %. Промышленное птицеводство ежедневно сталкивается с рисками, которые могут повлечь за собой огромные экономические потери. Однако строгое соблюдение технологии выращивания птицы, которая включает целый комплекс ветеринарных, зоотехнических и организационных мероприятий, способствует оптимизации получения высококачественной продукции при наименьших затратах [4, 5].

Одним из основополагающих факторов получения максимального количества продукции от кур-несушек, является оптимизация кормления по всем основным питательным элементам комбикорма. Многими учеными установлена необходимость включения в рационы несушек различных макро- и микроэлементов [4, 5]. С возрастом у кур-несушек наблюдается снижение способности организма поддерживать гомеостаз минеральных веществ в костной ткани, что может быть связано с ухудшением состояния слизистых оболочек кишечника и, как следствие, снижением абсорбции микроэлементов [3, 4].

Железо играет важную роль не только в процессах кроветворения, но и для пол-

ноценного обеспечения протекания окислительных реакций. Ферритин участвует в регуляции периферического кровяного давления, а доставка Fe^{+2} в плазму крови производится ферропортином. Кроме того, железо входит в простетические группы ферментов и в состав дегидрогеназ. При недостаточном синтезе гемоглобина, из-за дефицита микроэлемента, у птиц может диагностироваться анемия. У сельскохозяйственной птицы дефицит железа в корме приводит к снижению его содержания в яйце, ухудшению выводимости яиц и выводу цыплят с признаками анемии. В высоких дозах железо, особенно в виде сернокислой соли, обладает токсичностью. Однако в реальных условиях такие дозировки обычно не применяются. Согласно исследованиям, добавление сернокислого железа в рацион кур-несушек в дозе 0,12 г на голову в сутки существенно снижало их яйценоскость [1, 2].

Ключевым этапом метаболизма железа является его дуоденальное всасывание, осуществляемое специализированными транспортными белками. В работе Bai, S. P. показана, что экспрессия двухвалентного металлического транспортера 1 (DMT1) происходит в клетках двенадцатиперстной кишки в большей степени. Позже они подтвердили свои результаты экспериментально в работе по влиянию органических и неорганических источников железа (Fe) на его усвоение и экспрессию транспортных белков у цыплят-бройлеров в двенадцатиперстной кишке и тонком кишечнике [7, 8]. В этих исследованиях четко показано, что именно в двена-

дцатиперстной кишке происходит экспрессия генов, связанный с усвоением железа и его всасывание (рисунок 1).

В связи с вышеизложенным, наше внимание привлекла жидкая отечественная кормовая биологически активная добавка «БИО-железо» с микроэлементами (ООО «А-БИО», г. Пущино, Россия), в которой Fe находится в биодоступной форме. Считаем, что разработка отечественных кормовых добавок является

актуальной, имеет научную новизну и практическую значимость для отрасли птицеводства и обеспечения продовольственного суверенитета страны в целом.

Цель работы – изучить влияние отечественной жидкой добавки «БИО-железо» на экспрессию генов метаболизма железа в двенадцатиперстной кишке и яичную продуктивность кур-несушек третьего продуктивного периода.

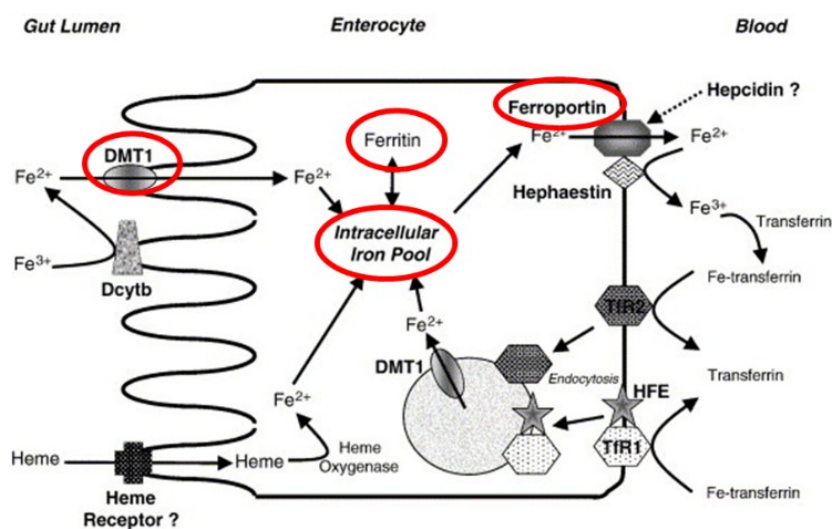


Рисунок 1 – Путь усвоение железа (Fe^{+2}) в энтероците [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ / MATERIALS AND METHODS

