

4.2.4. Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и производства продукции животноводства (сельскохозяйственные науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-2-124-130

УДК 636.4.087.69:[636.4.033+612.017.1]

Экспрессия генов, ассоциированных с формированием мышечной ткани, антиоксидантного и иммунологического статуса у свиней, получавших протеиновую муку из чёрной львинки (*Hermetia illucens*)

Ю. А. Боголюбова, инженер Центра коллективного пользования «Биоресурсы и биоинженерия сельскохозяйственных животных»

Н. В. Боголюбова, доктор биологических наук; главный научный сотрудник, заведующий отделом физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных

Р. В. Некрасов✉, доктор сельскохозяйственных наук, профессор РАН, директор Всероссийского научно-исследовательского института физиологии, биохимии и питания животных – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста»

Федеральный исследовательский центр животноводства - ВИЖ им. акад. Л.К. Эрнста

142132, Московская область, г.о. Подольск, пос. Дубровицы, д. 60

✉ nek_roman@mail.ru

Резюме. В условиях возрастающего спроса на высокобелковые корма и необходимости импортозамещения традиционных компонентов (соевый шрот, рыбная мука) особый интерес представляет использование альтернативных источников протеина, в частности, насекомых. Мука из личинок чёрной львинки (*Hermetia illucens*) отличается не только высоким содержанием протеина с благоприятным аминокислотным составом, но и наличием биологически активных веществ, таких как лауриновая кислота и хитин, которые могут модулировать иммунный ответ и микробиом кишечника. Целью данного исследования являлось изучение влияния скармливания протеиновой муки из чёрной львинки на продуктивные показатели и экспрессию генов, связанных с ростом мышечной ткани, антиоксидантной защитой (*CAT*, *SOD*, *GST*, *GR*) и иммунитетом (*IL-6*, *IL-8*) в различных тканях свиней. Эксперимент проведен в условиях физиологического двора ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста на 20 помесных боровках (F-2:(КБхЛ)хД), разделенных на контрольную и опытную группы. Животные опытной группы дополнительно к основному рациону получали 5,0; 3,0; 1,0 % муки из личинки чёрной львинки в зависимости от периода выращивания. Установлено, что включение инсектопротеина способствовало повышению среднесуточных приростов на 4,88 % ($p \leq 0,05$) и массы туши на 6,04 % ($p \leq 0,05$). Молекулярно-генетический анализ выявил тканеспецифичные изменения экспрессии целевых генов. В печени и длиннейшей мышце спины опытных животных отмечено повышение относительной экспрессии генов антиоксидантной защиты (*CAT*, *SOD*, *GST*) и иммунных факторов (*IL-8*, *IL-6*), что свидетельствует об активации защитных механизмов в ответ на поступление новых компонентов корма. Полученные данные подтверждают, что мука из чёрной львинки является не только ценным источником протеина, но и функциональным компонентом рациона, способным модулировать метаболические и иммунные процессы на молекулярном уровне.

Ключевые слова: свиньи, кормление, чёрная львинка (*Hermetia illucens*), инсектопротеин, экспрессия генов, антиоксидантная защита, иммунитет.

Для цитирования: Боголюбова Ю. А., Боголюбова Н.В., Некрасов Р.В. Экспрессия генов, ассоциированных с формированием мышечной ткани, антиоксидантного и иммунологического статуса у свиней, получавших протеиновую муку из чёрной львинки (*Hermetia illucens*) // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 2 (74). С. 124-130. doi:10.18286/1816-4501-2026-2-124-130

Expression of genes associated with the formation of muscle tissue, antioxidant, and immunological status of pigs fed with black soldier fly (*Hermetia illucens*) protein meal

Yu. A. Bogolyubova, N.V. Bogolyubova, R.V. Nekrasov✉

Federal Research Center for Animal Husbandry - L.K. Ernst All-Russian Research Institute of Animal Husbandry
142132, Moscow Region, Podolsk, Dubrovitsy, 60

✉ nek_roman@mail.ru

Abstract. The usage of alternative protein sources, particularly insects, is of particular interest in the growing demand for high-protein feed and the need for import substitution of traditional components (soybean meal, fish meal). Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larval meal is characterized not only by its high protein content with a favorable amino acid composition, but also by the presence of biologically active substances such as lauric acid and chitin, which can modulate the

