

УДК 636.4:577.15:636.084/087

DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2025.4.23-40.

**ВЗАИМОСВЯЗЬ БЕЛКОВОГО И ЖИРОВОГО ОБМЕНА У СВИНЕЙ:  
МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ, КОРМОВАЯ РЕГУЛЯЦИЯ И  
ВЛИЯНИЕ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ (обзор)**

Панюшкин Д.Е.

*ВНИИ физиологии, биохимии и питания – филиал ФИЦ  
животноводства - ВИЖ им. Л.К. Эрнста, Боровск Калужской области,  
Российская Федерация*

Свиноводство остаётся одной из ключевых отраслей животноводства, обеспечивающей мировой рынок высококачественным белковым продуктом. Взаимосвязь белкового и жирового обмена у свиней является ключевым фактором, определяющим продуктивность, качество мяса и экономическую эффективность свиноводства. Центральная проблема заключается в метаболическом дисбалансе процессов синтеза белков мышечной ткани (протеогенез) и отложения жира в теле (липогенез), ведущем к значительным потерям питательных веществ корма и ухудшению качества туши. Основные разделы обзора: основные взаимосвязи метаболизма белков и липидов у свиней (метаболизм и энергетический баланс, ключевые органы и ткани), молекулярные механизмы взаимосвязанной регуляции (ко-регуляции) (центральная роль сигнального пути mTOR, рецепторы, активируемые пролифераторами пероксисом, сигнальные пути инсулина и лептина), внешнесредовые и физиологические факторы, влияющие на метаболизм белков и липидов (состав рациона, генетические факторы и породные особенности, физиологическое состояние и стадии роста), практические аспекты в свиноводстве. Фазовое кормление и применение низкобелковых рационов, сбалансированных по синтетическим аминокислотам, позволяют оптимизировать соотношение "мясо/жир", улучшить качественные показатели мяса (нежность, сочность, мраморность за счёт внутримышечного жира) и снизить экологическую нагрузку за счёт уменьшения экскреции азота.

*Ключевые слова: свиноводство, белковый обмен, липидный обмен, энергетический баланс, гормональная регуляция, сигнальные пути, инсулин, лептин, качество мяса.*

*Проблемы биологии продуктивных животных. 2025. 4: 23-40.*

### **Введение**

Свиноводство остаётся одной из ключевых отраслей животноводства, обеспечивающей мировой рынок высококачественным белковым продуктом. Глобальное производство свинины превышает 100 млн тонн в год, составляя около 36% от общего производства мяса, уступая лишь птицеводству, и служит основным источником животного белка для более чем 1,5 млрд человек, особенно в Азии и Европе (de Almeida et al., 2024). Это делает свиноводство важной отраслью сельского хозяйства, для обеспечения пищевой безопасности населения.

Экономическая эффективность свиноводства обусловлена такими факторами, как высокая скороспелость свиней и высокий коэффициент конверсии корма – в пределах 2,5–3,0, против 5,0–6,0 у крупного рогатого скота. Однако существует фундаментальное противоречие между необходимостью максимального синтеза мышечной ткани и неизбежным сопутствующим процессом липогенеза у свиней. Синтез белка в мышцах требует значительных энергетических затрат, а аминокислоты служат не только строительным материалом, но и субстратами для глюконеогенеза (Hodkovicova et al., 2023). В условиях, когда энергия рациона превышает нужды

протеогенеза, её избыток направляется на липогенез, приводя к избыточному накоплению жира (Liu et al., 2022; Guo et al., 2023). Это метаболическое противоречие наиболее выражено на стадиях откорма, когда генетическая предрасположенность к быстрому росту конфликтует с метаболической эффективностью (Yang et al., 2019; Teng et al., 2023).

Данная проблема напрямую обуславливает значительные экономические потери, поскольку до 70% затрат в свиноводстве приходится на корма (Rauw et al., 2025). В условиях высокой волатильности цен на кормовые ингредиенты нарушение оптимального соотношения между белковым и жировым обменом увеличивает стоимость производства на 10–20% (Sarrì et al., 2024), при этом ухудшается качество туши. Современные потребители и перерабатывающие предприятия предъявляют строгие требования к соотношению «мясо/жир», при котором оптимальная доля постного мяса составляет 55–65%. Чрезмерное ожирение особенно выражено у местных пород, у которых жировые отложения могут достигать 30–40% веса туши против 15–20% у гибридных пород (Hermesch, 2004; Fanalli et al., 2022; Martins et al., 2025), что снижает выход продаваемой части на 10–15%. Гипертрофия внутреннего жира ухудшает технологические свойства мяса, имеющие повышенную водосвязывающую способность и нежелательные сенсорные характеристики (Yan et al., 2023; Wang et al., 2024), а также увеличивает риск метаболических расстройств, таких как инсулинорезистентность, что дополнительно повышает ветеринарные расходы (Teng et al., 2023). Напротив, недостаточное накопление подкожного жира ведёт к снижению энергетических резервов у поросят-сосунов и к повышенному риску травматизма в период отъёма. В ранние стадии роста стрессовые факторы, такие как высокая температура, усиливают проблему, снижая аппетит и усиливая катаболизм белка (Zhang et al., 2025).

Актуальность темы обостряется в контексте интенсификации животноводства и экологических требований. Снижение белка в рационе для уменьшения выброса азота в окружающую среду (до 20–30% снижения аммиака) создаёт парадоксальный риск усиленного жиросотложения (de Almeida et al., 2024). Таким образом, ключевой задачей становится разработка стратегий кормления, обеспечивающих баланс между продуктивностью и экологией (Farnworth, Kramer, 1987; Ma et al., 2021). Исследования показывают, что оптимизация рациона может повысить коэффициент конверсии корма на 5–10%, уменьшая экономические потери и улучшая качество продукции (Reyer et al., 2017; Wu et al., 2020), однако это требует глубокого понимания молекулярных биологических механизмов (Zhao et al., 2010; Goodarzi et al., 2023).

На молекулярном уровне это противоречие проявляется в конкуренции сигнальных путей, таких как mTOR и PPARs (Peroxisome proliferator-activated receptors), отвечающих за белковый синтез и регуляцию липогенеза. В условиях дефицита специфических аминокислот, например, изолейцина или валина, метаболизм может переключаться на липолиз, но при избытке энергии происходит обратный процесс (Goodarzi et al., 2023; Liao et al., 2025). Гормональная регуляция, включая инсулин и лептин, усиливает эту двойственность: инсулин стимулирует как протеогенез, так и липогенез, что может приводить к ожирению (Malgwi et al., 2022; Salgado et al., 2022; Yi et al., 2023). Проблема усугубляется онтогенетической вариабельностью: у растущих поросят преобладает белковый синтез, но на заключительной стадии откорма липогенез начинает доминировать, что критически снижает качество туши (Wang et al., 2024). Без учёта этих механизмов стандартные рационы неизбежно ведут к экономическим потерям и снижению конкурентоспособности предприятия (Fu et al., 2025a; Rauw et al., 2025).

Таким образом, взаимосвязь белкового и жирового обмена представляет собой сложную систему, в которой молекулярные механизмы, гормональная регуляция и статус питания определяют баланс между ростом мышечной ткани и отложением жира. Понимание этих процессов является основой для разработки стратегий кормления, направленных на улучшение качества туши и эффективности использования корма, что особенно актуально для современных

пород свиней, подверженных интенсивной генетической селекции (Poklukar et al., 2020; Škrlep et al., 2024).

### **Основные взаимосвязи метаболизма белков и липидов у свиней.**

Метаболизм белков и липидов у свиней представляет собой интегрированную систему координированных процессов, определяющих энергетический гомеостаз, рост тканей и продуктивность. Эти взаимосвязи регулируются сложным переплетением молекулярных сигнальных путей, гормональной регуляцией и генетическими факторами, оказывая непосредственное влияние на эффективность производства мяса. В данной главе рассматриваются фундаментальные аспекты данных взаимодействий, включая общность метаболических предшественников, функциональную роль ключевых органов и последствия энергетического дисбаланса.

*Метаболизм и энергетический баланс.* Ацетил-КоА играет центральную роль в метаболизме у свиней, являясь общей отправной точкой для нескольких ключевых путей. Он образуется в результате  $\beta$ -окисления жирных кислот, окислительного декарбоксилирования пирувата (конечного продукта гликолиза) и катаболизма кетогенных аминокислот. В митохондриях клетки ацетил-КоА вступает в цикл трикарбоновых кислот (цикл Кребса), взаимодействуя с оксалоацетатом с образованием цитрата, что обеспечивает генерацию восстановленных коферментов (NADH, FADH<sub>2</sub>) для последующего синтеза АТФ в процессе окислительного фосфорилирования. Одновременно ацетил-КоА служит субстратом для синтеза жирных кислот в процессе липогенеза. У свиней, в отличие от некоторых других видов животных, липогенез преимущественно происходит в жировой ткани (адипоциты) и печени (гепатоциты), в которых метаболизм ацетил-КоА регулируется, в основном, двумя ферментами – ацетил-КоА-карбоксилазой и жирнокислотной синтетазой; избыток углеводов в рационе усиливает преобразование ацетил-КоА в липиды, что может привести к повышенному отложению жира (Reyer et al., 2017). Это особенно актуально для современных пород свиней, у которых генетическая селекция на постное мясо приводит к изменениям в распределении ацетил-КоА между энергетическим обменом и процессами синтеза (Sun et al., 2024).