Для проведения экспериментальной работы нами были взяты куры-несушки кросса «Браун Ник» 781-суточного возраста, которые выращивались в условиях птицефабрики, принадлежащей АК «ВладЗерноПродукт», Владимирской области. Куры были доставлены для дальнейшего использования в виварий кафедры зоогигиены и птицеводства имени А.К. Даниловой ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА имени К.И. Скрябина. Продолжительность опыта 7 недель, из которых период адаптации составил 3 недели и 4 недели введение кормовой добавки. Для обеспечения продуктивного долголетия кур-несушек кросса «Браун Ник» в основной рацион птице опытных групп вводи-

ли «БИО-железо» в различных концентрациях (таблица 1).

Жидкая кормовая добавка «БИО-железо» состоит: железо (Fe^{3+}), медь, кобальт, селен, йодогоргоновая кислота. Курам-несушкам ежедневно скармливался комбикорм в объеме 140 г производства ООО «АгроЦентрСбыт». Основные качественные показатели комбикорма: обменная энергия 265,0 кКал/100 г, сырок протеин – 13,32 %, сырой жир – 3,32 %, железо 25 мг. Из добавки птица получала железо сверх нормы на 5 %, 10 % и 15 %.

Птица содержалась в индивидуальных клетках 3-х ярусных батарей. Температура в помещениях была на уровне 18-20 °С, влажность 60-63 %. В каждой клетке курам-несушкам ежедневно был предоставлен индивидуальный фронт кормле-

ния и поения, регулярно осуществлялась уборка помета.

На протяжении эксперимента ежедневно учитывались следующие основные зоотехнические показатели: сохранность поголовья, яйценоскость, масса яйца и живая масса кур-несушек. После эксперимента у 5 животных каждой группы проводили отбор двенадцатиперстной кишки для анализа экспрессии генов с предварительной эвтаназией.

Нами были разработаны и протестированы праймеры для определения экспрессии ключевых генов усвоение железа: DMT1 (переносчик двухвалентных металлов 1), отвечающий за всасывание Fe⁺² из химуса; FTH1 (ферритин) белок, который запасает железо в нетоксичной форме; FPN1 (ферропортин1) белок-транспортер, отвечающего за вывод железа из клеток в кровотоки [9]. В качестве референтных генов были выбраны GAPDH и TBP, однако в ходе исследования было решено отказаться от TBP так как его экспрессия была неадекватной не проходящий внутренний контроль [10, 11].

Праймеры были разработаны в соответствии с рекомендациями MIQE и Manual of Diagnostic Tests and Vaccines for Terrestrial Animals: все праймеры располагались на экзон-экзон участках кодирующей последовательности гена (CDS), длина праймеров составляла 18-22 нуклеотида, все праймеры имели схожую температуру отжига, праймеры не имели внутренних заикливание или шпилек, Энергия Гиббса (ΔG) для гибридизации прямого и обратного праймера не превышала -5 ккал/моль [12].

Последовательности были получены из базы данных RefSeq RNAs после чего вариации этих сиквенсов были выровнены для нахождения оптимального участка. Также выбранные участки, ограниченные праймерами, были протестированы на специфичность в BLAST: мы получили 98-100% попадания в *gallus gallus* и другие виды птичьих (*avian*). Таким образом, нами получены высокоспецифичные праймеры для работы с РНК выбранных генов *in silico* (таблица 2).