immune response and intestinal microbiome. The aim of this study was to investigate the effect of feeding with black soldier fly protein meal on productive parameters and the expression of genes associated with muscle growth, antioxidant protection (CAT, SOD, GST, GR) and immunity (IL-6, IL-8) in various tissues of pigs. The experiment was conducted in the physiological yard of the Federal Research Center for Animal Husbandry and Life Sciences named after L.K. Ernst on 20 crossbred boars (F-2: (KBxL)xD), divided into control and experimental groups. Animals of the experimental group received, in addition to the main diet, 5.0; 3.0; 1.0% of black soldier fly meal depending on the rearing period. It was found that the inclusion of the insectoprotein increased average daily gain by 4.88% ($p \leq 0.05$) and carcass weight by 6.04% ($p \leq 0.05$). Molecular genetic analysis revealed tissue-specific changes in the expression of target genes. Increased relative expression of antioxidant defense genes (CAT, SOD, GST) and immune factors (IL-8, IL-6) was observed in the liver and longissimus dorsi muscle of the experimental animals, indicating activation of the defense mechanisms in response to the introduction of new feed components. These data confirm that black soldier fly meal is not only a valuable source of protein but also a functional dietary component capable of modulating metabolic and immune processes at the molecular level.

Keywords: pigs, feeding, black soldier fly (*Hermetia illucens*), insectoprotein, gene expression, antioxidant defense, immunity.

For citation: Bogolyubova Yu. A., Bogolyubova N.V., Nekrasov R.V. Expression of genes associated with the formation of muscle tissue, antioxidant, and immunological status of pigs fed with black soldier fly (*hermetia illucens*) protein meal // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.2 (74): 124-130 doi:10.18286/1816-4501-2026-2-124-130

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-16-00021. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Современное свиноводство сталкивается с вызовом поиска устойчивых и экономически эффективных источников белка для замены традиционных, но дорогостоящих соевого шрота и рыбной муки. В этом контексте мука, полученная из личинок насекомых, в частности чёрной львинки (*Hermetia illucens*) рассматривается как одна из самых перспективных альтернатив [1]. Многочисленные исследования подтверждают, что инсектопротеин обладает высокой переваримостью и сбалансированным аминокислотным составом, что позволяет поддерживать высокие показатели роста и конверсии корма у моногастрических животных [2].

Однако, помимо питательной ценности мука из насекомых содержит уникальные биологически активные компоненты. Хитин, входящий в состав экзоскелета личинок, и его производные могут выступать в роли пребиотиков и иммуномодуляторов, влияя на состав микробиоты и местный иммунитет кишечника [1]. Лауриновая кислота, обильно представленная в липидах чёрной львинки, обладает доказанными антимикробными свойствами [1]. В связи с этим включение инсектопротеина в рацион может оказывать комплексное воздействие на организм животного, выходящее за рамки простого обеспечения аминокислотами [3].

Традиционная оценка эффективности кормовых добавок базируется на зоотехнических показателях (прирост, конверсия). Однако для понимания глубинных механизмов влияния новых кормов на организм необходимо изучение молекулярно-генетических процессов. Анализ экспрессии генов позволяет зафиксировать реакцию организма на ранних этапах, до проявления клинических или продуктивных изменений [4]. Исследования на цыплятах-бройлерах и свиньях показывают, что замена традиционного белка на инсектопротеин может влиять на активность генов, связанных с окислительным стрессом и воспалением [5].

В этой работе мы остановились на анализе экспрессии генов, кодирующих ключевые ферменты

антиоксидантной системы (CAT, SOD, GST, GR). Гены транскрипционного фактора митохондрий (TFAM) и цитохрома с оксидазы (CytC) выбраны как маркеры энергетического обмена, интенсивность которого напрямую связана с процессами роста мышечной ткани. Изучение экспрессии генов интерлейкинов (IL-6, IL-8) продиктовано потенциальным влиянием хитина и лауриновой кислоты на иммунную систему и воспалительные реакции в кишечнике и других тканях.

Целью данного исследования являлось изучение влияния скармливания протеиновой муки из личинок чёрной львинки (*Hermetia illucens*) на продуктивные показатели, а также на экспрессию генов, ассоциированных с формированием мышечной ткани, антиоксидантным и иммунологическим статусом у растущих свиней.

Материалы и методы

Исследования проведены в условиях физиологического двора ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. Объектом исследований служили помесные боровки (F-2:(KBxL)xD). Для эксперимента было отобрано 20 животных-аналогов по живой массе и возрасту, которых разделили на две группы по 10 голов в каждой (табл. 1).

Таблица 1. Схема проведения исследований в условиях свиноводства ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

Группа	Голов	Примечание
Контрольная (С)	10	Свиной комбикорм (СК)
Опытная (Е)	10	СК + 5,0; 3,0; 1,0% муки из личинки чёрной львинки согласно периоду откорма

Продолжительность опытного периода составила 100 дней и включала три фазы выращивания. Животные контрольной группы получали стандартные полнорационные комбикорма (СК-4, СК-5, СК-6) (табл. 2), сбалансированные по всем элементам питания согласно детализированным нормам.

