

ВЕТЕРИНАРИЯ И ЗООТЕХНИЯ VETERINARY MEDICINE AND ANIMAL SCIENCE

Научная статья

УДК 636.52/.58:612.3:633.34

doi: 10.34655/bgsha.2025.80.3.003

Механизмы адаптации метаболизма цыплят-бройлеров к продуктам переработки сои

Светлана Владимировна Карамушкина¹, Владимир Георгиевич Вертипрахов²

^{1,2}Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Россия

¹sveta.vetmed@mail.ru

Аннотация. Роль трипсина, секретируемого поджелудочной железой, выходит за рамки пищеварительной функции, включая участие в регуляции метаболизма. Трипсин обладает свойствами гормоноподобного вещества, активируя протеазо-активируемые рецепторы (PAR) в различных органах и тканях. Панкреатические ферменты (амилаза, липаза, трипсин) выделяются в кишечник для гидролиза нутриентов и циркулируют в крови, поддерживая концентрацию в физиологических пределах. Вопросы их роли в адаптации к рациону остаются недостаточно изученными. В хронических экспериментах на цыплятах-бройлерах (*Gallus gallus* L.) с дуоденальной фистулой впервые оценена роль трипсина в адаптации пищеварения и метаболизма к соевым продуктам: шроту (19,05% рациона), бобам (25,60%) и экструдированной сое (25,20%). Анализ активности трипсина в дуоденальном химусе и сыворотке крови показал, что замена шрота на бобы снижает активность трипсина в химусе на 60,0% ($p < 0,05$) через 60 мин и на 56,6% ($p < 0,05$) через 120 мин, а в крови — на 26,8% ($p < 0,05$); экструдированная соя увеличивает активность в крови на 43,0% ($p < 0,05$). Активность липазы при использовании бобов возрастает в химусе на 217,3% ($p < 0,05$) через 60 мин, а экструдированной сои — на 145,0% ($p < 0,05$). Установлено, что замена соевого шрота на соевые бобы или экструдированную сою существенно влияет на секреторную функцию поджелудочной железы и липидно-протеиновый обмен. Результаты подтверждают гипотезу о регуляции панкреатической секреции по принципу обратной связи и подчеркивают важность учета вкусовых и питательных свойств соевых продуктов при разработке рационов для оптимизации продуктивности и здоровья птицы.

Ключевые слова: цыплята-бройлеры, дуоденальная фистула, вкусовые ощущения у птиц, питательность кормов *in vivo*, соя и продукты её переработки.

Mechanisms of metabolism adaptation of broiler chickens to soybean derivatives**Svetlana V. Karamushkina¹, Vladimir G. Vertiprakhov²**^{1,2}Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia¹sveta.vetmed@mail.ru

Abstract. The role of trypsin secreted by the pancreas extends beyond its digestive function, encompassing the regulation of metabolism. Trypsin exhibits hormone-like properties, activating protease-activated receptors (PARs) within various organs and tissues. The primary pancreatic enzymes (amylase, lipase and trypsin) are secreted into the intestine to hydrolyze dietary nutrients and to enter the bloodstream, where their concentration is maintained within specific limits under normal physiological conditions. However, the role of digestive enzymes during dietary adaptation remains understudied. In chronic experiments with broiler chickens (*Gallus gallus* L.) with a duodenal fistula, the role of trypsin in the adaptation of digestion and metabolism to soybean products was assessed for the first time: grist (19.05 % of the diet), beans (25.60 %) and extruded soy (25.20 %). Analysis of trypsin activity in duodenal chyme and blood serum showed that grist replacement to beans reduced trypsin activity in chyme by 60.0% ($p<0.05$) after 60 min and by 56.6% ($p<0.05$) after 120 min, and in blood – by 26.8% ($p<0.05$); extruded soy increased activity in blood by 43.0% ($p<0.05$). Lipase activity increased in chyme by 217.3% ($p<0.05$) after 60 min when using beans, and by 145.0% ($p<0.05$) when using extruded soybeans. Replacing soybean grist with beans or extruded soybeans notably affected the secretory function of the pancreas and lipid-protein metabolism. The results underscored the importance of considering the taste and nutritional properties of soybean feed in developing poultry diet, potentially enhancing their productivity and health as well as they proved the inference concerning pancreatic secretion regulation according to the feedback principle. These results hold practical significance for further studies on adaptation mechanisms in poultry.

Keywords: broiler chickens, duodenal fistula, taste sensations in birds, *in vivo* nutrient value of feeds, soybean and its products.