Аминокислоты у свиней выполняют не только пластическую функцию, выступая в роли субстратов для синтеза мышечного белка, но и являются важными глюконеогенными предшественниками, косвенно обеспечивая энергией процесс липогенеза. Глюконеогенез, происходящий преимущественно в печени и почках, использует углеродную основу аминокислот, таких как аланин, глутамат и аспарат, для синтеза глюкозы. Например, аланин, поступающий из мышц по глюкозо-аланиновому циклу, превращается в пируват, который затем через оксалоацетат вовлекается в глюконеогенез. Окислительный катаболизм аминокислот в печени и периферических тканях генерирует ацетил-КоА и другие интермедиаты цикла Кребса, которые могут быть использованы для *de novo* синтеза жирных кислот. Роль аминокислот как энергетического субстрата особенно значима в критические периоды онтогенеза. Так, у поросят-отъёмшей окисление аминокислот в энтероцитах тонкого кишечника может составлять до 82% от общей продукции CO<sub>2</sub> при скармливании высокобелковых рационов, что подчёркивает их вклад в энергообеспечение быстрорастущих тканей (He et al., 2022). Функционально значимые аминокислоты, такие как глутамин и аргинин, модулируют этот процесс, усиливая целостность кишечного барьера и оптимизируя метаболизм (Hodkovicova et al., 2023). При энергетическом дефиците или при дисбалансе рациона, аминокислоты активно мобилизуются из мышц посредством усиления протеолиза для поддержания глюконеогенеза, что напрямую влияет на баланс между ростом белковой ткани и депонированием липидов (Ma et al., 2021).

Концепция «энергетического дисбаланса» является центральной для понимания распределения метаболитов. Она подразумевает, что избыток энергии в рационе приводит к усиленному отложению жира. У свиней, получающих высококалорийные рационы с низким

содержанием белка, энергия направляется на липогенез вместо синтеза мышечной массы (протеогенез), что увеличивает жировые отложения в туше. Описана линейная регрессия роста жировой массы при увеличении энергии в рационе самцов и квадратичная у самок (Liu et al., 2022). Это связано с тем, что избыточная энергия активирует синтез липидов в мышцах, что можно скорректировать изменением состава рациона для улучшения качества мяса (Vasquez et al., 2022). При низкотемпературных условиях содержания животных, рационы с высоким содержанием жира позволяют свиньям использовать жир для терморегуляции, снижая потери энергии и оптимизируя метаболический баланс (Teng et al., 2023). Такой дисбаланс особенно заметен у местных пород свиней, у которых генетические различия обуславливают повышенное использование энергии для жиросотложения (Poklukar et al., 2020).

*Ключевые органы и ткани.* Печень играет ведущую роль в метаболизме белков и жиров у свиней, отвечая за синтез липопротеинов и дезаминирование аминокислот. В печени происходит дезаминирование избыточных аминокислот с образованием аммиака, который затем преобразуется в мочевины в орнитиновом цикле. В печени синтезируются липопротеины очень низкой плотности (ЛПОНП), транспортирующие триацилглицеролы к периферийным тканям. Уровень кормового протеина оказывает прямое влияние на липидный метаболизм в печени: высокобелковые рационы подавляют экспрессию ключевых генов липогенеза, тем самым снижая интенсивность синтеза жирных кислот (Zhao et al., 2010). Современные транскриптомные исследования выявили дифференциальную экспрессию генов, связанных с окислением и жировым обменом, в печени свиней при разном содержании жира в рационе (Fu et al., 2025b). Функционирование печени существенно зависит от работы других органов, в частности, кишечника, в котором микробиота продуцирует короткоцепочечные жирные кислоты и другие метаболиты, изменяющие гомеостаз глюкозы и липидов в печени, особенно в условиях холодового стресса (Martins et al., 2025).

Ткани скелетных мышц являются основным потребителем аминокислот для синтеза сократительных и саркоплазматических белков и выступают в роли главного «конкурента» жировой ткани за питательные субстраты. В скелетных мышцах синтез белка регулируется по сигнальному пути mTOR, который интегрирует сигналы о наличии аминокислот (особенно лейцина), энергии и инсулина (Yang et al., 2019). Применение низкобелковых рационов без адекватной балансировки по лимитирующим аминокислотам приводит к снижению концентрации незаменимых аминокислот в плазме крови и мышцах, ингибируя синтез белка и перенаправляя энергию на отложение жира (Goodarzi et al., 2023). Взаимодействие мышц и печени, в частности, в рамках глюкозо-лактатного цикла (цикл Кори) является важным компонентом поддержания системного энергетического гомеостаза (Yan et al., 2023).

Жировая ткань (подкожная, висцеральная, внутримышечная) является не только основным местом депонирования триглицеридов, но и активным эндокринным органом, секретирующим адипокины. Ключевые адипокины – лептин и адипонектин оказывают системное влияние на метаболизм. Лептин, уровень которого коррелирует с массой жировой ткани, подавляет аппетит по пути гипоталамической регуляции и стимулирует липолиз в периферических тканях. Адипонектин, напротив, повышает чувствительность периферических тканей (печень, мышцы) к инсулину и обладает противовоспалительными свойствами. Показано, что у свиней с выраженным ожирением экспрессия генов лептина (LEP) и его рецепторов существенно увеличена в висцеральном жире, что указывает на его повышенную метаболическую активность (Yi et al., 2023). Проведенный транскриптомный анализ выявил, что состав микробиоты кишечника и факторы кормления (в том числе уровень клетчатки) могут влиять на экспрессию генов липогенеза и липолиза в подкожной жировой клетчатке (Wang et al., 2024). Особое значение для мясной продуктивности имеет внутримышечный жир, который определяет мраморность мяса и его сочность, а его содержание в значительной степени зависит от состава рациона, в частности, от соотношения полиненасыщенных жирных кислот омега-6 и

омега-3 (Fanalli et al., 2022). Все типы жировой ткани активно взаимодействуют с мышечной тканью и печенью, конкурируя за общие субстраты (глюкозу, ацетил-КоА), и в условиях положительного энергетического баланса эта конкуренция смещается в пользу отложения жира (Wang et al., 2024).

Таким образом, тесные взаимосвязи белкового и липидного обмена у свиней, опосредованные наличием общих метаболитов и межорганных взаимодействий, являются ключевым детерминантом продуктивности. Целенаправленная регуляция межорганных взаимодействий, основанная на глубоком понимании физиологических и биохимических процессов, позволяет оптимизировать потоки метаболитов, снижая непродуктивное жиросотложение и увеличивая эффективность протеосинтеза в скелетно-мышечной ткани.

### **Молекулярные механизмы взаимосвязанной регуляции (ко-регуляция).**

Молекулярные механизмы ко-регуляции белкового и жирового обмена у свиней представляют собой сложную сеть взаимодействующих сигнальных путей, обеспечивающих физиологический баланс между синтезом белков в мышечной ткани и аккумуляцией липидов в адипоцитах. Соотношение этих процессов находится под контролем ключевых регуляторных факторов, таких как сигнальный путь mTOR, рецепторы PPAR, инсулин и лептин, которые интегрируют сигналы от питательных веществ и гормонов для адаптации метаболизма к текущим энергетическим потребностям организма (Hardie, 2011). Понимание этих механизмов является критически важным для оптимизации продуктивности в свиноводстве, поскольку их дисбаланс может привести либо к избыточному отложению жира, либо к снижению темпов роста мышц (Sun et al., 2024).

*Центральная роль сигнального пути mTOR.* Сигнальный путь mTOR (mammalian target of rapamycin) играет центральную роль в ко-регуляции белкового и жирового обмена у свиней, выступая в качестве ключевого интегратора сигналов от аминокислот и гормонов для контроля синтеза белка и липидов. Эта интеграция осуществляется двумя мультипротеиновыми комплексами: mTORC1 и mTORC2, причём mTORC1 является основным сенсором питательных веществ и регулятором анаболических процессов (Saxton и Sabatini, 2017). Активация mTORC1 аминокислотами, в особенности лейцином, осуществляется через специализированные сенсоры, такие как Sestrin2 (SESN2) и CASTOR1, которые опосредуют высвобождение Rag GTPases и рекрутирование mTORC1 к поверхности лизосом, что является необходимым условием для его полной активации (Panwar et al., 2023). Было обнаружено, что у свиней лейцин усиливает активацию mTORC1 в адипоцитах с последующей регуляцией жирового обмена за счёт модуляции секреции адипокинов и активности SIRT1 (Tang et al., 2020). Параллельно инсулин активирует mTORC1 через каскад PI3K-АКТ, который фосфорилирует и ингибирует комплекс TSC2, тем самым высвобождая Rheb GTPазу для прямой стимуляции mTORC1, что обеспечивает интеграцию метаболизма (Ricoult, Manning, 2013).