Таблица 2. Составы комбикормов для растущего откармливаемого молодняка свиней

Компонент, %	Наименование комби-корма		
	СК-4 ¹	СК-5 ²	СК-6 ³
Пшеница	46,40	49,99	40,00
Ячмень	28,45	31,43	19,16
Кукуруза	-	-	15,0
Шрот соевый, СП 44%	13,87	-	3,00
Шрот подсолнечный, СП 36%	5,50	8,61	9,00
Барда сухая	-	4,0	-
Горох	-	-	1,50
Белковая кормосмесь	2,50	2,50	1,00
Отруби пшеничные	-	-	8,50
Поваренная соль	0,50	0,50	0,50
Сульфат лизина	0,78	1,12	0,63
Метионин	0,13	0,02	-
L-треонин	0,17	0,06	0,05
Монокальцийфосфат	0,46	0,28	-
Известняковая мука	0,94	1,19	1,36
Премикс	0,30	0,30	0,30

Рационы для опытной группы отличались включением в их состав муки из личинок чёрной львинки в количестве 5,0 % в первый период (СК-4), 3,0 % – во второй (СК-2) и 1,0 % – в третий (СК-3) за счет частичной замены традиционных белковых компонентов (шротов).

В течение опыта учитывали живую массу животных путем индивидуальных взвешиваний, а также потребление кормов. По окончании периода откорма был проведен контрольный убой с целью

взятия образцов тканей (длиннейшая мышца спины, печень, слепая кишка) для молекулярно-генетического анализа.

Образцы тканей объемом не более 2 см³ непосредственно после отбора помещали в стабилизирующий раствор IntactRNA (ЗАО «Евроген», Россия) и хранили при – 20 °С до выделения РНК. Выделение тотальной РНК проводили с использованием набора реагентов «РНК-Экстрен» (НПК «Синтол», Россия) согласно инструкции производителя. Концентрацию и чистоту выделенной РНК оценивали спектрофотометрически. Реакцию обратной транскрипции для получения кДНК проводили с помощью набора «ОТ-1» (НПК «Синтол», Россия) в соответствии с протоколом фирмы-изготовителя. Реакцию амплификации с праймерами генов проведена при помощи набора реагентов для проведения ПЦР-РВ в присутствии SYBR Green I и референсного красителя ROX (НПК «Синтол», Россия) на амплификаторе детектирующем ДТлайт (НПО «ДНК-Технология», Россия)

Последовательности специфических праймеров представлены в таблице 3. В качестве референсного гена для нормализации данных использовали ген бета-актина (ACTB). Расчет относительного уровня экспрессии проводили методом 2^{-ΔΔCt}. Статистическую обработку данных осуществляли с использованием t-критерия Стьюдента и критерия Тьюки. Различия считали статистически значимыми при p<0,05.

Таблица 3. Характеристика исследуемых генов и последовательности праймеров

Ген	Название и действие	Праймер F 5'-3'	Праймер R 3'-5'
CAT	Ген каталазы. Один из основных ферментов разрушения активных форм кислорода и поддержания антиоксидантной защиты клеток от их губительного воздействия.	CCTGCAACGTTCTG TAAGGC	GCTTCATCTGGTCAC TGGCT
SOD-1	Ген супероксиддисмутазы-1. Роль SOD заключается в ускорении реакции превращения токсичного для организма кислородного радикала – супероксида – в перекись водорода и молекулярный кислород	AAGGCCGTGTGTGT GCTGAA	AGTGGCCACACCATC TTTGC
GST	Ген глутатионтрансферазы. Этот фермент катализирует конъюгацию глутатиона с широким рядом неполярных соединений эндогенного и экзогенного происхождения, содержащих электрофильные атомы углерода, серы, азота и фосфора, что вносит важный вклад в защиту клетки от возможного токсического действия этих соединений	TCCCCACGGTGAA- GAAGTTT	CGTCAGTGGGAGGC TTCCT
GR	Ген глутатионредуктазы. Фермент восстанавливает дисульфидную связь окисленного глутатиона GSSG до его сульфгидрильной формы GSH	CAG- TAGAGGTCAACGG- GAAGAAGT	GCCGCCTGTGG- CAATC
TFA M	Ген транскрипционного фактора А митохондрий. Белок синтезируется в клетке и транспортируется в митохондрии и активирует транскрипцию и участвует в репликации мтДНК.	TGTGCGGTTTGTGG AAGT	ACCTGCCAGTCTGCC CTAT
Cytc	Ген цитохром с-оксидаза I. Фермент класса оксидоредуктаз; катализирует конечный этап переноса электронов на кислород в процессе окислительного фосфорилирования	TACAGTCTAATGCTT CACTCAGCCA	GGGGCAATTATTAGG GGAAGTAGTCA
IL-6	Ген Интерлейкина 6. Сигнальные молекулы, привлекают дополнительных лейкоцитов из кровообращения к месту инфекции, чтобы повысить сопротивление эпителиальных клеток инфекции.	GCTGCTTCTGGTGA TGGCTACTGCC	TGAAACTCCACAA- GACCGGTGGTGA
IL-8	Ген Интерлейкина 8. Сигнальные молекулы, привлекают дополнительных лейкоцитов из кровообращения к месту инфекции, чтобы повысить сопротивление эпителиальных клеток инфекции.	AGCCCGTGTCAACA TGACTTCC	TTGTGTTGG- CATCTTTACTGA