Таблица 1 – Схема опыта

Группа	Количество голов	Особенности эксперимента	Содержание железа в корме
1-я контрольная	30	Основной рацион (ОР) 140 г/гол.	25 мг
2-я опытная	30	ОР+«БИО-железо» 28 мкл/гол.	25 мг + 1,4 мг
3-я опытная	30	ОР+«БИО-железо» 56 мкл/гол.	25 мг + 2,8 мг
4-я опытная	30	ОР+«БИО-железо» 84 мкл/гол.	25 мг + 4,2 мг

Праймеры были протестированы *in vitro* на модельной РНК и кДНК полученной от средней пробы двенадцатиперстной кишки кур-несушек. РНК из средней пробы тканей была выделена коммерческим набором RUpus-250 (Биолабмикс, Россия), ОТ-ПЦР-РВ была проведена с каждым геном отдельно в четырёх повторях в одну постановку реакции для опре-

деления работоспособности праймеров. Затем концентрат кДНК был разведен для последующего исследования и создания внутреннего контроля (ВКО). ВКО состоял из четырёх десятикратных разведений наработанной матрицы (m10/m100/m1000/m10000) средней пробы для оценки эффективности ПЦР в конкретной постановке.

Таблица 2 – Праймеры генов исследования

Название гена	Gene ID	F	R	Tm, (°C)	E, %
DMT1	NM_001396394	TGATGAGCATCGCC-TATTTGGAC	ACAC-CTCGGCCAGGTGCA	56	97.5
FTH1	NM_205086.2	CTGAGAA-GCTGATGAAGCTGCA	GCACACTCCATT-GCAGTCAG	55	102
FPN1	NM_001012913.2	GCCTGTGCCTTTAA-TCTCTGTTAG	GATAATTCATGGAG-TTTTGGACACC	55	103
GAPDH	NM_204305.3	CTTCATCGATCTGA-ACTACATGGTTT	GATCACAAGTTTCC-CGTTCTCAG	55	103

Gene Name	DMT1	FPN1	FTH1	GAPDH
Slope	-3.4600	-3.2430	-3.2110	-3.1900
Efficiency	1.95	2.03	2.05	2.06
Error	0.27	0.52	0.31	0.69
R ²	1.00	0.99	1.00	0.98
Y-Intercept	37.13	36.91	33.38	35.46

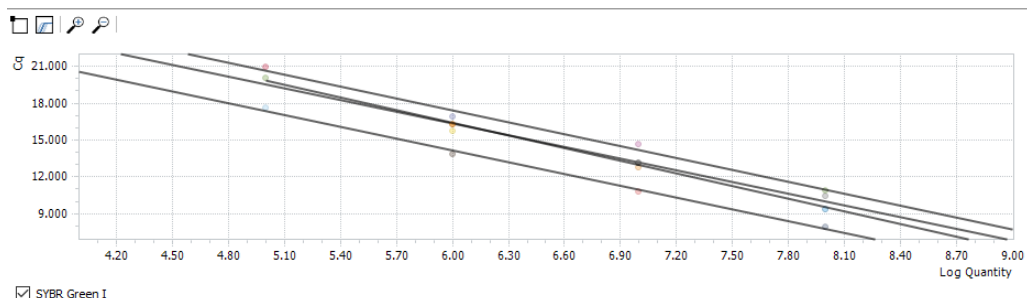


Рисунок 2 – Расчет эффективности ПЦР для генов с красителем SYBR Green.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4
B	5	5	5	6	6	6	7	7	7	8	8	8
C	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
D	13	13	13	14	14	14	15	15	15	16	16	16
E	17	17	17	18	18	18	19	19	19	20	20	20
F	CP	CP	CP	OK O	PK O	M1	M2	M3	M4	OK O	PK O	M1
G	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H	13	14	15	16	17	18	19	20	CP	M2	M3	M4

Рисунок 3 - Схема плашки для ПЦР
зеленый – ген искомый желтый – ген референс.

Градиентная ПЦР была проведена для нахождения оптимальной температуры реакции для смеси из коммерческого набора БиоМастер ОТ-ПЦР SYBR Blue (Биолабмикс, Россия). Оптимальная температура для ПЦР, как и расчетная, составила 55 °С. Эффективность праймеров для каждого гена проводили отдельно методом десятикратных разведений ВКО.

В соответствии с рекомендациями эффективность ПЦР для каждого гена был примерно одинаковой ($\pm 5\%$). Таким образом мы протестировали наши праймеры *in silico* и *in vitro*, они соответствуют всем нормам (рисунок 2).