Стимуляция синтеза белка в миоцитах посредством mTORC1 осуществляется, главным образом, через фосфорилирование его эффекторов – эукариотического фактора инициации трансляции 4E-BP1 и серин/треониновой киназы S6K1, которые непосредственно регулируют инициацию трансляции мРНК (Laplanche, Sabatini, 2009). В скелетных мышцах свиней активация mTORC1 лейцином повышает синтез белков в мышцах, способствуя росту, однако при повышенном уровне аммиака эта активация может перенаправлять метаболизм в сторону усиленного синтеза липидов и подавления их  $\beta$ -окисления (Tang и др. 2020). Показано, что в условиях дефицита питательных веществ активность mTORC1 подавляется, что переключает клеточный метаболизм на катаболические процессы (He et al., 2022). Это особенно важно для растущих поросят, у которых сбалансированность рациона по аминокислотам является определяющим фактором для эффективности роста (Sarti et al., 2024).

Параллельно с его ролью в мышцах, mTOR играет значительную роль в адипогенезе и липогенезе в адипоцитах. Активация mTORC1 стимулирует транскрипционный фактор SREBP1, что, в свою очередь, усиливает экспрессию ключевых генов синтеза липидов и влияет на ферменты липидного обмена, такие как FAS (синтетаза жирных кислот) и ACC (ацетил-КоА-карбоксилаза) (Ricoult, Manning, 2013). У свиней mTORC1 способствует дифференцировке адипоцитов и накоплению липидов в подкожном и внутримышечном жире, что напрямую влияет на качество туши (Sun et al., 2024). Однако, увеличенная активность mTORC1 может способствовать развитию ожирения, поскольку данный комплекс может ингибировать процессы липолиза и  $\beta$ -окисления жирных кислот (Laplante, Sabatini, 2009). У пород, предрасположенных к ожирению, таких как иберийская, генетические вариации компонентов mTOR-пути влияют на опосредованную им регуляцию, усиливая жировые отложения (Torres-Rovira et al., 2012). Таким образом, mTOR служит ключевым узлом интеграции, где целенаправленные изменения рациона позволяют изменять баланс между белковым и жировым метаболизмом для улучшения продуктивных показателей (Zhang et al., 2021; He et al., 2022).

*Рецепторы, активируемые пролифераторами пероксисом (PPARs).* Рецепторы, активируемые пролифераторами пероксисом (PPARs), представляют собой семейство ядерных рецепторов, регулирующих экспрессию генов в ответ на связывание лигандов, таких как жирные кислоты, и играют ключевую роль в ко-регуляции жирового обмена у свиней. Изоформа PPAR $\gamma$  выступает в качестве главного регулятора дифференцировки адипоцитов и накопления липидов, активируя экспрессию специфических генов, кодирующих белки, участвующие в липогенезе, такие как FABP4 (белок, связывающий жирные кислоты) и SCD (стеароил-КоА-десатураза) (Rosen et al., 1999). В адипоцитах свиней PPAR $\gamma$  является драйвером липогенеза, способствуя формированию подкожного и внутримышечного жира, что напрямую влияет на качественные характеристики мяса. Исследования, проведенные на породе лайву, выявили положительную корреляцию между уровнем экспрессии PPAR $\gamma$  и содержанием внутримышечного жира (Cui et al., 2016; Zhang et al., 2022).

Влияние жирных кислот на активность PPAR $\gamma$  проявляется через их связывание с рецептором, что приводит к его конформационным изменениям, диссоциации от ко-репрессоров и рекрутированию ко-активаторов, инициируя транскрипцию целевых генов (Gu et al., 2021). У свиней насыщенные жирные кислоты эффективно активируют PPAR $\gamma$  в адипоцитах, усиливая накопление липидов, в то время как полиненасыщенные жирные кислоты могут модулировать этот процесс, оказывая более сложное влияние (Fanalli et al., 2022). Помимо липидных лигандов, на активность PPAR $\gamma$  влияют и другие регуляторы, например, микроРНК. Обнаружено, что ssc-miR-130b напрямую подавляет экспрессию PPAR $\gamma$ , снижая накопление липидов в культивируемых адипоцитах (Yang et al., 2025). Примечательно, что активность PPAR $\gamma$  варьирует у разных тканей и между породами; так, выявлены различия в регуляции PPAR $\gamma$ -зависимого адипогенеза в синовиальных мезенхимальных клетках у разных генетических линий свиней (Ponsuksili et al., 2024).

PPAR $\gamma$  не функционирует изолированно, он вовлечён в сложные взаимодействия с другими сигнальными путями и может формировать петлю обратной связи с транскрипционным фактором HIF1 $\alpha$ , обеспечивая контекст-зависимую регуляцию отложения липидов (Kudo et al., 2023). В условиях ожирения у свиней активация PPAR в макрофагах жировой ткани способствует улучшению липидного метаболизма (Applegate et al., 2025). Важным аспектом регуляции является посттрансляционная модификация рецептора. Неддиляция PPAR $\gamma$  (процесс конъюгирования убиквитин-подобного белка NEDD8 с белками-мишенями) является необходимой для его стабилизации и полноценного адипогенеза, что делает этот процесс потенциальной мишенью для терапии ожирения (Park et al., 2016). В контексте свиноводства целенаправленная манипуляция активности PPAR за счёт изменения состава рациона

рассматривается как перспективный подход для оптимизации размеров жировых отложений (Fanalli et al., 2022; Yi et al., 2023).

*Сигнальные пути инсулина и лептина.* Инсулин выступает в качестве мощного анаболического гормона, стимулирующего усвоение глюкозы, синтез белка и липогенез у свиней. Механизм его действия начинается со связывания с рецептором на поверхности клетки, что приводит к активации внутриклеточного тирозинкиназного каскада, ключевым элементом которого является путь PI3K-Akt. Активированный Akt, в свою очередь, стимулирует транспорт глюкозы через транслокацию переносчика GLUT4 и активирует путь mTOR, усиливая синтез белков (Krishnan et al., 2018). В печени и мышечной ткани у свиней инсулин потенцирует липогенез через активацию транскрипционного фактора SREBP1. Однако при развитии инсулинорезистентности, что характерно для сальных пород свиней, эта регуляция нарушается, приводя к дислипидемии (Torres-Rovira et al., 2012).

Лептин, секретируемый адипоцитами, служит ключевым связующим звеном между метаболизмом жировой ткани и центральной регуляцией аппетита и энергозатрат. Его основной механизм действия заключается в активации рецептор-ассоциированного JAK-STAT – сигнального пути в нейронах гипоталамуса, что в конечном итоге снижает потребление пищи (Yang et al., 2007; Liu et al., 2023). У свиней лептин играет важную роль не только в энергетическом гомеостазе, но и в репродуктивной функции, при этом его уровень в крови повышается в период полового созревания (Barb et al., 2001; Barb et al., 2005). Лептин тесно взаимодействует с инсулиновой сигнализацией, модулируя активность гипоталамических нейронов для контроля уровня глюкозы в крови (German et al., 2009). На периферии, в адипоцитах, лептин у свиней оказывает прямое метаболическое действие, снижая этерификацию жирных кислот, тем самым влияя на внутриклеточный метаболизм липидов (Ramsay, 2004).

Взаимодействие между системами инсулиновой и лептиновой регуляции является многогранным. Окислительный стресс может приводить к ингибированию активности тирозинфосфатазы 1B (PTP1B), которая одновременно усиливает действие и инсулина, и лептина (Stanford, Bottini, 2017; Krishnan et al., 2018). При ожирении, несмотря на развитие центральной лептинорезистентности, периферические симпатические эффекты лептина могут сохраняться, что способствует развитию сопутствующей гипертензии (Yang et al., 2007). Эта сложная сеть взаимодействий между инсулином и лептином обеспечивает тонкую настройку энергетического баланса, а его нарушение лежит в основе многих метаболических расстройств, влияющих на продуктивность сельскохозяйственных животных.

Таким образом, молекулярные механизмы ко-регуляции белкового и липидного обмена у свиней представляют собой интегрированную систему, в которой ключевые сигнальные пути (mTOR, PPAR), гормоны (инсулин, лептин) и питательные вещества взаимодействуют для поддержания метаболического гомеостаза. Детальное исследование этих взаимодействий открывает возможности для повышения продуктивности. Стратегии питания, направленные на модуляцию активности mTOR и PPAR, а также учёт генетических особенностей гормональной регуляции позволяют целенаправленно управлять балансом между синтезом белков в мышцах и жиросотложением, что является одной из центральных задач современного свиноводства.

#### **Внешнесредовые факторы, влияющие на метаболизм белков и липидов у свиней.**

Факторы внешней среды играют важную роль в регуляции сложного взаимодействия белкового и жирового обмена у свиней, оказывая прямое влияние на молекулярные механизмы, эффективность утилизации питательных веществ и, как следствие, на конечные продуктивные показатели. К числу ключевых внешних детерминант относится диета (состав рациона), генетические факторы и стадии онтогенеза.