Результаты

Включение протеиновой муки из чёрной львинки в состав комбикормов оказало положительное влияние на продуктивные качества подопытных свиней (табл. 4). Животные опытной группы превосходили контроль по живой массе в конце откорма на

4,2 %, абсолютному приросту — на 4,88 % (p≤0,05), а по среднесуточному приросту — на 4,88 % (p≤0,05). При этом потребление корма в опытной группе было выше на 7,51 % (p≤0,03), что при тенденции к незначительному (2,43 %) увеличению конверсии корма может свидетельствовать о хорошей поедаемости

рациона с инсектопротеином. Масса туши убойных животных опытной группы была достоверно выше на 6,04 % ($p < 0,04$), что указывает на положительное влияние добавки на мясную продуктивность.

На следующем этапе работы был проведен анализ экспрессии генов в печени, тканях слепой кишки и длиннейшей мышце спины. Полученные данные свидетельствуют о выраженной тканеспецифичности ответа на введение инсектопротеина (табл. 5).

Таблица 4. Основные результаты выращивания ($n=10$, $M \pm m$)

Показатель	Группа		p-value
	контрольная С	опытная Е	
Живая масса при постановке на опыт, кг	17,25±0,36	17,30±0,0,19	0,96
Живая масса в конце опыта, кг	115,62±1,54	120,47±1,85	0,06
Абсолютный прирост за период, кг	98,37±1,62	103,17±1,93	0,05
Среднесуточный прирост, г	983,70±16,18	1031,70±19,26	0,05
В % к контролю	100,00	104,88	-
Потребление комбикорма, кг/гол.	256,84±6,38	276,11±6,75	0,03
В % к контролю	100,00	107,51	-
Конверсия корма, кг комбикорма / кг прироста	2,61±0,05	2,67±0,03	0,18
В % к контролю	100	102,43	-
Масса туши, кг	82,20±190	87,17±1,45	0,04
Убойный выход, %	72,94±0,37	72,92±0,28	0,97

Таблица 5. Экспрессия генов в различных тканях свиней при проведении исследований по изучению инсектопротеина в кормлении свиней

Группа	Ген							
	CAT	SOD	GST	GR	TFAM	Cytc	IL-6	IL-8
Печень								
1 контрольная	1	1	1	1	1	1	1	1
2 -протеин	2,39±0,13**	1,52±0,15*	1,95±1,03	2,41±0,48**	1,35±0,32	1,59±0,71	5,86±1,62**	13,84±3,40**
Слепая кишка								
1 контрольная	1	1	1	1	1	1	1	1
2 -протеин	2,42±0,79	0,85±0,51	0,45±0,07**	0,32±0,08***	0,38±0,13*	6,77±1,15	0,75±0,23	2,14±0,31*
Длиннейшая мышца								
1 контрольная	1	1	1	1	1	1	1	1
2 -протеин	3,14±0,61**	2,27±0,35	1,36±0,25*	0,69±0,17	2,54±1,60	0,56±0,06*	1,28±0,09*	3,31±0,61**

Достоверно по критерию Тьюки с контрольной группой: * - $p < 0,05$, ** - $p < 0,01$, *** - $p < 0,001$

В печени, являющейся центральным органом метаболизма и детоксикации, наблюдалось увеличение экспрессии всех исследованных генов. Наиболее ярко это проявилось для генов иммунного ответа — *IL-8* (в 13,84 раза, $p < 0,01$) и *IL-6* (в 5,86 раза, $p < 0,01$). Это согласуется с данными зарубежных исследователей о потенциальных иммуностимулирующих свойствах компонентов муки из насекомых, в частности хитина [1]. Повышение экспрессии генов антиоксидантных ферментов (*CAT*, *SOD*, *GST*, *GR*) в 1,5...2,4 раза может отражать адаптацию гепатоцитов к усилению метаболических процессов и необходимости нейтрализации возможных прооксидантных факторов, поступающих с кормом. Однако, как показывают исследования с применением в рационах мучного хрущака, адекватный уровень антиоксидантов в рационе (витамин Е, селен) позволяет избежать развития окислительного стресса даже при использовании инсектопротеина [5].