Введение. Поджелудочная железа, секретирующая пищеварительные ферменты и гормоны, регулирует переваривание макронутриентов и таким образом управляет метаболизмом, обеспечивая энергетический гомеостаз. Она отвечает за преобразование потребляемой пищи в энергию для клеток. Фермент трипсин, выделяемый поджелудочной железой, участвует в гидролизе белковой компоненты пищи. В научной литературе имеются данные о роли трипсина как гормоноподобного вещества в нейрогуморальной регуляции пищеварительных процессов наряду с гормонами (секретином и холецистокинином) [1]. На сегодняшний день считается установленным фактом, что основные ферменты поджелудочной железы (амилаза, липаза и трипсин) не только выделяются в кишечник в составе панкре-

реатического сока и гидролизуют нутриенты диеты, но и проникают в кровь. Они постоянно циркулируют в кровотоке, и при нормальных физиологических условиях их концентрация в крови поддерживается в определенных пределах [2–4]. В последние годы исследования в этом направлении получили значительное развитие в области физиологии и патофизиологии [5]. Соя и ее побочные продукты отличаются от других кормовых культур высоким содержанием белка и жиров, а также наличием ингибиторов ферментов и других антипитательных веществ, снижающих гидролиз питательных веществ корма и их усвояемость организмом животных и птицы [6]. Высокое содержание белков и жиров в сое и ее переработанных продуктах не может не влиять на липидно-протеиновый обмен, на основании чего со-

евые продукты были выбраны в качестве компонентов корма для определения адаптации. В связи с выводением нового кросса цыплят-бройлеров «Смена 9» и необходимостью его адаптации к условиям промышленного содержания изучение особенностей метаболизма этой птицы приобретает особую актуальность.

Вопросы адаптации к рациону с участием пищеварительных ферментов в крови остаются недостаточно изученными. Для этой цели в хронических экспериментах на курах с фистулой были проведены исследования с целью определения участия дуоденальных ферментов в адаптации пищеварения к различным соевым продуктам параллельно в кишечной химе и сыворотке крови.

Цель исследования – оценить активность ферментов дуоденального химуса и крови цыплят-бройлеров для определения критериев адаптационных процессов пищеварения и обмена веществ при введении в рацион соевых продуктов.

Полученные знания позволяют объективно оценивать интенсивность приспособительных процессов в желудочно-кишечном тракте птицы при смене рациона и применять меры по коррекции ферментативной недостаточности.

Условия, материалы и методы. Исследование проводили на базе научной лаборатории кафедры физиологии, этологии и биохимии животных Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева в 2024–2025 гг.

Для проведения исследования была проведена операция по вживлению канюли в 12-перстную кишку у 20 голов цыплят-бройлеров 15-суточного возраста с целью получения дуоденального содержимого [7]. После хирургического вмешательства птице обеспечивали доступ к воде в течение 16...18 ч, исключая кормление. Физиологические опыты начинали через 3...5 суток после операции, после полного восстановления здоровья птицы.

Методом аналогов было сформировано три группы цыплят-бройлеров по 5 голов в каждой. Первая группа (конт-

рольная) получала основной рацион (ОР) с содержанием соевого шрота 19,05 % от массы корма. Во второй опытной группе соевый шрот был заменен соевыми бобами (25,60 % от массы корма), а в третьей опытной группе в качестве добавки использовали экструдированную сою (25,20 % от массы корма). Все соевые добавки вводили из расчета норм сырого протеина в рационах цыплят-бройлеров. Питательность (сырой протеин 19,50%, сырой жир – 9,70%, сырая клетчатка 4,80%) и обменную энергию (310 ккал/100 г) рационов поддерживали на одном уровне (табл. 1) [8]. Продолжительность эксперимента составляла 7...10 суток. Физиологические опыты проводили ежедневно утром натощак после 12-часовой голодной диеты. Цыплята-бройлеры получали корм в количестве 30 г на голову. Через 60 и 120 минут после кормления отбирали пробы дуоденального содержимого в пробирки типа эппендорф объемом 1,0 мл. Затем пробы центрифугировали при 7000 об./мин. в течение 5 мин., после чего надосадочную жидкость разводили физиологическим раствором в соотношении 1:10 для проведения биохимического анализа.

В дуоденальном химусе определяли активность ферментов – панкреатической амилазы, липазы и щелочной фосфатазы, а также содержание триглицеридов. Анализ проводили на полуавтоматическом биохимическом анализаторе BS-3000M («Sinnova», КНР) с использованием наборов биохимических реагентов для ветеринарии «ДиаВетТест» (ООО «ДИА-ВЕТ», Россия). Активность трипсина определяли по методу [7] с использованием хромогенного субстрата – N-б-бензоил-аргинин-п-нитроанилид (БАПНА).