*Диета (состав рациона).* Питательные вещества рациона играют роль первичных регуляторов метаболических процессов, определяющих баланс между синтезом белка и

депонированием липидов у свиней. Уровень и источник пищевого протеина, сбалансированность аминокислотного состава рациона, а также уровень энергии и тип углеводов оказывают прямое воздействие на формирование соотношения «мышечная ткань/жир» в туше.

Протеин корма в значительной мере влияет на метаболический баланс. Низкобелковые диеты часто приводят к увеличению жировых отложений, поскольку энергия, не используемая для синтеза белка, перенаправляется на липогенез (Stonehouse et al., 2017; Zhao et al., 2019). Низкопротеиновые (НП) рационы увеличивают толщину подкожного жира и одновременно – содержание жира в мышцах, что может положительно сказываться на вкусовых характеристиках мяса, таких как нежность и сочность, но негативно – на выходе постной мышечной ткани (Zhu et al., 2022). В противоположность этому, высокобелковые диеты стимулируют рост мышц и подавляют липогенез, однако могут приводить к увеличению экскреции азота, негативно влияя на экологию (Rocha et al., 2022). Эффективность кормления также зависит от источника протеина; например, соевый белок в НП-рационах может улучшать мясные качества туши, но требует обязательной добавки синтетических аминокислот (Fu et al., 2025b). В условиях теплового стресса НП-рационы с добавлением эссенциальных аминокислот способны ускорять рост животных, но изменяют метаболический статус, увеличивая синтез «белков острой фазы» (Oliveira et al., 2023). Таким образом, несмотря на положительный эффект низкопротеиновых рационов на депонирование жира, необходим тщательный баланс для предотвращения снижения мясной продукции (Palma-Granados et al., 2024).

Балансирование рациона по аминокислотам является критическим фактором регуляции метаболизма; особое значение имеют аминокислоты с разветвлённой цепью (ВСАА: лейцин, валин, изолейцин), лизин, метионин и аргинин. ВСАА модулируют липидный обмен, активируя сигнальный путь mTOR и влияя на процесс глюконеогенеза (Zhou et al., 2023). В контексте НП-рационов дополнительное введение ВСАА частично нивелирует дефицит протеина, воздействуя на центральные (гипоталамические) и периферические (мышечные, печёночные) механизмы регуляции (Habibi et al., 2021). Однако избыток ВСАА может усиливать метаболизм жиров посредством эпигенетического механизма m6A-метилирования РНК, что приводит к повышенному отложению липидов у поросят (Cemin et al., 2019; Heng et al., 2020). Комбинированное применение валина и изолейцина в НП-рационах для поросят-отъёмышей позволяет поддерживать скорость роста на уровне, сопоставимом с высокобелковым кормом, за счёт синергетического влияния на синтез белков в мышцах (Columbus et al., 2015; Gloaguen et al., 2011). Лизин и метионин, являясь лимитирующими аминокислотами в большинстве рационов, напрямую влияют на протеогенез: дефицит лизина подавляет рост мышц и повышает липогенез, в то время как его оптимальный уровень увеличивает выход мяса. Метионин, помимо своей роли в синтезе белка, участвует в регуляции окислительного метаболизма и иммунных функций кишечника, особенно в условиях дефицита протеина. Аргинин, в свою очередь, синергично взаимодействует с этими аминокислотами, повышая чувствительность тканей к инсулину и потенцируя анаболические сигналы mTOR, что в конечном итоге способствует перераспределению питательных веществ в пользу синтеза белка в мышцах, а не накопления жира (Ye et al., 2017; Jobgen et al., 2023). Таким образом, поддержание определённого баланса аминокислот позволяет оптимизировать соотношение «мясо/жир», минимизируя негативные эффекты низкопротеиновых рационов (Spring et al., 2020; Habibi et al., 2022).

Уровень энергии и тип углеводов определяют гликемическую нагрузку, секрецию инсулина и, как следствие, интенсивность липогенеза. Высокий уровень обменной энергии в рационах с низким содержанием протеина усиливает липогенез, поскольку избыточные калории конвертируются в триглицериды (van Kempen, Zijlstra, 2023). Тип углеводов напрямую определяет гликемическую нагрузку (ГН); высокогликемические углеводы (например, крахмал) вызывают резкий подъем уровня глюкозы и инсулина в крови, что стимулирует липогенез в печени и адипоцитах (Cline et al., 2022). В исследованиях на растущих свиньях было установлено,

что взаимодействие между углеводами и жирами влияет на метаболизм глюкозы, при этом рационы с высоким содержанием фруктозы значительно усиливают липогенез *de novo* по сравнению с глюкозой (Cline et al., 2022). Низкая ГН, напротив, ассоциирована со сниженной секрецией инсулина и меньшим жиросложением, но может лимитировать скорость прироста живой массы (van Kempen, Zijlstra, 2023). У пород с генетически низкой инсулиновой чувствительностью высокая ГН может приводить к развитию дислипидемии и повышенному накоплению висцерального жира (Allee et al., 1971). Жир корма, в свою очередь, может подавлять эндогенный липогенез, но этот эффект зависит от уровня протеина в рационе: высокожировые диеты в сочетании с НП повышают активность липогенных ферментов в адипоцитах (Allee et al., 1972). Гликемическая нагрузка также опосредованно влияет на общий метаболизм за счёт изменения состава и функциональной активности кишечной микробиоты (Benítez et al., 2017). Таким образом, оптимизация уровня энергии и типа углеводов является эффективным инструментом для контроля липогенеза и повышения продуктивности.

*Генетические факторы и породные особенности.* Генетические факторы и породные особенности определяют фундаментальную вариабельность метаболических путей, влияя на эффективность регуляции белкового и жирового обмена. Сравнение местных (сальных) и коммерческих (мясных) пород выявляет существенные различия. Породы сального типа характеризуются более высоким содержанием жира в туше и повышенной долей насыщенных жирных кислот в липидном профиле, тогда как мясные породы селекционированы на максимальный выход постного мяса (Škrlep et al., 2024). Местные породы обладают генетически детерминированным медленным темпом роста, но повышенной способностью к депонированию липидов в подкожной и внутримышечной жировой ткани, с формированием более твёрдого и насыщенного жира по сравнению с коммерческими гибридами, которые имеют высокую мышечную массу, но, как правило, более низкое содержание внутримышечного жира (Fazarinc et al., 2020). При скормливании НП-рационов местные породы характеризуются лучшей сохранностью и качеством жира, в то время как у гибридов наблюдается более выраженное снижение темпов роста. Метаболический профиль аборигенных пород характеризуется высокой активностью липогенетических ферментов (например, FAS), в то время как у современных пород преобладают процессы окисления жирных кислот (Fazarinc et al., 2020). Эти породные различия находят отражение в экспрессии генов, вовлечённых в энергетический обмен.

Гены-кандидаты, ассоциированные с метаболизмом липидов и белка, включают в себя FABP4, LEP и MYH. Ген FABP4 (fatty acid-binding protein 4) регулирует внутриклеточный транспорт жирных кислот и ассоциирован с содержанием внутримышечного жира и общей жировой массой (Ballester et al., 2017). Полиморфизм гена FABP4 оказывает значимое влияние на состав жирных кислот у свиней (Poklucar et al., 2020). Ген LEP (лептин) контролирует энергетический гомеостаз и аппетит, при этом у пород сального типа определённые аллельные варианты связаны с повышенной склонностью к ожирению (Ballester et al., 2017). Гены семейства MYH (myosin heavy chain) определяют тип мышечных волокон, что, в свою очередь, влияет на интенсивность синтеза белка и степень инфильтрации мышц жиром (Fazarinc et al., 2020). Эти гены-кандидаты являются молекулярными маркерами для селекции животных с улучшенным метаболическим профилем.

Применение нутригеномики в животноводстве позволяет понять, как компоненты корма изменяют экспрессию генов, вовлечённых в метаболизм. Установлено, что НП-рационы изменяют экспрессию ключевых генов липогенеза (например, ACC, SCD1), снижая липогенетический потенциал печени (Zhao et al., 2010). Более того, кормовые воздействия могут индуцировать эпигенетические модификации (например, метилирование ДНК), которые способны оказывать долгосрочное влияние на фенотип и передаваться последующим поколениям. Жирные кислоты, входящие в состав рациона, регулируют экспрессию генов через активацию ядерных рецепторов, таких как PPARs, тем самым изменяя липидный профиль тканей

(Fanalli et al., 2022). Современные исследования в области нутригеномики открывают путь к персонализации рационов на основе генетического паспорта животного для максимальной оптимизации метаболических процессов.

*Физиологическое состояние и стадии роста.* Стадия онтогенеза оказывает определяющее влияние на динамику преобладания синтеза белка над синтезом жира. В ранние периоды откорма у поросят доминирует протеогенез, сопровождающийся высоким уровнем окисления аминокислот для покрытия энергетических потребностей организма (He et al., 2022). В финишный период откорма метаболическая активность смещается в сторону усиления липогенеза, что приводит к значительному увеличению жировых отложений (Liu et al., 2022). Возрастные изменения включают в себя прогрессирующее снижение скорости обновления белков мышц и повышение конверсии питательных веществ в липиды (Sarrì et al., 2024). Аминокислоты с разветвлённой цепью, которые у поросят расходуются на рост скелетной мускулатуры, у свиней в заключительной стадии откорма в большей степени изменяют жировой обмен (Zhou et al., 2023). Физиологическое состояние, такое как стресс (тепловой, транспортный), индуцирует катаболические процессы, повышается распад мышечного белка и нарушается метаболический гомеостаз (Oliveira et al., 2023). Таким образом, фазовое нормирование питательных веществ с учётом возрастных и физиологических изменений является необходимым условием для повышения продуктивности и качества продукции (Rocha et al., 2022).