В слепой кишке картина экспрессии изучаемых генов была неоднозначной. С одной стороны, отмечено повышение экспрессии провоспалительного хемокина *IL-8* (в 2,14 раза, $p < 0,05$) и маркера энергетического обмена *Cytc* (в 6,77 раза), что может быть реакцией на изменение микробиоты и состава химуса. С другой стороны наблюдалось достоверное снижение экспрессии генов глутатионовой системы защиты

(*GST*, *GR*) и *TFAM*. Снижение активности глутатионовой системы в кишечнике может быть связано с перераспределением ресурсов организма в пользу печени или с прямым воздействием лауриновой кислоты и хитина на эпителиоциты [1]. Исследования микробиоты свиней при скормливания протеина насекомых показывают сдвиги в соотношении *Firmicutes/Bacteroidetes*, что также косвенно подтверждает активное взаимодействие компонентов корма с кишечной средой [6].

В длиннейшей мышце спины выявлено значительное повышение экспрессии генов антиоксидантной защиты — *CAT* (в 3,14 раза, $p < 0,01$), *SOD* (в 2,27 раза) и *GST* (в 1,36 раза, $p < 0,05$). В некоторых работах также отмечалось увеличение активности каталазы в скелетных мышцах при скормливания протеина насекомых, в то время как активность других ферментов (*GPX*, *SOD*) не менялась [5]. Авторы связывают это с особенностями регуляции антиоксидантной системы в мышечной ткани. Повышение экспрессии *IL-6* и *IL-8* в мышце (в 1,28 и 3,31 раза соответственно) может указывать на активацию локальных иммунных механизмов, связанных с усилением пластического обмена. Повышение экспрессии *TFAM* (в 2,54 раза) на фоне снижения *Cytc* ($p < 0,05$) может свидетельствовать о структурной перестройке

митохондриального аппарата в условиях интенсивного роста, что требует дальнейшего изучения [7, 8].

Таким образом, полученные данные показывают, что протеиновая мука из чёрной львинки выступает не просто как источник аминокислот, но и как биологически активная добавка, модулирующая экспрессию генов, ответственных за ключевые гомеостатические системы организма — иммунную и антиоксидантную. Активация этих систем в печени и мышечной ткани, способствует более эффективной утилизации питательных веществ и реализации генетического потенциала мясной продуктивности, что и отразилось в увеличении приростов и массы туши [9, 10].

Обсуждение

В результате проведенных исследований было установлено, что добавление в рационы поросят инсектопротеина (5,0; 3,0; 1,0 %) способствовало увеличению среднесуточного прироста на 4,88 % и массы туши на 6,04 %. Данные согласуются с имеющимися в научной литературе исследованиями. Например, Yu, M. et al (2019) выявили, что включение 4 % муки из личинок в рацион свиней достоверно ($p < 0,05$) увеличило конечную живую массу и среднесуточный прирост [11]. Описано также, что увеличение дозировки муки из личинок до 8% не показало преимуществ перед более низкой дозировкой, что объясняет эффективность дозировок в текущем исследовании. Другие авторы [12] отметили, что при замене рыбной муки в рационе поросят на инсектопротеин увеличивалась масса туши, что показано и в нашем исследовании.

Ключевым результатом работы является выявление молекулярных механизмов, объясняющих установленный зоотехнический эффект при использовании альтернативных источников белка в виде инсектопротеина. Повышение экспрессии провоспалительных цитокинов в печени связано с воздействием хитина и лауриновой кислоты на рецепторы врожденного иммунитета (например TLR), а одновременная активация генов *CAT*, *SOD*, *GR* в 1,5...2,4 раза может указывать на адекватный антиоксидантный ответ, который предотвращает развитие окислительного стресса, что описано в работе Ringseis et al (2021), в результатах которой описан компенсаторный механизм у свиней - усиление одного из ферментов в мышечной ткани свиней для предотвращения системного окислительного стресса [13]. Авторы работы [14] также сделали предположение о работе подопных компенсаторных механизмов.

Tang Q. et al (2022) в работе [15] описали снижение экспрессии *IL-8* в тощей кишке поросят при скормливании муки *Hermetia illucens*, и в нашем исследовании выявлено повышение экспрессии данного цитокина в печени в 13,8 раз ($p < 0,01$). Данное различие может быть обусловлено тканеспецифичностью ответа.

В длиннейшей мышце спины поросят в нашем эксперименте было обнаружено повышение экспрессии гена *TFAM* - ключевого регулятора

биосинтеза митохондрий в 2,54 раза. При этом было отмечено снижение экспрессии гена *Cytc*. Данное явление может отражать структурно-функциональную перестройку в условиях синтеза мышечного белка, что описывают авторы в работе [16].