Исследования *in vivo* включали в себя этапы выделения РНК и постановка ОТ-ПЦР-РВ с последующем расчетом экс-

прессии генов методом Шмитгена-Левака 2^{k-Ac^t} .

Иссечение ткани двенадцатиперстной кишки происходило в середине петли, кусочек ткани помещали в раствор РНК-лейтера и транспортировали в Международную лабораторию молекулярной генетики и геномики птицы кафедры зоогигиены и птицеводства им. А.К. Даниловой. Далее РНК выделили при помощи модифицированного набора RUplus-250 (Биолабмикс, Россия) с добавлением 2-Меркаптоэтанола на этапе гомогенизации. Выделенную РНК оценивали количественно на приборе Qubit 3.0 и хранили при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ОТ-ПЦР-РВ реакцию проводили в плашках для ПЦР на приборе Rosh 96, в плашку раскапывалось 20 проб (опытные группы и контрольная по 5 образцов в каждой) и средняя пробы в трех повторах для гена искомого и один повтор для гена референса, ВКО, ПКО, ОКО (рисунок 3).

При таком дизайне эксперимента мы оцениваем работу смеси при каждой ПЦР, что сводит к минимуму ошибки при постановке ПЦР-РВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS

Все куры-несушки, перед проведением экспериментальной работы, в течение

двух недель прошли период адаптации к условиям содержания и кормления в виварии академии. В период адаптации ежедневно проводился учет яичной продуктивности и еженедельно живой массы кур-несушек. После оптимизации жизнедеятельности, с учетом выравнивания по продуктивности, они были разделены на четыре группы (таблица 3).

Как видно из представленных показателей, яичная продуктивность кур-несушек 774-дневного возраста, в начале опыта, во всех группах, находились практически на одном уровне. Группы были сформированы таким образом, чтобы ни по одному из изучаемых параметров, они не имели достоверных различий.

В начале эксперимента масса яиц у кур из 1-й контрольной группы, незначительно, но превышала этот показатель в опытных группах, во 2-й – на 1,2 %, в 3-й – на 1,7 % и в 4-й – на 4,9 %, что и побудило нас применять «БИО-железо». Интенсивность яйцекладки находилась во всех группах колебалась в пределах – 84,76-88,57 %.

Результаты стимуляции продуктивного долголетия кур-несушек отечественной биологически активной добавкой «БИО-железо» представлены в таблице 4.

Таблица 3 – Основные показатели продуктивности кур-несушек в начале опыта

Показатель	Группа			
	1-я контрольная	2-я опытная	3-я опытная	4-я опытная
Яйценоскость, шт./гол.	18,0±0,56	18,1±0,41	18,6±0,32	17,8±0,54
Масса яйца, г	65,2±0,96	64,4±0,85	64,1±0,91	62,0±2,41
Живая масса кур, г	1861,5±107,76	1982,6±39,91	2023,0±37,47	1956,0±41,80
Интенсивность яйцекладки, %	85,71	86,19	88,57	84,76

Таблица 4 – Результаты введения кормовой добавки «БИО-железо»

Показатель	Группа			
	1-я контрольная	2-я опытная	3-я опытная	4-я опытная
Яйценоскость, шт./гол.	26,0±0,51	25,9±0,52	26,0±0,40	25,7±0,56
Масса яйца, г	66,5±0,96	67,8±0,97	67,1±0,91	65,8±0,78
Живая масса кур, г	1996,7±38,95	2048,7±41,93	2040,9±43,89	2019,0±27,48
Интенсивность яйцекладки, %	92,86	92,50	92,86	91,79

По окончании эксперимента отметим, что при обеспечении оптимальных условий кормления и содержания, во всех группах сохранность взрослых кур-несушек составила 100 %. За период эксперимента масса яиц во всех опытных группах возросла, однако наибольший рост был отмечен в опытных группах. Так, масса яиц у кур 1-й группы контроля к концу опыта увеличилась – на 2,0 %, во 2-й группе – на 5,3 %, в 3-й группе – на 4,7 % и в 4-й группе – на 6,1 %. Установлено, что на повышение массы яиц оказало влияние не только условия содержания, но и биологически активная кормовая добавка «БИО-железо» с микроэлементами.