Комплексное управление внешнесредовыми факторами открывает широкие возможности для направленной регуляции метаболизма с целью повышения продуктивности, улучшения качества продукции и рентабельности свиноводства. Интеграция данных генетики и физиологии роста позволяет создавать прецизионные системы кормления, адекватно отвечающие на вызовы современного животноводства.

### **Практические аспекты в свиноводстве.**

Практические аспекты взаимосвязи белкового и жирового обмена у свиней имеют непосредственное значение для современного свиноводства, открывая пути для оптимизации состава туши, повышения качества мясной продукции и увеличения экономической эффективности производства. Стратегии кормления, целенаправленно регулирующие эти метаболические процессы, позволяют минимизировать избыточное жиरोотложение, сохраняя высокий уровень роста мышц и одновременно снижать экологическую нагрузку за счёт уменьшения азотных выбросов. Эти подходы, основанные на данных последних исследований, демонстрируют значительный потенциал для повышения продуктивности без ущерба для здоровья животных.

*Стратегии кормления для оптимизации состава туши.* Стратегии кормления играют ключевую роль в регулировании баланса между белковым синтезом и липогенезом, что позволяет целенаправленно влиять на состав туши и снижать себестоимость производства. Наиболее эффективными подходами при этом являются фазированное кормление и применение низкобелковых рационов, сбалансированных по эссенциальным аминокислотам.

Фазированное кормление основано на снижении уровня сырого протеина в рационе по мере приближения к заключительному периоду откорма, что позволяет адаптировать питательность корма к меняющимся физиологическим потребностям на разных стадиях роста. В начальные фазы откорма высокий уровень протеина (16-18%) критически важен для стимуляции роста мышц, тогда как на финишной стадии его снижение до 11-13% способствует умеренному липогенезу без ухудшения основных показателей туши. Снижение уровня сырого протеина корма с 16 до 13% в финишный период не оказало негативного влияния на суточные привесы, но привело к значимому снижению толщины шпика (Hong et al., 2016). Реализация двухфазной системы с последовательным снижением протеина с 18% в фазе роста до 12% в фазе откорма

позволяет не только сохранить показатели среднесуточного привеса и выхода мышечной ткани, но также улучшить конверсию корма и сократить выделение азота с калом на 20-30% (Zhao et al., 2019). В исследовании (Camp Montoro et al., 2022) применение фазированного кормления в поздний период откорма не оказало статистически значимого влияния на выход и качество туши, однако существенно снизило толщину спинного шпика. Для местных пород данная стратегия позволяет поддерживать жиросодержание на оптимальном уровне, улучшая мясные характеристики (Skrlep et al., 2025). Ключевым условием эффективности фазированного кормления является балансирование эссенциальных аминокислот. Без контроля за соотношением аминокислот (лизин, метионин, треонин, триптофан) снижение уровня протеина может привести к угнетению роста. Дополнительным преимуществом фазированного кормления является снижение экологической нагрузки, так как оно способствует уменьшению потерь фосфора и азота на 25% (Pomar et al., 2021).

Применение низкопротеиновых рационов, сбалансированных добавками синтетических аминокислот, представляет собой ещё один высокоэффективный инструмент управления метаболизмом. Снижение уровня сырого протеина на 2-4% при добавлении лизина, метионина, треонина и триптофана позволяет оптимизировать соотношение «мышечная ткань/жир» без потери продуктивности. Низкобелковые рационы (12-14% сырого протеина) с добавкой аминокислот способствуют сохранению интенсивности роста и конверсии корма, одновременно умеренно снижая общее жиросодержание и улучшая качественные показатели мяса (Zhu et al., 2022; Nan et al., 2023). В исследованиях на свиньях в заключительной стадии откорма установлено, что НП-рационы позволяют снизить экскрецию азота на 30%, не оказывая негативного влияния на убойный выход (Fu et al., 2025b). Для животных мясных генотипов такие рационы могут способствовать увеличению содержания внутримышечного жира, что положительно сказывается на нежности мяса, но требует достаточного балансирования аминокислот для предотвращения замедления роста (Wood et al., 2013). Напротив, у пород, предрасположенных к жиросодержанию, НП-рационы не только повышают процент внутримышечного жира, но и изменяют состав жирных кислот в сторону улучшения органолептических свойств (Tejeha et al., 2020).

Механизм воздействия низкобелковых рационов выходит за рамки простого обеспечения азотом. Показано, что синтетические аминокислоты, такие как валин и изолейцин, в условиях низкобелкового рациона влияют на липидный обмен, снижая маркеры системного воспаления и улучшая процесс уреагеноза (Souza et al., 2023). Важно учитывать и внешние факторы: в условиях теплового стресса; НП-диеты с аминокислотной коррекцией позволяют сохранить продуктивность, хотя и оказывают заметное влияние на состав туши (Oliveira et al., 2023). Суммарный эффект от внедрения НП-стратегий – это не только повышение качества продукции, но и снижение себестоимости кормов на 10-15% и уменьшение негативного экологического влияния (Wang et al., 2018).

*Влияние на качество мяса.* Взаимосвязь белкового и жирового обмена оказывает прямое и комплексное влияние на качественные характеристики свинины, проявляясь через такие ключевые характеристики, как мраморность, нежность и сочность, которые, в свою очередь, тесно связаны с метаболическим типом мышечных волокон.

Внутримышечный жир (ВМЖ) является одним из главных маркеров, определяющих сенсорное качество мяса. Многочисленные исследования устанавливают прямую корреляцию между содержанием ВМЖ и основными органолептическими показателями. Изменения уровня внутримышечного жира в диапазоне 2-3% является достаточным для значительного улучшения нежности и сочности мяса (Rincker et al., 2008). Более высокие значения мраморности (5-8%) в мышцах свиной корейки напрямую коррелируют с увеличением ее продажи. Образцы с высокой мраморностью получают значительно более высокие оценки за нежность и общий вид по сравнению с образцами с низким содержанием жира (Noidad et al., 2019). Механизм влияния

ВМЖ на сочность мяса связан со способностью жировых включений удерживать влагу в процессе тепловой обработки. Подтверждено существование положительной корреляции между содержанием ВМЖ и влагоудерживающей способностью (Fernandez et al., 1999). Напротив, дефицит внутримышечного жира (<1%) неизбежно приводит к образованию сухого и жёсткого продукта, снижая потребительский спрос (Beuer et al., 2023). Применение рассмотренных выше стратегий кормления, в частности НП-рационов, является действенным способом управления этим параметром. Низкобелковые рационы способствуют умеренному увеличению мраморности, улучшая нежность мяса без негативных последствий для здоровья животных (Schumacher et al., 2022). При этом породная специфика остаётся важным фактором: свиньи сальных типов изначально имеют более высокий потенциал для накопления ВМЖ и, как следствие, высокую вкусовую ценность мяса (Hocquette et al., 2010).

Существенное влияние на потенциал жиротложения в мышцах и итоговое качество мяса оказывает соотношение типов мышечных волокон. Окислительные мышечные волокна, богатые митохондриями, обладают более высоким естественным метаболическим потенциалом для накопления липидов, способствуя формированию ВМЖ. В то же время гликолитические волокна ориентированы в первую очередь на синтез сократительных белков и вносят меньший вклад в мраморность. Мышцы с преобладанием окислительных волокон характеризуются более высокой активностью липогенных ферментов и, как результат, повышенным содержанием внутримышечного жира. Эта связь напрямую влияет на технологические свойства мяса (Jung et al., 2015). У свиней с доминированием окислительного метаболизма в мышцах доля ВМЖ статистически выше, что напрямую коррелирует с повышенной нежностью (Fazarinc et al., 2020). Питание является мощным фактором для изменения состава волокон. Низкопротеиновые рационы могут индуцировать метаболический сдвиг в сторону окислительного типа волокон, что является одним из механизмов повышения мраморности (Wang et al., 2023). В финишный период откорма положительная корреляция между долей окислительных волокон и оценкой мраморности является показателем высокой сочности готового продукта (Zhang et al., 2021).

Современные практические стратегии кормления, основанные на глубоком понимании взаимосвязи белкового и жирового обмена, позволяют целенаправленно оптимизировать метаболические процессы у свиней. Это достигается за счёт фазированного кормления и применения низкопротеиновых рационов с добавлением эссенциальных аминокислот, что в итоге приводит к значительному повышению качества мяса и общей мясной продуктивности (EwaoluwaGbemiga et al., 2023).