Для стенки слепой кишки были получены противоречивые данные. Отмечено локальное повышение экспрессии гена *IL-8*, указывающее на активацию иммунитета в ответ на изменение состава микробиоты. Похожие результаты описаны в работе [17] при скормливании инсектопротеина свиньям. С другой стороны, было отмечено снижение экспрессии генов глутатионовой системы (*GST*, *GR*) и *TFAM* более, чем на 50 %, что может указывать на прямое воздействие компонентов хитина на эпителиоциты. Это требует отдельного исследования. Авторы работы [18] показали, что включение муки *Hermetia illucens* в рацион поросят увеличивает разнообразие микробиоты, при этом не вызывая воспаления. Повышение экспрессии гена *IL-8* в нашем исследовании может быть связано с локальной активацией врожденного иммунитета в ответ на изменения микробиоты, а одновременное снижение экспрессии генов глутатионовой системы (*GST*, *GR*) может указывать на активацию этих ферментов в печени.

Перспективным направлением для будущих исследований может быть изучение эпигенетических механизмов наблюдаемых эффектов. В недавней работе [19] было показано, что мука *Hermetia illucens* способна повышать экспрессию генов антимикробных пептидов через усиление ацетиллирования гистонов. Можно предположить, что выявленное нами изменение экспрессии генов антиоксидантной защиты (*CAT*, *SOD*) и провоспалительных цитокинов также может быть объяснено эпигенетическими процессами [20].

Таким образом, протеиновая мука из чёрной львинки - метаболически активный компонент рациона, который приводит к органоспецифичной активации систем антиоксидантной защиты и врожденного иммунитета.

Заключение

Включение 5,0...1,0 % протеиновой муки из личинок чёрной львинки (*Hermetia illucens*) в состав комбикормов для растущего молодняка свиней способствует повышению интенсивности роста и улучшению мясной продуктивности.

Проведенный анализ экспрессии генов показал, что на молекулярном уровне инсектопротеин вызывает тканеспецифичные изменения:

В печени наблюдается значительная активация экспрессии генов иммунного ответа (*IL-6*, *IL-8*) и ферментов антиоксидантной защиты (*CAT*, *SOD*, *GR*), что свидетельствует об адаптации метаболической и защитной функции органа.

В длиннейшей мышце спины повышение экспрессии генов антиоксидантных ферментов (*CAT*, *SOD*, *GST*) и маркера биогенеза митохондрий (*TFAM*) коррелирует с увеличением продуктивности, что

указывает на интенсификацию метаболических процессов в мышечной ткани.

Реакция тканей слепой кишки носит более сложный характер, сочетая активацию локальных иммунных факторов (*IL-8*) с угнетением глутатионовой системы, что требует дальнейшего изучения в контексте взаимодействия с микробиотой.

Полученные результаты расширяют понимание механизмов действия кормовых добавок нового поколения и обосновывают использование муки из чёрной львинки в качестве перспективного функционального компонента в рационах свиней.