По завершении каждой из трех серий опытов проводили биохимический анализ крови, взятой из подкрыльцовой вены в утренние часы натощак. Кровь собирали в пробирки с активатором свертывания, затем центрифугировали при 3500 об/мин в течение 5 мин. Биохимические показатели в сыворотке крови определяли на автоматическом биохимическом анализа-

Таблица 1 – Состав рациона цыплят-бройлеров

Ингредиент, %	Группа		
	1-я контрольная	2-я опытная	3-я опытная
Пшеница	42,87	38,58	43,77
Кукуруза	18,30	18,00	13,21
Шрот соевый 46 % СП	19,05		
Соевые бобы СП36 СЖ18		25,60	
Соя экстрадированная СП36 СЖ18			25,20
Шрот подсолнечный СП 36 % СК 19 %	10,00	10,00	10
Масло подсолнечное	5,70	3,80	3,80
Монохлоргидрат лизина 98 %	0,43	0,40	0,42
DL-метионин	0,34	0,32	0,32
L-треонин	0,16	0,16	0,16
Монокальцийфосфат (МКФ)	1,15	1,10	1,11
Соль поваренная	0,20	0,20	0,20
Известняковая мука	0,87	0,92	0,89
Сульфат натрия безводный	0,12	0,12	0,12
Сода пищевая	0,13	0,12	0,12
Холин-хлорид 60 %	0,18	0,18	0,18
Вит-минеральный премикс	0,5	0,5	0,5

торе BioChem FC-120 («High Technology, Inc.», США) с использованием наборов реактивов от производителя прибора.

Для оценки связи между активностью ферментов (трипсин, липаза и щелочная фосфатаза) в крови и дуоденальном химусе цыплят-бройлеров использовался статистический анализ корреляции. Поскольку данные не предполагали нормального распределения, применялся непараметрический метод – корреляция Спирмена. Анализ проводился для сравнения показателей активности ферментов в крови, взятой однократно, с данными химуса, собранного в два временных интервала: через 60 и 120 минут после кормления соевыми рационами (шрот, соя, экстрадированная соя). Коэффициент корреляции Спирмена (r) и соответствующее p -значение вычислялись с использованием специализированного программного обеспечения на языке Python с библиотекой SciPy. Уровень статистической значимости устанавливался на $p < 0.05$.

Результаты и обсуждение. Ферментативный состав пищеварительных соков является важным показателем адаптации пищеварительной системы цыплят-бройлеров к составу рациона.

Разработанная методика получения дуоденального содержимого позволила оценить активность панкреатических ферментов, поскольку фистула располагалась в непосредственной близости от места впадения панкреатических и желчных протоков [7].

Анализируя данные таблицы 2, можно отметить, что наибольшую активность трипсина через 60 мин. после кормления наблюдали у цыплят, получавших соевый шрот, она составила $1530 \pm 58,9$ ед/л. Использование соевых бобов и экстрадированной сои приводило к снижению активности трипсина на 60,0 ($p < 0,05$) и 45,7 % ($p < 0,05$) соответственно, по сравнению с соевым шротом (табл. 2). Полученные данные свидетельствуют о большей вкусовой привлекательности соевого шрота для птицы, по сравнению с соевыми бобами и экстрадированной соей.

Высокий уровень трипсина в дуоденальном химусе на 60 и 120 минутах постпрандиального периода свидетельствует о значительной биологической активности белка в добавке. Значительный уровень трипсина в сыворотке крови указывает на максимальный анаболический эффект [9]. Из рисунка 1 видно, что белковая ценность продукта не всегда совпа-

Таблица 2 – Биохимические показатели дуоденального химуса цыплят-бройлеров при добавлении в их рацион различных продуктов переработки сои ($M \pm m$)

Показатель	Группа					
	1-я контрольная		2-я опытная		3-я опытная	
	60 мин	120 мин	60 мин	120 мин	60 мин	120 мин
Трипсин, Ед/л	1530,0±58,9	2092,0±136,3 ^b	611,0±40,5 ^a	909,0±55,2 ^{ab}	831,0±52,7 ^a	1237,0±103,3 ^{ab}
Щелочная фосфатаза, Ед/л	5025,0±139,1	5045,0±160,6	4194,0±265,7 ^a	2621,0±131,5 ^{ab}	5201,0±187,2	3256,0±105,5 ^{ab}
ЩФ/Трипсин	3,28	2,41	6,86	2,88	6,26	2,63
Липаза, Ед/л	191,0±7,7	343,0±33,3 ^b	606,0±34,4 ^a	431,0±40,5 ^{ab}	468,0±45,8 ^a	599,0±37,9 ^{ab}
Триглицериды	4,61±0,02	4,69±0,06	4,63±0,22	4,39±0,05	4,71±0,07	4,55±0,09

Примечание: а – различия с 1 контрольной группой статистически значимо, при $p < 0,05$; b – различия статистически значимы между первым и вторым часом в пределах каждой группы при $p < 0,05$

дает с доступностью усвоения в организме животного, что, по-видимому, связано

с методом технологической обработки соевых бобов.