### **Заключение**

Метаболизм белка и жира у свиней формирует сложную регуляторную сеть, координируемую общими сигнальными путями, гормонами и питательными веществами, что в конечном итоге определяет баланс между ростом тканей и энергетическим гомеостазом. Эндокринная регуляция играет критически важную роль в интеграции метаболических процессов. Питательные вещества являются не только субстратами, но и мощными регуляторами метаболической сети. Уровень и источник протеина, баланс эссенциальных аминокислот и тип углеводов изменяют гликемический ответ и секрецию инсулина, напрямую влияя на липогенез. Генетические и породные особенности задают базовый уровень эффективности метаболизма. Практические стратегии, такие как фазированное кормление и НП-рационы, позволяют целенаправленно управлять соотношением мясо/жир. Их эффективность опосредована увеличением содержания внутримышечного жира и зависит от метаболического типа мышечных волокон. Перспективные направления исследований лежат в области интеграции ряда факторов, в том числе таких как роль микробиоты и биологически активных добавок для эффективной регуляции белкового и жирового обмена.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки № 124020200032-4.*

### Список литературы

1. Allee G.L., O'Hea E.K., Leveille G.A., Baker D.H. Influenza of dietary protein and fat on lipogenesis and enzymatic activity in pig adipose tissue. // *J. Nutr.* 1971. Vol. 101. nr 7. P. 869-878. doi: 10.1093/jn/101.7.869
2. Allee G.L., Romsos D.R., Leveille G.A., Baker D.H. Lipogenesis and enzymatic activity in pig adipose tissue as influenced by source of dietary fat. // *J Anim. Sci.* 1972. Vol. 35. nr 1. P. 41-47. doi: 10.2527/jas1972.35141x
3. Applegate C.C., Kang Y., Deng H. et al. Nanomedicine targeting PPAR in adipose tissue macrophages improves lipid metabolism and obesity-induced metabolic dysfunction. // *Sci Adv.* 2025. Vol. 11. nr 39. eads3731. doi: 10.1126/sciadv.ads3731
4. Ballester M., Puig-Oliveras A., Castelló A., Revilla M., Fernández A.I., Folch J.M. Association of genetic variants and expression levels of porcine FABP4 and FABP5 genes. // *Anim. Genet.* 2017. Vol. 48. nr 6. P. 660-668. doi: 10.1111/age.12620
5. Barb C.R., Hausman G.J., Czaja K. Leptin: a metabolic signal affecting central regulation of reproduction in the pig. // *Domest Anim Endocrinol.* 2005. Vol. 29. nr 2. P. 186-192. doi: 10.1016/j.domaniend.2005.02.024.
6. Barb C.R., Hausman G.J., Houseknecht K.L. Biology of leptin in the pig. // *Domest. Anim. Endocrinol.* 2001. Vol. 21. nr 4. P. 297-317. doi: 10.1016/S0739-7240(01)00123-0
7. Benítez R., Fernández A., Isabel B. et al. Modulatory effects of breed, feeding status, and diet on adipogenic, lipogenic, and lipolytic gene expression in growing iberian and duroc pigs. // *International Journal of Molecular Sciences.* 2017. Vol. 19. nr 1. P. 22 doi: 10.3390/ijms19010022
8. Beyer E.S., Prill L.L., Rice E.A. et al. Pork quality attributes and eating characteristics among different premium and commodity pork loin programs. // *Meat and Muscle Biology.* 2023. Vol. 7. nr 1. P. 1-9. doi: 10.22175/mmb.16895
9. Camp Montoro J., Pessoa J., Solà-Oriol D., Muns R., Gasa J., Manzanilla E.G. Effect of phase feeding, space allowance and mixing on productive performance of grower-finisher pigs. // *Animals (Basel).* 2022. Vol. 12. nr 3. P. 390. doi: 10.3390/ani12030390
10. Cemin H.S., Tokach M.D., Woodworth J.C., Dritz S.S., DeRouchey J.M., Goodband R.D. Branched-chain amino acid interactions in growing pig diets. // *Translational Animal Science.* 2019. Vol. 3. nr 4. nr 1246-1253. doi: 10.1093/tas/txz087
11. Chang H.-W., McNulty N.P. et al. Gut microbiome contributions to altered metabolism in a pig model of undernutrition. // *Proc Nat. Acad. Sci. USA.* 2021. Vol. 118. nr 21. e2024446118. doi: 10.1073/pnas.2024446118
12. Chen C., Fang S., Wei H. et al. Prevotella copri increases fat accumulation in pigs fed with formula diets. // *Microbiome.* 2021. Vol. 9. nr 1. P. 175. doi: 10.1186/s40168-021-01110-0
13. Cline P., Tsai T.C., Lents C., Stelzleni A., Dove C., Azain M. Interaction of dietary carbohydrate and fat on glucose metabolism in growing pigs. // *Domestic Animal Endocrinology.* 2022. Vol. 78. e106655. doi: 10.1016/j.domaniend.2021.106655
14. Columbus D.A., Steinhoff-Wagner J. et al. Impact of prolonged leucine supplementation on protein synthesis and lean growth in neonatal pigs. // *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 2015. Vol. 309. nr 6. P. 601-610. doi: 10.1152/ajpendo.00089.2015
15. Cui J, Chen W, Liu J, Xu T, Zeng Y. Study on quantitative expression of PPAR $\gamma$  and ADRP in muscle and its association with intramuscular fat deposition of pig. // *Springerplus.* 2016. Vol. 5. nr 1. P. 1501. doi: 10.1186/s40064-016-3187-0
16. de Almeida A.M., Martins J.M., Campos A., Monteiro Moreira L. Productive, physiological, and environmental implications of reducing crude protein content in swine diets: a review. // *Animals.* 2024. Vol. 14. nr 21. P. 3081. doi: 10.3390/ani14213081
17. Ewaoluwegbemiga E.O., Bee G., Kasper C. Genetic analysis of protein efficiency and its association with performance and meat quality traits under a protein-restricted diet. // *Genetics Selection Evolution.* 2023. Vol. 55. nr 1. P. 35. doi: 10.1186/s12711-023-00812-3
18. Fanalli S.L., da Silva B.P.M., Petry B. et al. Dietary fatty acids applied to pig production and their relation to the biological processes: a review. // *Livestock Science.* 2022. Vol. 265. nr 11. e105092. doi: 10.1016/j.livsci.2022.105092
19. Farnworth E.R., Kramer J.K.G. Fat metabolism in growing swine: a review. // *Canad. J. Anim. Sci.* 1987. Vol. 67. nr 2. P. 301-318. doi: 10.4141/cjas87-029