Литература

1. The effects of partially replacing animal protein sources with full fat black soldier fly larvae meal (*Hermetia illucens*) in nursery diets on growth performance, gut morphology, and immune response of pigs / M. Crosbie, C. Zhu, A.K. Shoveller, et al. // *Translational Animal Science*. 2021. Vol. 5. No. 2. P. txab057.
2. Hong J., Han T., Kim Y.Y. Mealworm (*Tenebrio molitor* Larvae) as an alternative protein source for monogastric animal: A review // *Animals*. 2020. Vol. 10. No. 11. P. 2068.
3. Gasco L., Józefiak A., Henry M. Beyond the protein concept: health aspects of using edible insects on animals // *Advancement of insects as food and feed in a circular economy*. Wageningen: Wageningen Academic. 2024. P. 373-422.
4. Longitudinal assessment of DNA repair signature trajectory in prodromal versus established Parkinson's disease / D. Anwer, S. Cofta, L. Schmitz et al. // *Parkinson's Disease*. 2025. Vol. 11. No. 1. P. 349.
5. Tykałowski B., Stenzel T., Koncicki A. The impact of full-fat *Hermetia illucens* larvae meal on the health and immune system function of broiler chickens // *Journal of Veterinary Research*. 2023. Vol. 67. No. 2. P. 197-207. DOI: 10.2478/jvetres-2023-0022.
6. *Hermetia illucens* larvae as a potential dietary protein source altered the microbiota and modulated mucosal immune status in the colon of finishing pigs / M.Y u, Z. Li, W. Chen, et.al. // *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2019. Vol. 10. P. 50. doi: 10.1186/s40104-019-0358-1.
7. Tryon L.D., Crilly M.J., Hood D.A. Effect of denervation on the regulation of mitochondrial transcription factor A expression in skeletal muscle // *American Journal of Physiology - Cell Physiology*. 2015. Vol. 309. No. 4. P. C228-C238. doi: 10.1152/ajpcell.00266.2014.
8. Effect of flaxseed oil on muscle protein loss and carbohydrate oxidation impairment in a pig model after lipopolysaccharide challenge / P. Kang, J. Wang, Z. Fang et al. // *British Journal of Nutrition*. 2020. Vol. 123. No. 8. P. 859-869.
9. Tissue-specific responses of antioxidant pathways to poor hygiene conditions in growing pigs divergently selected for feed efficiency / K. Sierżant, K. Perz, D. Wojtysiak et al. // *BMC Veterinary Research*. 2019. Vol. 15. No. 1. P. 341.
10. Dietary supplementation with inosine-5'-monophosphate improves the functional, energetic, and antioxidant status of liver and muscle growth in pigs / L.P. Bonagurio, A.E. Murakami, C.A. Moreira, et.al. // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 350. DOI: 10.1038/s41598-021-04023-y.
11. Use of *Hermetia illucens* larvae as a dietary protein source: Effects on growth performance, carcass traits, and meat quality in finishing pigs / M. Yu, Z. Li, W. Chen, et.al. // *Meat Science*. 2019. Vol. 158. P. 107837. doi: 10.1016/j.meatsci.2019.107837.
12. Black soldier fly larval meal in feed enhances growth performance, carcass yield and meat quality of finishing pigs / S.Y. Chia, C.M. Tanga, I.M. Osuga, et al. // *Journal of Insects as Food and Feed*. 2021. Vol. 7. No. 4. P. 433-448.
13. Effect of *Tenebrio molitor* larvae meal on the antioxidant status and stress response pathways in tissues of growing pigs / R. Ringseis, L. Peter, D.K. Gessner, et.al. // *Archives of Animal Nutrition*. 2021. Vol. 75. No. 4. P. 237-250. doi: 10.1080/1745039X.2021.1950106.
14. Partial replacement of soyabean meal with defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal influences blood biochemistry and modulate oxidative stress, but not growth performance of pigs / G. Yordanova, R.D. Nedeva, A.P. Apostolov, et.al. // *Animals*. 2025. Vol. 15. No. 8. P. 1077.
15. Dietary *Hermetia illucens* larvae meal improves growth performance and intestinal barrier function of weaned pigs under the environment of enterotoxigenic *Escherichia coli* K88 / Q. Tang, E. Xu, Z. Wang, et.al. // *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 8. P. 812011.
16. Invited review: contractile activity-induced mitochondrial biogenesis in skeletal muscle / D.A. Hood // *Journal of Applied Physiology*. 2001. Vol. 90. No. 3. P. 1137-1157. doi: 10.1152/jappl.2001.90.3.1137
17. *Tenebrio molitor* larvae meal affects the cecal microbiota of growing pigs / S. Meyer, D.K. Gessner, G. Maheshwari, et.al. // *Animals*. 2020. Vol. 10. No. 7. P. 1151. doi: 10.3390/ani10071151
18. Effects of dietary *Hermetia illucens* meal inclusion on cecal microbiota and small intestinal mucin dynamics and infiltration with immune cells of weaned piglets / I. Biasato, I. Ferrocino, E. Colombino, et.al. // *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2020. Vol. 11. No. 1. P. 64.
19. *Hermetia illucens* Larvae Meal Enhances Colonic Antimicrobial Peptide Expression by Promoting Histone Acetylation in Weaned Piglets Challenged with ETEC in Pig Housing / Q. Tang, G. Wu, W. Xu, et.al. // *Animals*. 2025. Vol. 16. No. 1. P. 118. doi: 10.3390/ani16010118
20. Hepatic anti-oxidative genes *CAT* and *GPX4* are epigenetically modulated by RORy/NRF2 in alphacoronavirus-exposed piglets / H. Gu, Y. Liu, Y. Zhao, et.al. // *Antioxidants*. 2023. Vol. 12. No. 6. P. 1305. doi: 10.3390/antiox12061305.

References

1. The effects of partially replacing animal protein sources with full fat black soldier fly larvae meal

(*Hermetia illucens*) in nursery diets on growth performance, gut morphology, and immune response of pigs / M. Crosbie, C. Zhu, A.K. Shoveller, et al. // *Translational Animal Science*. 2021. Vol. 5. No. 2. P. txab057.

2. Hong J., Han T., Kim Y.Y. Mealworm (*Tenebrio molitor* Larvae) as an alternative protein source for monogastric animals: A review // *Animals*. 2020. Vol. 10. No. 11. P. 2068.

3. Gasco L., Józefiak A., Henry M. Beyond the protein concept: health aspects of using edible insects on animals // *Advancement of insects as food and feed in a circular economy*. Wageningen: Wageningen Academic. 2024. P. 373-422.

4. Longitudinal assessment of DNA repair signature trajectory in prodromal versus established Parkinson's disease / D. Anwer, S. Cofta, L. Schmitz et al. // *Parkinson's Disease*. 2025. Vol. 11.No. 1. P. 349.