При анализе массы яиц в конце эксперимента отметим, что во 2-й опытной группе она превысила результат группы контроля – на 2,0 %, в 3-й группе – на 1,0 %, а в 4-й группе она была незначительно ниже. Однако отметим, что в 4-й группе была максимальная компенсация массы яиц (+6,1 %), по сравнению с другими опытными группами. Если в начале эксперимента в 4-й опытной группе была отмечена наименьшая масса яиц, по сравнению с группой контроля на уровне 4,9 %, то к концу опыта различия между опытной группой и группой контроля сократились. Применение «БИО-железо» с микроэлементами сократило разрыв между группами и улучшило результат – на 3,8 %. Полученные достижения можно объяснить стимуляцией фолликулов компонентным составом жидкой кормовой биологически активной добавки.

За период эксперимента и ежедневном лимитированном потреблении 140 г комбикорма, куры 1-й контрольной группы увеличили среднюю живую массу кур – на 7,3 %, 2-й опытной – на 3,3 %, 3-й – на 0,9 % и 4-й опытной группы – на 3,2 %, что свидетельствует о создании оптимальных условий кормления и содержания кур в виварии.

Анализируя показатель средней живой массы кур-несушек опытных групп, по сравнению с 1-й группой контроля, отметим увеличение этого показателя во

2-й группе – на 2,6 %, в 3-й группе – на 2,2 % и в 4-й группе – на 1,1 %, что свидетельствовало об эффективности применения «БИО-железо» с микроэлементами для кур-несушек третьего продуктивного периода. Наивысший отклик по живой массе получен во 2-й и 3-й опытных группах.

Интенсивность яйцекладки является комплексным качественным показателем, который свидетельствовал, во-первых, о положительном влиянии снижения технологического стресса у кур старшего возраста при выращивании в виварии академии, что отразилось на продуктивности опытной птицы. Во-вторых, о положительном влиянии кормовой биологически активной добавки «БИО-железо» с микроэлементами курам третьего продуктивного периода. Интенсивность яйцекладки в подопытных группах возросла – на 4,29-7,15 % и достигла к концу эксперимента – 91,79-92,86 %.

Анализ экспрессии генов выявил статистически значимые изменения в транскриптом между экспериментальными группами и контрольной группой. В частности, отмечено достоверное повышение уровня экспрессии генов усвоение железа в ответ на кормовые добавки (рисунок 4).

Как следует из рисунка 4, наблюдаем значительное увеличение экспрессии всех генов, но с разной динамикой.

Экспрессия **DMT1** гена, кодирующего белок связывающий и переносящий Fe^{+2} в клетки эпителия кишечника, увеличивается пропорционально увеличению концентрации препарата. Организм реагирует на молекулярно-биохимическом уровне на присутствие и увеличение концентрации железа в химусе просвета двенадцатиперстной кишки.

Экспрессия гена **FPN1** или же ферропортин1, что выводит из клетки энтероцита железо в кровь, в второй и третьей группе примерно с одинаковой интенсивностью, однако при добавлении 84 мкл/гол мы наблюдаем резкий скачок экспрессии, это может быть связано с насыщением клеток железом, уже некуда запастись его внутри в виде ферритина. Это коррелиру-

ет и с замедлением роста экспрессии **FTN1** в третьей и четвертой группах.

Ферритин запасал железо внутри клеток эпителия пропорционально его всасыванию во второй и третьей группах, однако при повышении концентрации выше

56 мкл/гол мы не наблюдаем пропорционально увеличение экспрессии этого гена, капацити сохранения ферритина, то есть железа в клетке, по нашим расчетам достигается при примерно 3 мг/гол железа.