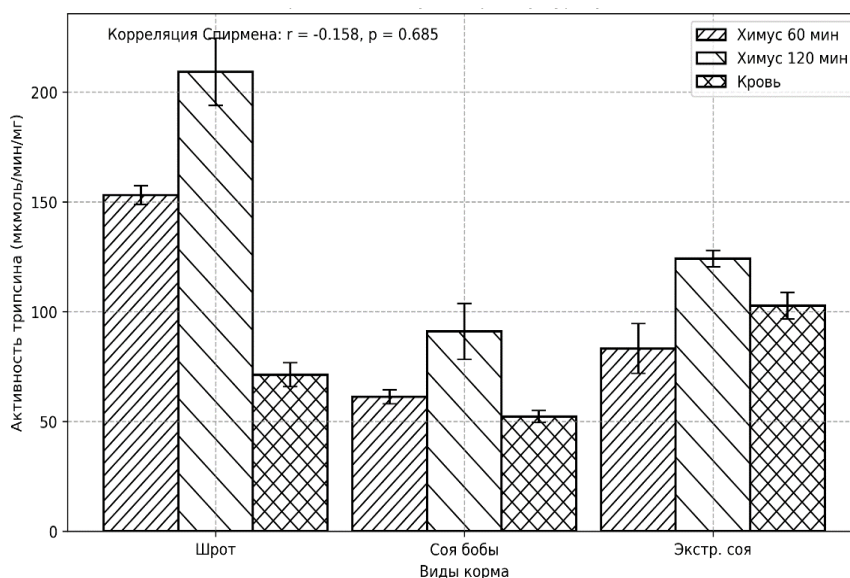


Рисунок 1. Активность трипсина в различных биологических средах (дуоденальный химус и кровь)

Это подтверждается результатами корреляционного анализа, который показал, что связь между активностью трипсина в дуоденальном химусе через 60 минут после кормления и кровью при использовании в рационе добавки соевого шрота составляет $r = -0,333$ (устойчивая обратная, но не стабильно значимая, $p = 0,420$). Напротив, наиболее слабая прямая связь отмечена при использовании соевых бобов в рационе цыплят-бройлеров ($r = 0,262$, $p = 0,531$) и экструдиро-

ванных соевых бобов ($r = 0,286$, $p = 0,493$) (рис. 4). Результаты исследований липолитической активности в дуоденальном химусе свидетельствуют о том, что по количеству липидов, оставшихся после переработки в экструдированной сое и соевых бобах, фермент липаза адаптируется к липидам и показывает более высокий результат, чем при использовании соевого шрота (рис. 2).

Фермент липаза имел устойчивую прямую зависимость при использовании в

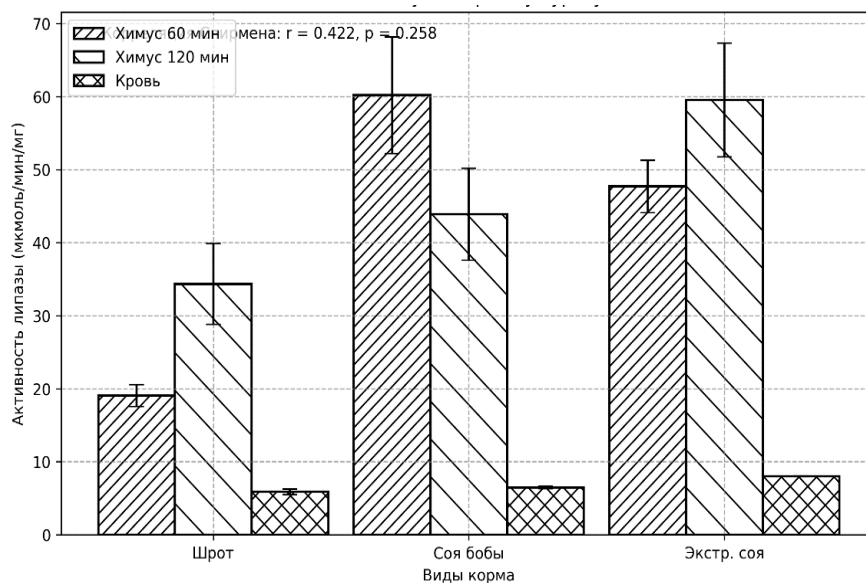


Рисунок 2. Активность липазы в различных биологических средах (дуоденальный химус и кровь)

рационе соевого шрота и замене его соевыми бобами через 60 минут после кормления от активности фермента в крови, соответственно, $r=0,310$, $p=0,456$, $r=0,357$, $p=0,385$ (рис. 4). Через 120 минут после употребления соевой муки или соевых бобов наблюдался аналогичный результат, соответственно, $r=0,333$, $p=0,420$ и $r=0,333$, $p=0,420$ (рис. 4).

В щелочной фосфатазе (рис. 3) при использовании в рационе добавки соево-

го шрота через 60 минут после кормления была установлена устойчивая прямая корреляция с активностью фермента в крови ($r = 0,381$, $p = 0,352$), напротив, между ферментами в дуоденальном химусе (60 минут) и крови ($r = -0,762$, $p = 0,028$) при добавлении сои обнаружена устойчивая обратная корреляция (рис. 4), соответственно $r = 0,690$, $p = 0,058$ (соевый шрот) и $r = -0,190$, $p = 0,651$ (соевые бобы) (рис. 4).