5. Tykałowski B., Stenzel T., Koncicki A. The impact of full-fat *Hermetia illucens* larvae meal on the health and immune system function of broiler chickens // *Journal of Veterinary Research*. 2023. Vol. 67.No. 2. P. 197-207. DOI: 10.2478/jvetres-2023-0022

6. *Hermetia illucens* larvae as a potential dietary protein source altered the microbiota and modulated mucosal immune status in the colon of finishing pigs / M.Yu, Z. Li, W. Chen, et.al. // *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2019. Vol. 10. P. 50. doi: 10.1186/s40104-019-0358-1

7. Tryon L.D., Crilly M.J., Hood D.A. Effect of denervation on the regulation of mitochondrial transcription factor A expression in skeletal muscle // *American Journal of Physiology - Cell Physiology*. 2015. Vol. 309.No. 4. P. C228-C238. doi: 10.1152/ajpcell.00266.2014

8. Effect of flaxseed oil on muscle protein loss and carbohydrate oxidation impairment in a pig model after lipopolysaccharide challenge / P. Kang, J. Wang, Z. Fang et al. // *British Journal of Nutrition*. 2020. Vol. 123.No. 8. P. 859-869.

9. Tissue-specific responses of antioxidant pathways to poor hygiene conditions in growing pigs divergently selected for feed efficiency / K. Sierżant, K. Perz, D. Wojtysiak et al. // *BMC Veterinary Research*. 2019. Vol. 15.No. 1. P. 341.

10. Dietary supplementation with inosine-5'-monophosphate improves the functional, energetic, and antioxidant status of liver and muscle growth in pigs / L.P. Bonagurio, A.E. Murakami, C.A. Moreira, et al. // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12.No. 1. P. 350. DOI: 10.1038/s41598-021-04023-y

11. Use of *Hermetia illucens* larvae as a dietary protein source: Effects on growth performance, carcass traits, and meat quality in finishing pigs / M. Yu, Z. Li, W. Chen, et.al. // *Meat Science*. 2019. Vol. 158. P. 107837. doi: 10.1016/j.meatsci.2019.107837

12. Black soldier fly larval meal in feed enhances growth performance, carcass yield and meat quality of finishing pigs / S.Y. Chia, C.M. Tanga, I.M. Osuga, et al. // *Journal of Insects as Food and Feed*. 2021. Vol. 7.No. 4. P. 433-448.

13. Effect of *Tenebrio molitor* larvae meal on the antioxidant status and stress response pathways in tissues of growing pigs / R.Ringseis, L.Peter, D.K.Gessner, et.al. // *Archives of Animal Nutrition*. 2021. Vol. 75.No. 4. P. 237-250. doi: 10.1080/1745039X.2021.1950106

14. Partial replacement of soyabean meal with defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal influences blood biochemistry and modulate oxidative stress, but not growth performance of pigs / G. Yordanova, R.D. Nedeva, A.P. Apostolov, et al. // *Animals*. 2025. Vol. 15.No. 8. P. 1077.

15. Dietary *Hermetia illucens* larvae meal improves growth performance and intestinal barrier function of weaned pigs under the environment of enterotoxigenic *Escherichia coli* K88 / Q. Tang, E. Xu, Z. Wang, et.al. // *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 8. P. 812011

16. Invited review: contractile activity-induced mitochondrial biogenesis in skeletal muscle / D.A. Hood // *Journal of Applied Physiology*. 2001. Vol. 90.No. 3. P. 1137-1157. doi: 10.1152/jappl.2001.90.3.1137

17. *Tenebrio molitor* larvae meal affects the cecal microbiota of growing pigs / S. Meyer, D.K. Gessner, G. Maheshwari, et.al. // *Animals*. 2020. Vol. 10.No. 7. P. 1151. doi: 10.3390/ani10071151

18. Effects of dietary *Hermetia illucens* meal inclusion on cecal microbiota and small intestinal mucin dynamics and infiltration with immune cells of weaned piglets / I. Biasato, I. Ferrocino, E. Colombino, et.al. // *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2020. Vol. 11.No. 1. P. 64.

19. *Hermetia illucens* Larvae Meal Enhances Colonic Antimicrobial Peptide Expression by Promoting Histone Acetylation in Weaned Piglets Challenged with ETEC in Pig Housing / Q. Tang, G. Wu, W. Xu, et.al. // *Animals*. 2025. Vol. 16.No. 1. P. 118. doi: 10.3390/ani16010118

20. Hepatic anti-oxidative genes CAT and GPX4 are epigenetically modulated by RORγ/NRF2 in alphacoronavirus-exposed piglets / H. Gu, Y. Liu, Y. Zhao, et.al. // *Antioxidants*. 2023. Vol. 12.No. 6. P. 1305. doi: 10.3390/antiox12061305