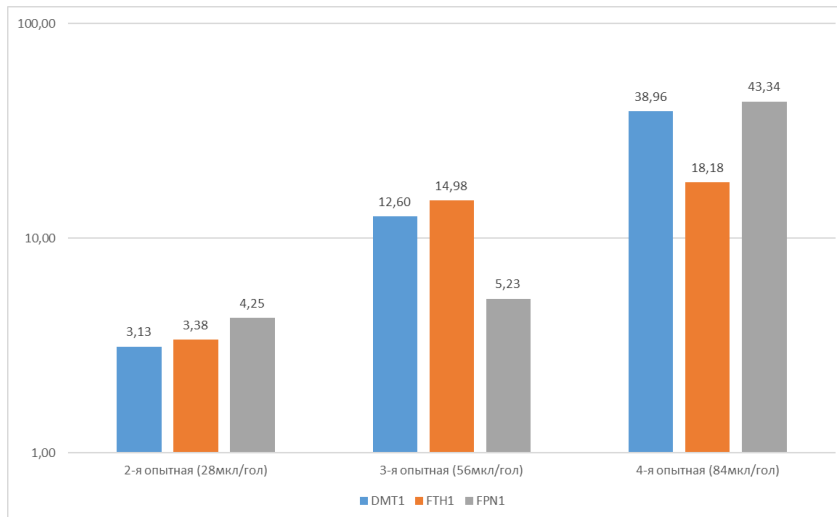


Рисунок 4 – Экспрессия генов связанный с усвоением железа.

ВЫВОДЫ / CONCLUSION

Применение отечественной жидкой биологически активной кормовой добавки «БИО-железо» с микроэлементами, простимулировало метаболизм птицы. Сохранность поголовья была на уровне 100 %. Масса яиц кур-несушек кросса «Браун Ник» увеличилась – на 2,1-6,1 %, средняя живая масса кур – на 1,1-2,6 %, интенсивность яйцекладки составила – 91,79-92,86 %. Полученные результаты свидетельствуют о фундаментальном процессе усвоение железа у кур-несушек, это исследование показывает, что восприимчивость ткани двенадцатиперстной кишки растет пропорционально увеличению концентрации железа в корме. Есть ограничение на запасание железа в виде ферритина в клетках кишечника, а при насыщении железом внутри клетки белки транспортеры выводят его в кровь. В дальнейшем мы планируем оценить экспрессию этих генов в других тканях, например, в печени и матке, и пронаблюдать зависимости от

разного ввода железа в рацион кур-несушек с уже полученными данными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Биологическая химия: метод. указ. к лаб. занятиям по биохимии для студ. вет. фак. и врачей ФПК / Пилаева Н.В., Федоров Б.М., Карпенко Л.Ю. [и др.]. – СПбГАВМ, 2002. – 66 с.
2. Биологические основы минерального питания сельскохозяйственной птицы / Медведский В.А. Базылев М.В. Большакова Л.П. Мунаяр Х.Ф. // Научное обозрение. Биологические науки. – 2016. – № 2 – С. 93-108.
3. Кочиш, И.И. Биология и патология сельскохозяйственной птицы / Кочиш И.И., Смоленский В.И., Щербатов В.И. // М.: Издательство Сельскохозяйственные технологии, 2019. – С. 274-283.: ил. – (Учебник для студентов высших учебных заведений).
4. Производственные риски в промышленном птицеводстве и минимизация потерь: монография / Т.М. Околелова [и др.]

– Минск: ИВЦ Минфина, 2024. 105 с.

5. Подобед Л.И. Особенности кормления сельскохозяйственных птиц: монография // Л.И. Подобед, И.В. Брыло, Е.А. Капитонова. – Минск: ИВЦ «Минфина», 2023.–340 с.

6. Rolić, T., Yazdani, M., Mandić, S. et al. Iron Metabolism, Calcium, Magnesium and Trace Elements: A Review. *Biol Trace Elem Res* 203, 2216–2225 (2025).

7. Bai S, Cao S, Ma X, Li X, Liao X, Zhang L, Zhang M, Zhang R, Hou S, Luo X, Lu L. Organic iron absorption and expression of related transporters in the small intestine of broilers. *Poult Sci.* 2021 Aug;100(8):101182. doi: 10.1016/j.psj.2021.101182. Epub 2021 Apr 11. PMID: 34198093; PMCID: PMC8253913.

8. Zhang LY, Li XF, Liao XD, Zhang LY, Lu L, Luo XG. Effect of iron source on iron absorption and gene expression of iron transporters in the ligated duodenal loops of broilers. *J Anim Sci.* 2017 Apr;95(4):1587-1597. doi: 10.2527/jas.2016.1147. PMID: 28464091.