20. Fazarinc G., Vrecl M., Poklukar K. et al. Expression of myosin heavy chain and some energy metabolism-related genes in the longissimus dorsi muscle of Krškopolje pigs: effect of the production system. // *Front. Vet. Sci.* 2020. nr 7. Epub. 533936. doi: 10.3389/fvets.2020.533936
21. Fernandez X., Monin G., Talmant A., Mourot J., Lebret B. Influence of intramuscular fat content on the quality of pig meat – 1. Composition of the lipid fraction and sensory characteristics of m. longissimus lumborum. // *Meat. Sci.* 1999. Vol. 53. nr 1. P. 59-65. doi: 10.1016/S0309-1740(99)00037-6
22. Fu H., Li Y., Ke F., Quan H. et al Protein feed-driven regulation of pig intestinal microbiota: Mechanisms underlying odor emission mitigation and development of sustainable deodorizing formulations. // *Resources, Environment and Sustainability.* 2025a. Vol. 21. Epub. 100245. doi: 10.1016/j.resenv.2025.100245
23. Fu H., Yang T., Ni H., Li J., Liu F., Liu J., Yin Y. A low-protein soybean-free diet improves carcass traits and meat quality and modulates the colonic microbiota in Daweizi pigs. // *Front. Vet. Sci.* 2025b. nr 11. Epub. 1516198. doi: 10.3389/fvets.2024.1516198
24. German J., Kim J., Schwartz G., Havel P., Rhodes C., Schwartz M., Morton G. Hypothalamic leptin signaling regulates hepatic insulin sensitivity via a neurocircuit involving the vagus nerve. // *Endocrinology.* 2009. Vol. 150. nr 10. P. 4502-4511. doi: 10.1210/en.2009-0445
25. Gloaguen M., Le Floch N., Brossard L., Barea R., Primot Y., Corrent E., van Milgen J. Response of piglets to the valine content in diet in combination with the supply of other branched-chain amino acids. // *Animal.* 2011. Vol. 5. nr 11. P. 1734-1742. doi: 10.1017/S1751731111000760
26. Goodarzi P., Habibi M., Gorton M.W., Walsh K., Tarkesh F., Fuhrig M., Pezeshki A. Dietary isoleucine and valine: effects on lipid metabolism and ureagenesis in pigs fed with protein restricted diets. // *Metabolites.* 2023. Vol. 13. nr 1. P. 89. doi: 10.3390/metabo13010089
27. Gu H., Zhou Y., Yang J., Li J. et al. Targeted overexpression of PPAR $\gamma$  in skeletal muscle by random insertion and CRISPR/Cas9 transgenic pig cloning enhances oxidative fiber formation and intramuscular fat deposition. // *FASEB J.* 2021. Vol. 35. nr 2. e21208. doi: 10.1096/fj.202001812RR
28. Guo Y., Wang L., Hanson A., Urriola P., Shurson G., Chen C. Identification of protective amino acid metabolism events in nursery pigs fed thermally oxidized corn oil. // *Metabolites.* 2023. Vol. 13. nr 1. P. 103. doi: 10.3390/metabo13010103
29. Habibi M., Shili C., Sutton J., Goodarzi P., Maylem E.R., Spicer L., Pezeshki A. Branched-chain amino acids partially recover the reduced growth of pigs fed with protein-restricted diets through both central and peripheral factors. // *Anim. Nutr.* 2021. Vol. 7. nr 3. P. 868-882. doi: 10.1016/j.aninu.2021.02.002
30. Habibi M., Shili C.N., Sutton J., Goodarzi P., Pezeshki A. Dietary branched-chain amino acids modulate the dynamics of calcium absorption and reabsorption in protein-restricted pigs. // *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 2022. Vol. 13. nr 1. P. 15. doi: 10.1186/s40104-021-00669-w
31. Han Y.G., Lee G.I., Do S.H., Jang J.C., Kim Y.Y. The effect of reduced crude protein on growth performance, nutrient digestibility, and meat quality in weaning to finishing pigs. // *Animals (Basel).* 2023. Vol. 13. nr 12. P. 1938. doi: 10.3390/ani13121938
32. Hardie D.G. AMP-activated protein kinase: an energy sensor that regulates all aspects of cell function. // *Genes Dev.* 2011. Vol. 25. nr 18. nr 1895-1908. doi: 10.1101/gad.1742011
33. He W., Wu F. Oxidation of amino acids, glucose, and fatty acids as metabolic fuels in enterocytes of developing pigs. // *Amino Acids.* 2022. Vol. 54. nr 7. P. 1025-1039. doi: 10.1007/s00726-022-03151-7
34. Heng J., Wu Z., Tian M., Chen J. et al. Excessive BCAA regulates fat metabolism partially through the modification of m6A RNA methylation in weanling piglets. // *Nutr. Metab. (Lond.).* 2020. vol. 17. P. 10. doi: 10.1186/s12986-019-0424-x
35. Hermesch S. Genetic improvement of lean meat growth and feed efficiency in pigs. // *Austral. J. Exp. Agric.* 2004. Vol. 44. nr 4-5. P. 1-9 doi: 10.1071/EA04017
36. Hocquette J.F., Gondret F., Baeza E., Médale F., Jurie C., Pethick D.W. Intramuscular fat content in meat-producing animals: Development, genetic and nutritional control, and identification of putative markers. // *Animal.* 2010. Vol. 4. nr 2. P. 303–319. doi: 10.1017/S1751731109991091
37. Hodkovicova N., Halas S., Tosnerova K., Stastny K., Svoboda M. The use of functional amino acids in different categories of pigs; a review. // *Vet. Med. (Praha).* 2023. Vol. 68. nr 8. P. 299–312. doi: 10.17221/72/2023-VETMED
38. Hong J.S., Lee G.I., Jin X.H., Kim Y.Y. Effect of dietary energy levels and phase feeding by protein levels on growth performance, blood profiles and carcass characteristics in growing-finishing pigs. // *J Anim. Sci. Tech.* 2016. Vol. 58. Epub: 37. doi: 10.1186/s40781-016-0119-z

39. Jobgen W.S., Lee M.-J., Fried S.K., Wu G. l-Arginine supplementation regulates energy-substrate metabolism in skeletal muscle and adipose tissue of diet-induced obese rats. // *Exp. Biol Med.* (Maywood). 2023. Vol. 248. nr 3. P. 209-216. doi: 10.1177/15353702221139207
40. Jung J.H., Shim K.S., Na C.S., Choe H.S. Studies on intramuscular fat percentage in live swine using real-time ultrasound to determine pork quality. // *Asian-Australas J Anim. Sci.* 2015. Vol. 28. nr 3. P. 318-322. doi: 10.5713/ajas.14.0927
41. Krishnan N., Bonham C.A., Rus I.A. et al. Harnessing insulin- and leptin-induced oxidation of PTP1B for therapeutic development. // *Nature Communications.* 2018. Vol. 9. nr 1. P. 283. doi: 10.1038/s41467-017-02252-2
42. Kudo T., Zhao M.L., Jeknić S., Kovary K.M., LaGory E.L., Covert M.W., Teruel M.N. Context-dependent regulation of lipid accumulation in adipocytes by a HIF1 $\alpha$ -PPAR $\gamma$  feedback network. // *Cell Syst.* 2023. Vol. 14. nr 12. P. 1074-1086.e7. doi: 10.1016/j.cels.2023.10.010
43. Laplante M., Sabatini D.M. mTOR signaling at a glance. // *J Cell Sci.* 2009. Vol. 122. nr 20. P. 3589–3594. doi: 10.1242/jcs.051011
44. Liao J., Zhang P., Yin J., Zhang X. New insights into the effects of dietary amino acid composition on meat quality in pigs: A review. // *Meat Sci.* 2025. Vol. 221. Epub: 109721. doi: 10.1016/j.meatsci.2024.109721
45. Liu H., Chen Y., Wang W., Jiang Z., Ma X., Wang F. Comparison of global metabolite for growing pigs fed at metabolizable energy requirement for maintenance. // *Front. Vet. Sci.* 2022. Vol. 9. Epub. 917033. doi: 10.3389/fvets.2022.917033
46. Liu Z, Xiao T, Liu H. Leptin signaling and its central role in energy homeostasis. // *Front. Neurosci.* 2023. N. 17. eCollection 1238528. doi: 10.3389/fnins.2023.1238528
47. Ma Y., Han X., Fang J., Jiang H. Role of dietary amino acids and microbial metabolites in the regulation of pig intestinal health. // *Animal Nutrition.* 2021. N. 9. P. 1-6. doi: 10.1016/j.aninu.2021.10.004
48. Malgwi I.H., Halas V., Grünvald P., Schiavon S., Jöcsák I. Genes related to fat metabolism in pigs and intramuscular fat content of pork: a focus on nutrigenetics and nutrigenomics. // *Animals (Basel).* 2022. Vol. 12. nr 2. P. 150. doi: 10.3390/ani12020150
49. Martins J.M., Albuquerque A., Silva D., Neves, J.A., Charneca R., Freitas A. Long-term physical activity modulates lipid metabolism and gene expression in muscle and fat tissues of Alentejano pigs. // *Agriculture.* 2025. Vol. 15. nr 19. P. 2047. doi: 10.3390/agriculture15192047
50. Noidad S., Limsupavanich R., Suwonsichon S., Chaosap C. Effect of visual marbling levels in pork loins on meat quality and Thai consumer acceptance and purchase intent. // *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 2019. Vol. 32. nr 12. P. 1923–1932. doi: 10.5713/ajas.19.0084
51. Oliveira M.J.K., Melo A.D.B., Marça D.A. et al. Effects of lowering dietary protein content without or with increased protein-bound and feed-grade amino acids supply on growth performance, body composition, metabolism, and acute-phase protein of finishing pigs under daily cyclic heat stress. // *J. Anim. Sci.* 2023 . Vol. 101. skac387. doi: 10.1093/jas/skac387
52. Palma-Granados P., García-Casco J.M. et al. Effect of protein-restricted diet during growing period on performance and carcass quality traits of Duroc x Iberian crossbred barrows under different management conditions. // *Livestock Science.* 2024. Vol. 279. nr 1. Epub.105374. doi: 10.1016/j.livsci.2023.105374
53. Panwar V., Singh A., Bhatt M. et al. Multifaceted role of mTOR (mammalian target of rapamycin) signaling pathway in human health and disease. // *Signal Transduct. Target Ther.* 2023. Vol. 8. nr 1. P. 375. doi: 10.1038/s41392-023-01608-z
54. Park H.S., Ju U.I., Park J.W. et al. PPAR $\gamma$  neddylation essential for adipogenesis is a potential target for treating obesity. // *Cell Death Differ.* 2016. Vol. 23. nr 8. P. 1296-1311. doi: 10.1038/cdd.2016.6
55. Poklukar K., Čandek-Potokar M., Batorek Lukač N., Tomažin U., Škrlep M. Lipid deposition and metabolism in local and modern pig breeds: a review. // *Animals (Basel).* 2020. Vol. 10. nr 3. P. 424. doi: 10.3390/ani10030424
56. Pomar C., Andretta I., Remus A. Feeding strategies to reduce nutrient losses and improve the sustainability of growing pigs. // *Front. Vet. Sci.* 2021. Vol. 8. Epub.742220. doi: 10.3389/fvets.2021.742220
57. Ponsuksili S, Siengdee P, Li S, Kriangwanich W., Oster M., Reyer H., Wimmers K. Effect of metabolically divergent pig breeds and tissues on mesenchymal stem cell expression patterns during adipogenesis. // *BMC Genomics.* 2024. Vol. 25. nr 1. P. 407. doi: 10.1186/s12864-024-10308-z
58. Ramsay T.G. Porcine leptin alters isolated adipocyte glucose and fatty acid metabolism. // *Domest. Anim. Endocrinol.* 2004. Vol. 26. nr 1. P. 11-21. doi: 10.1016/j.domaniend.2003.07.001