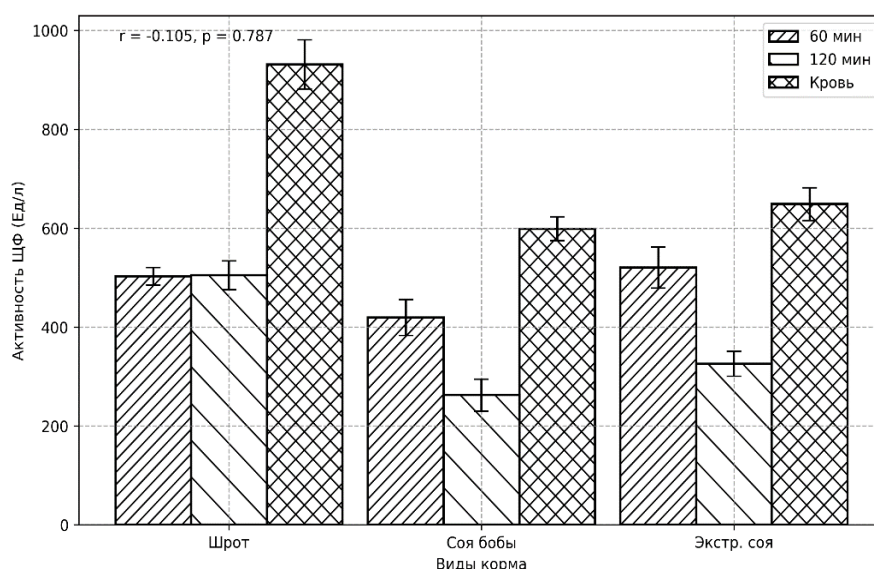


Рисунок 3. Активность щелочной фосфатазы в дуоденальном химусе и сыворотке крови цыплят-бройлеров при использовании в рационе различных соевых продуктов

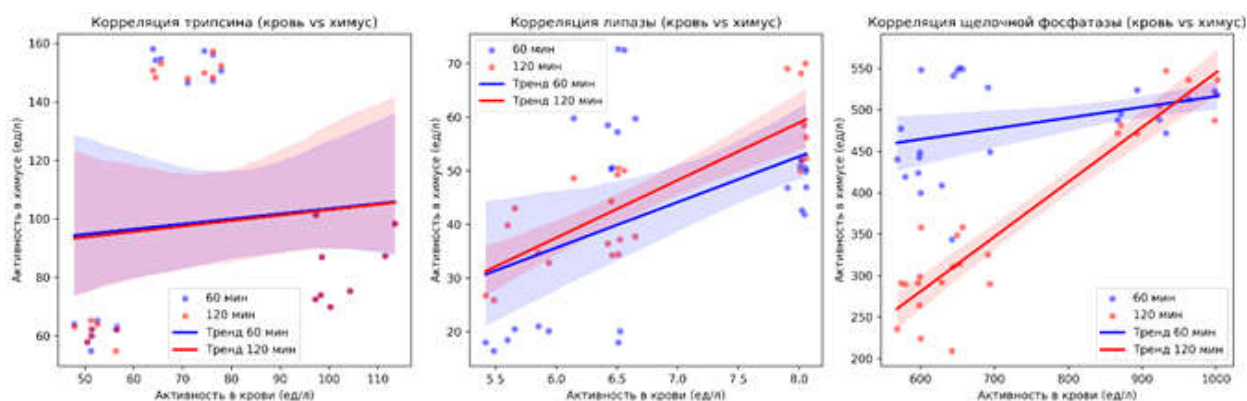


Рисунок 4. Корреляция Спирмена между показателями крови и дуоденального химуса, взятого через 60 и 120 минут после кормления у цыплят-бройлеров

Обсуждение результатов. Вопросы адаптации пищеварения к составу рациона обсуждаются в научной литературе уже более века [10-12]. Однако результаты острых экспериментов на животных не позволяют в полной мере раскрыть механизм действия различных добавок на секреторную функцию поджелудочной железы и активность дуоденальных ферментов. Результаты исследований, проведенных ранее на цыплятах с хронической фистулой протока поджелудочной железы, свидетельствуют о том, что даже при незначительном (0,5 %) увеличении сырого протеина в рационе активность протеаз повышается на 28,1 % ($p < 0,05$) [13]. Регуляция панкреатической секреции Принцип обратной связи был открыт французскими учеными на крысах в прошлом веке [14] и дополнен результатами исследований на петушках с данными о том, что в постпрандиальной фазе трипсин в кишечнике выделяется параллельно с активностью фермента в сыворотке крови и коррелирует с метаболитами оксида азота, участвуя в регуляции метаболизма через вегетативную нервную систему [15,16]. Результаты исследований на цыплятах-бройлерах подтверждают участие ферментов двенадцатиперстной кишки в регуляции пищеварения и обмена веществ у птицы при замене белковых компонентов корма в рационе. В работе впервые с использованием современных статистических методов оценки изучен механизм влияния сои на обмен веществ и показано участие в адапционных про-