9. Burge, S., Kelly, E., Lonsdale, D., Mutowo-Muellenet, P., McAnulla, C., Mitchell, A., Sangrador-Vegas, A., Yong, S. Y., Mulder, N., & Hunter, S. (2012). Manual GO annotation of predictive protein signatures: the InterPro approach to GO curation. *Database: the journal of biological databases and curation*, 2012, bar068. <https://doi.org/10.1093/database/bar068>

10. Mogilicherla, K., Athe, R. P., Chatterjee, R. N., & Bhattacharya, T. K. (2022). Identification of suitable reference genes for normalization of quantitative real-time PCR-based gene expression in chicken (*Gallus gallus*). *Animal genetics*, 53(6), 881–887. <https://doi.org/10.1111/age.13252>

11. Olias P, Adam I, Meyer A, Scharff C, Gruber AD (2014) Reference Genes for Quantitative Gene Expression Studies in Multiple Avian Species. *PLoS ONE* 9(6): e99678. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099678>

12. World Organisation for Animal Health. (2024). *Manual of Diagnostic Tests and Vaccines for Terrestrial Animals* (3rd ed.).

REFERENCES

1. Biological chemistry: a methodological guide to laboratory classes in biochemistry for students of the veterinary faculty and doctors of the faculty of advanced training / Pilaeva N.V., Fedorov B.M., Karpenko L.Yu. [et al.]. - SPbGAVM, 2002. - 66 p.

2. Biological foundations of mineral nutrition of agricultural poultry / Medvedsky V.A., Bazylev M.V., Bolshakova L.P., Munayar H.F. // Scientific review. Biological sciences. - 2016. - No. 2 - pp. 93-108.

3. Kochish, I.I. Biology and pathology of agricultural poultry / Kochish I.I., Smolensky V.I., Shcherbatov V.I. // M.: Agricultural Technologies Publishing House, 2019. – Pp. 274-283.: ill. – (Textbook for students of higher educational institutions).

4. Production Risks in Industrial Poultry Farming and Loss Minimization: Monograph / T.M. Okolelova [et al.] – Minsk: Information and Communication Center of the Ministry of Finance, 2024. 105 p.

5. Podobed L.I. Features of Feeding Agricultural Poultry: Monograph // L.I. Podobed, I.V. Brylo, E.A. Kapitonova. – Minsk: Information and Communication Center "Minfina", 2023.–340 p.

6. Rolić, T., Yazdani, M., Mandić, S. et al. Iron Metabolism, Calcium, Magnesium and Trace Elements: A Review. *Biol Trace Elem Res* 203, 2216–2225 (2025).

7. Bai S, Cao S, Ma X, Li X, Liao X, Zhang L, Zhang M, Zhang R, Hou S, Luo X, Lu L. Organic iron absorption and expression of related transporters in the small intestine of broilers. *Poult Sci.* 2021 Aug;100(8):101182. doi: 10.1016/j.psj.2021.101182. Epub 2021 Apr 11. PMID: 34198093; PMCID: PMC8253913.

8. Zhang LY, Li XF, Liao XD, Zhang LY, Lu L, Luo XG. Effect of iron source on iron absorption and gene expression of iron transporters in the ligated duodenal loops of broilers. *J Anim Sci.* 2017 Apr;95(4):1587-1597. doi: 10.2527/jas.2016.1147. PMID: 28464091.

9. Burge, S., Kelly, E., Lonsdale, D., Mutowo-Muellenet, P., McAnulla, C., Mitchell, A., Sangrador-Vegas, A., Yong, S. Y., Mulder, N., & Hunter, S. (2012). Manual

GO annotation of predictive protein signatures: the InterPro approach to GO curation. Database: the journal of biological databases and curation, 2012, bar068. <https://doi.org/10.1093/database/bar068>

10. Mogilicherla, K., Athe, R. P., Chatterjee, R. N., & Bhattacharya, T. K. (2022). Identification of suitable reference genes for normalization of quantitative real-time PCR-based gene expression in chicken (*Gallus gallus*). *Animal genetics*, 53(6), 881–887.

<https://doi.org/10.1111/age.13252>

11. Olias P, Adam I, Meyer A, Scharff C, Gruber AD (2014) Reference Genes for Quantitative Gene Expression Studies in Multiple Avian Species. *PLoS ONE* 9(6): e99678. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099678>

12. World Organization for Animal Health. (2024). *Manual of Diagnostic Tests and Vaccines for Terrestrial Animals* (3rd ed.).