цессах не только активности трипсина, но и липазы, и щелочной фосфатазы. Новизна работы заключается в использовании оценки вкусовых и питательных свойств компонентов корма [17], что подчеркивает роль поджелудочной железы у животных в регуляции обмена веществ на уровне пищеварения, которое, благодаря панкреатическим ферментам, запускает промежуточный обмен, что проявляется в корреляции между активностью ферментов в кишечнике и крови у птицы [18-19]. Установлено, что вкусовые ощущения и пищевая ценность, пищеварительная функция и усвоение организмом питательных веществ не всегда согласованы в разных соевых продуктах. Особенно четко обратная корреляция прослеживается в активности трипсина при использовании соевого шрота, что подтверждает гипотезу о регуляции панкреатической секреции по принципу обратной связи.

Выводы. 1. Замена соевого шрота на соевые бобы снижает активность трипсина в кишечнике на 60,0% ($p < 0,05$) через 60 минут и на 56,6% ($p < 0,05$) через 120 минут, а в крови – на 26,8% ($p < 0,05$); экструдированная соя увеличивает активность в крови на 43,0% ($p < 0,05$).

2. Активность щелочной фосфатазы при замене шрота на бобы снижается в кишечнике на 16,5–48,0% ($p < 0,05$) и в крови на 35,7% ($p < 0,05$), при использовании экструдированной сои – на 30,3% ($p < 0,05$) через 120 минут.

3. Активность липазы при замене шрота на бобы возрастает в кишечнике на

217,3% ($p < 0,05$) через 60 минут и на 25,6% ($p < 0,05$) через 120 минут, а при экстрадированной сое – на 145,0% и 74,6% ($p < 0,05$) соответственно, в крови – на 10,2–37,3% ($p < 0,05$).

4. Корреляция активности трипсина между химусом и кровью варьируется (r от -0,333 до 0,357, $p > 0,05$), указывая на неоднородность адаптации.

5. Соевые продукты влияют на секреторную функцию поджелудочной железы, подтверждая гипотезу о регуляции по принципу обратной связи.

Соблюдение этических стандартов. Все исследования на птице выполняли, руководствуясь требованиями гуманного отношения к животным (Европейская конвенция о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (ETS № 123) (Страсбург 18.03.1986) с применением седативных и обезболивающих средств. Для выполнения экспериментов было получено разрешение комиссии по биоэтике РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (протокол № 3 от 07.04.2023).

Список источников

1. Peach C., Edgington-Mitchell L., Bunnett N. & Schmidt B. Protease-Activated Receptors in Health and Disease // *Physiological reviews*. 2022. No 103(1). Pp. 717-785. doi: 10.1152/physrev.00044.2021.
2. Rothman S, Leibow C, Isenman L. Conservation of digestive enzymes. // *Physiological reviews*. 2002; No 82(1):1–18. doi: 10.1152/physrev.00022.2001
3. Коротько Г.Ф. Рециркуляция ферментов пищеварительных желез // *Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии*. 2011. Т. 21, № 4. С. 14-21. EDN: OCBMTB
4. Kuzmina I.V., Tolpygo S.M., Kotov A.V., Shoibonov B.B., Zamolodchikova T.S., Ovchinnikova N.V. Intestinal digestion in poultry compared to other animal species with a diverse diet // *Front. Physiol*. 2024. Vol.15. 1358524. doi: 10.3389/fphys.2024.1358524
5. Hu C., Chen Y., Yin X., Xu R., Yin C., Wang C., & Zhao Y. Pancreatic endocrine and exocrine signaling and crosstalk in physiological and pathological status. // *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 2025. 10. Article number 39. doi: 10.1038/s41392-024-02098-3
6. Cao Y., Lu J. & Cai G. (2023). Quality improvement of soybean meal by yeast fermentation: based on the degradation of anti-nutritional factors and accumulation of beneficial metabolites // *Journal of the science of food and agriculture*. 2023. 104(3). doi: 10.1002/jsfa.13041
7. Вертипрахов В.Г. Физиология кишечного пищеварения у кур (экспериментальный подход). Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2022. 175 с.
8. Руководство по оптимизации рецептов комбикормов для сельскохозяйственной птицы / В.И. Фисинин, И.А. Егоров, Т.Н. Ленкова [и др.]. 2-е изд., дораб. и доп. Сергиев Посад: Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства, 2014. 155 с. EDN QZCXBY.
9. Вертипрахов В.Г., Селёнова М.И., Малородов В.В. Трипсин как новый маркер метаболизма у животных // *Тимирязевский биологический журнал*. 2023. № 1. С. 53–58. doi: 10.26897/2949-4710-2023-1-53-58. EDN: SHJLSJ
10. Initial assessment of protein and amino acid digestive dynamics in protein-rich feedstuffs for broiler chickens / M. Toghyani, L. McQuade, B. McInerney, A. Moss, P. Selle & S. Liu // *PLoS ONE*. 2020. 15. doi: 10.1371/journal.pone.0239156.
11. Effect of bioactive casein peptides on productivity, nutrient digestibility, enzyme activity and gut microbial population in broiler chickens / R. Mokhtari, M.K. Fard, M. Rezaei, E. Dirende // *Journal of Animal Physiology and Nutrition*. 2024. Vol. 108, No 6. Pp. 1798-1806. doi: 10.1111/jpn.14021
12. Effects of fermented soybean meal, probiotics and organic acids on intestinal morphology, pH and microbial count in broilers / R. Supriya, B. Chacko, P. Anitha, C. Suja & P. Priya // *Journal of Veterinary and Animal Sciences*. 2022. Vol. 53. Issue 3. Pp. 348-355. doi: 10.51966/jvas.2022.53.3.348-355
13. Exocrine Pancreatic Function Modulates Plasma Metabolites Through Changes in Gut Microbiota Composition / M. Pietzner, K. Budde, M. Röhlemann, H. Völzke, G. Homuth, F. Weiss, M. Lerch & F. Frost // *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*. 2021. 106, e2290 - e2298. doi: 10.1210/clinem/dgaa961.
14. McGuckin E., Cade J. & Hanison J. The pancreas // *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*. 2020. Vol. 21. Issue 11. Pp. 531-614. doi: 10.1016/j.mpaic.2020.08.005.
15. Effects of gradual differences in trypsin inhibitor activity on the estimation of digestible amino acids in soybean expellers for broiler chickens / S. Kuenz, S. Thurner, D. Hoffmann, K. Kraft, M. Wiltafsky-Martin, K. Damme, W. Windisch & D. Brugger // *Poultry Science*. 2022. Vol.101. Issue 4. 101740101. doi: 10.1016/j.psj.2022.101740.

16. Growth performance and amino acid digestibility responses of broiler chickens fed diets containing purified soybean trypsin inhibitor and supplemented with a monocomponent protease / A. Aderibigbe, A. Cowieson, J. Sorbara, G. Pappenberger & O. Adeola // *Poultry Science*. 2020. 99 (10). Pp. 5007 - 5017. doi:10.1016/j.psj.2020.06.051
17. Вертипрахов В.Г., Полина С.И., Сергеевкова Н.А. и др. Способ оценки вкусовых и питательных свойств корма у птицы: патент № 2821592 С1 Рос. Федерация, МПК А23К 10/00, G01N 33/50. № 2023131963; заявл. 05.12.2023; опубл. 25.06.2024.
18. Update on the sense of taste in chickens: a more evolved system than previously thought / H.H. Liu, J. Wang, L. Zhang, Y. Li, C. Wang, Z. Zhang, T. Wang // *Journal of Nutrition and Food Sciences*. 2018. Vol. 8, Issue 2. Article 686. doi: 10.4172/2155-9600.1000686
19. Evolution of taste sensitivity and taste buds in chickens during selective breeding / Yoshida Y., Kawabata F., Nishimura S., Tabata S., Kawabata Yo. // *Poultry Science*. 2021. Vol. 100. Issue 6. Article 101113. doi: 10.1016/j.psj.2021.101113

References

1. Peach C., Edgington-Mitchell L., Bunnett N., & Schmidt B. Protease-Activated Receptors in Health and Disease. *Physiological reviews*. 2022;103(1):717-785. doi: 10.1152/physrev.00044.2021.
2. Rothman S., Leibow C., Isenman L. (2002) Conservation of digestive enzymes. *Physiological reviews*. 2002;82(1):1–18. doi: 10.1152/physrev.00022.2001
3. Korotko G. F. Recycling of digestive gland enzymes. *Russian Journal of Gastroenterology, Hepatology, Coloproctology*. 2011;21(4):14-21 (In Russ.)
4. Kuzmina I.V., Tolpygo S.M., Kotov A.V., Shoibonov B.B., Zamolodchikova T.S., Ovchinnikova N.V. Intestinal digestion in poultry compared to other animal species with a diverse diet. *Front Physiol* 15:1358524. doi: 10.3389/fphys.2024.1358524
5. Hu C., Chen Y., Yin X., Xu R., Yin C., Wang C. & Zhao Y. Pancreatic endocrine and exocrine signaling and crosstalk in physiological and pathological status. *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 2025;10:39. doi: 10.1038/s41392-024-02098-3
6. Cao Y., Lu J. & Cai G. Quality improvement of soybean meal by yeast fermentation: based on the degradation of anti-nutritional factors and accumulation of beneficial metabolites.. *Journal of the science of food and agriculture*. 2023;104(3). doi: 10.1002/jsfa.13041
7. Vertiprakhov V.G. Physiology of intestinal digestion in chickens (experimental approach). Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy. Moscow, 2022 (In Russ.)
8. Fisnin V. I., Egorov I. A., Lenkova T. N. [et al.]. Guide to optimising compound feed recipes for poultry. Sergiev Posad: All-Russian Research and Technological Institute of Poultry Breeding, 2014. 155 p. (In Russ.)
9. Vertiprakhov V.G., Selionova M.I., Malorodov V.V. (2023) Trypsin is a new marker of metabolism in animals. *Timiryazev Biological Journal*. 2023;1:53–58 (In Russ.) doi: 10.26897/2949-4710-2023-1-53-58
10. Toghyani M., McQuade L., McInerney B., Moss A., Selle P. & Liu S. Initial assessment of protein and amino acid digestive dynamics in protein-rich feedstuffs for broiler chickens. *PLoS ONE*. 2020; 15. doi: 10.1371/journal.pone.0239156
11. Mokhtari R., Fard MK., Rezaei M., Dirandeh E. (2024) Effect of casein bioactive peptides on performance, nutrient digestibility, enzyme activity and intestinal microbial population in broiler chickens. *J Anim Physiol Anim Nutr*. 2024;108(6):1798–1806. doi:10.1111/jpn.14021
12. Supriya R., Chacko B., Anitha P., Suja C. & Priya P. Effects of fermented soybean meal, probiotics and organic acids on intestinal morphology, pH and microbial count in broilers. *Journal of Veterinary and Animal Sciences*. 2022;Vol. 53. Issue 3: 348-355. doi: 10.51966/jvas.2022.53.3.348-355
13. Pietzner M., Budde K., Röhlemann M., Völzke H., Homuth G., Weiss F., Lerch M. & Frost F. Exocrine Pancreatic Function Modulates Plasma Metabolites Through Changes in Gut Microbiota Composition. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*. 2021;106: e2290 - e2298. doi: 10.1210/clinem/dgaa961
14. McGuckin E., Cade J. & Hanison J. The pancreas. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*. 2020;Vol.21.Issue 11:531-614. doi: 10.1016/j.mpaic.2020.08.005.
15. Kuenz S., Thurner S., Hoffmann D., Kraft K., Wiltafsky-Martin M., Damme K., Windisch W. & Brugger D. (2022). Effects of gradual differences in trypsin inhibitor activity on the estimation of digestible amino acids in soybean expellers for broiler chickens. *Poultry Science*. 2022;Vol.101.Issue 4:101740101. doi: 10.1016/j.psj.2022.101740.
16. Aderibigbe A., Cowieson A., Sorbara J., Pappenberger G. & Adeola O. Growth performance and amino acid digestibility responses of broiler chickens fed diets containing purified soybean trypsin inhibitor and supplemented with a monocomponent protease. *Poultry Science*. 2020;99(10):5007-5017. doi: 10.1016/j.psj.2020.06.051
17. Vertiprakhov V.G., Polina S.I., Sergeenkov N.A. [et al.]. Patent No 2821592 C1 Russian Federation, IPC A23K 10/00, G01N 33/50. Method for assessing the taste and nutritional properties of feed in poultry : No 2023131963 : application. 05.12.2023 : published. 25.06.2024

18. Liu H.X., Wang J, Zhang L, Li Y, Wang Q, Zhang Z, Wang T. An update on the sense of taste in chickens: a better developed system than previously appreciated. *J Nutr Food Sci.* 2018;Vol.8,Issue 2:686. doi: 10.4172/2155-9600.1000686

19. Yoshida Y., Kawabata F., Nishimura S., Tabata S., Kawabata Y. Evolvment of taste sensitivity and taste buds in chickens during selective breeding. *Poult Sci.* 2021;Vol.100,Issue6:101113. doi: 10.1016/j.psj.2021.101113

Информация об авторах

Светлана Владимировна Карамушкина – кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии, этологии и биохимии животных, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, sveta.vetmed@mail.ru;

Владимир Горгиевич Вертипрахов – доктор биологических наук, зав. кафедрой физиологии, этологии и биохимии животных, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева.

Information about the authors

Svetlana V. Karamushkina – Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Chair of Animal Physiology, Ethology and Biochemistry, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, sveta.vetmed@mail.ru;

Vladimir G. Vertiprakhov – Doctor of Science (Biology), Head of Chair of Animal Physiology, Ethology and Biochemistry, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev.

Статья поступила в редакцию 25.07.2025; одобрена после рецензирования 07.08.2025; принята к публикации 12.08.2025.

The article was submitted 25.07.2025; approved after reviewing 07.08.2025; accepted for publication 12.08.2025.