59. Rauw W.M., Baumgard L.H., Dekkers J.C.M. Review: Feed efficiency and metabolic flexibility in livestock. // *Animal*. 2025. Vol. 19. nr 1. Epub.101376. doi: 10.1016/j.animal.2024.101376
60. Reyer H., Oster M., Magowan E., Dannenberger D., Ponsuksili S., Wimmers K. Strategies towards improved feed efficiency in pigs comprise molecular shifts in hepatic lipid and carbohydrate metabolism. // *Intern. J. Mol. Sci.* 2017. Vol. 18. nr 8. P. 1674. doi: 10.3390/ijms18081674
61. Ricoult S.J., Manning B.D.. The multifaceted role of mTORC1 in the control of lipid metabolism. // *EMBO Rep.* 2013. Vol. 14. nr 3. P. 242-251. doi: 10.1038/embor.2013.5
62. Rincker P.J., Killefer J., Ellis M., Brewer M.S., McKeith F.K. Intramuscular fat content has little influence on the eating quality of fresh pork loin chops. // *J. Anim. Sci.* 2008. Vol. 86. nr 3. P. 730-737. doi: 10.2527/jas.2007-0490
63. Rocha G.C., Duarte M.E., Kim S.W. Advances, implications, and limitations of low-crude-protein diets in pig production. // *Animals (Basel)*. 2022. Vol. 12. nr 24. P. 3478. doi: 10.3390/ani12243478
64. Rosen E.D., Sarraf P., Troy A.E., Bradwin G., Moore K., Milstone D.S., Spiegelman B.M., Mortensen R.M. PPAR gamma is required for the differentiation of adipose tissue in vivo and in vitro. // *Molecular Cell*. 1999. Vol. 4. nr 4. P. 611-617. doi: 10.1016/s1097-2765(00)80211-7
65. Salgado H.H., Pomar C., Palin M-F. et al. Insulin sensitivity is associated with the observed variation of de novo lipid synthesis and body composition in finishing pigs. // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 26. nr 1. Epub. 14586. doi: 10.1038/s41598-022-18799-0
66. Sarri L., Balcells J., Seradj A.R., de la Fuente G. Protein turnover in pigs: A review of interacting factors. // *J Anim. Phys. and Anim. Nutrit. (Berl)*. 2024. Vol. 108. nr 2. P. 451-469. doi: 10.1111/jpn.13906
67. Saxton R.A., Sabatini D.M. mTOR Signaling in growth, metabolism, and disease. // *Cell*. 2017. Vol. 168. nr 6. P. 960-976. doi: 10.1016/j.cell.2017.02.004
68. Schumacher M., DelCurto-Wyffels H., Thomson J., Boles J. Fat deposition and fat effects on meat quality – a review. // *Animals (Basel)*. 2022. Vol. 12. nr 12. P. 1550. doi: 10.3390/ani12121550
69. Škrlep M., Poklukar K., Millet S., Čandek-Potokar M. Reducing protein levels in diets for local pig breeds: a case study on fat-type krškopolje pig. // *Anim. Sci. J.* 2025. Vol. 96. nr 1. e70077. doi: 10.1111/asj.70077
70. Škrlep M., Poklukar K., Vrecl M., Brankovič J., Čandek-Potokar M. Growth performance, carcass quality, and lipid metabolism in Krškopolje pigs and modern hybrid pigs: comparison of genotypes and evaluation of dietary protein reduction. // *Animals (Basel)*. 2024. Vol. 14. nr 22. P. 3331. doi: 10.3390/ani14223331
71. Souza F.N.C., Genova J.L., Gregory C.R. et al. Low- and high-protein diets supplemented up to the fourth limiting amino acid for genetic lines of grower-finisher pigs. // *Livestock Sci.* 2023. Vol. 267. Epub.105144. doi: 10.1016/j.livsci.2022.105144
72. Spring S., Premathilake H., Bradway C. et al. Effect of very low-protein diets supplemented with branched-chain amino acids on energy balance, plasma metabolomics and fecal microbiome of pigs. // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. nr 1. Epub.15859. doi: 10.1038/s41598-020-72816-8
73. Stanford S.M., Bottini N. Targeting tyrosine phosphatases: time to end the stigma. // *Trends Pharmacol. Sci.* 2017. Vol. 38. nr 6. P. 524-540. doi: 10.1016/j.tips.2017.03.004
74. Stonehouse G.G., Hughes S.I., Hallett K., Stewart A. Effects of low protein diets on fat deposition in the whole body and within the muscle and subcutaneous adipose tissue of pigs. // *Proc. Brit. Soc. Animal Sci.* 2017. Vol. 9. nr 4. P. 102. DOI: 10.1017/S1752756200029410
75. Sun J., Xie F. et al. Integrated meta-omics reveals the regulatory landscape involved in lipid metabolism between pig breeds. // *Microbiome*. 2024. Vol. 12. nr 1. P. 33. doi: 10.1186/s40168-023-01743-3
76. Tang S., Xie J., Wu W., Yi B., Liu L., Zhang H. High ammonia exposure regulates lipid metabolism in the pig skeletal muscle via mTOR pathway. // *Science of the Total Environment* 2020. Vol. 740. Epub. 139917. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139917
77. Tejada J.F., Hernández-Matamoros A., Paniagua M., González E. Effect of free-range and low-protein concentrated diets on growth performance, carcass traits, and meat composition of iberian pig. // *Animals (Basel)*. 2020. Vol. 10. P. 273. doi: 10.3390/ani10020273
78. Teng T., Sun G., Ding H., Song X., Bai G., Shi B., Shang T. Characteristics of glucose and lipid metabolism and the interaction between gut microbiota and colonic mucosal immunity in pigs during cold exposure. // *J Anim. Sci. and Biotech.* 2023. Vol. 14. nr 1. P. 84. doi: 10.1186/s40104-023-00886-5
79. Torres-Rovira L., Astiz S., Caro A. et al. Diet-induced swine model with obesity/leptin resistance for the study of metabolic syndrome and type 2 diabetes. // *ScientificWorldJournal*. 2012. Vol. 2012. Epub. 510149. doi: 10.1100/2012/510149

80. Van Kempen T.A.T.G., Zijlstra R.T. Eat like a pig to combat obesity. // *Metabolites*. 2023. Vol. 13. nr 3. P. 420. doi: 10.3390/metabo13030420
81. Vasquez R., Oh J.K., Song J.H., Kang D.K. Gut microbiome-produced metabolites in pigs: a review on their biological functions and the influence of probiotics. // *J. Anim. Sci. Technol.* 2022. Vol. 64. nr 4. P. 671-695. doi: 10.5187/jast.2022.e58
82. Wang B., Qin K., Qi K., Zhang R., Xu Z., Men X. Construction of a molecular regulatory network for lipids and volatile flavor in Chinese indigenous and hybrid pig pork through integrating multi-omics analysis. // *LWT*. 2024. Vol. 199. nr 5. Epub. 116143. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116143
83. Wang D., Chen G., Li W., Chai M., Zhang H., Su Y. Effects of low protein diet on production performance and intestinal microbial composition in pigs. // *Vet. Sci.* 2023. Vol. 10. nr 11. P. 655. doi: 10.3390/vetsci10110655
84. Wang J., Zhu H., Li H., Xia S. et al. Metabolic and microbial mechanisms related to the effects of dietary wheat levels on intramuscular fat content in finishing pigs. // *Meat Sci.* 2024. Vol. 216. Epub: 109574. doi: 10.1016/j.meatsci.2024.109574
85. Wang Y., Zhou J., Wang G., Cai S., Zeng X., Qiao S. Advances in low-protein diets for swine. // *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 2018. Vol. 9. P. 60. doi: 10.1186/s40104-018-0276-7
86. Wood J.D., Lambe N.R., Walling G.A. et al. Effects of low protein diets on pigs with a lean genotype. 1. Carcass composition measured by dissection and muscle fatty acid composition. // *Meat Science*. 2013. Vol. 95. nr 1. P. 123-128. doi: 10.1016/j.meatsci.2013.03.001
87. Wu, T., Li K., Lyu Y., Yi D. et al. Trilactic glyceride regulates lipid metabolism and improves gut function in piglets. // *Front. Biosci. (Landmark Ed.)*. 2020. Vol. 25. nr 7. P. 1324-1336. doi: 10.2741/4858
88. Yan E., Guo J., Yin J. Nutritional regulation of skeletal muscle energy metabolism, lipid accumulation and meat quality in pigs. // *Anim. Nutr.* 2023. Vol. 14. nr 9. P. 185-192. doi: 10.1016/j.aninu.2023.04.009
89. Yang R., Barouch L.A. Leptin signaling and obesity: cardiovascular consequences. // *Circ. Res.* 2007. Vol. 101. nr 6. P. 545-559. doi: 10.1161/CIRCRESAHA.107.156596
90. Yang Y., Chen Y., Wang L., Du M., Zhang R., Lu Y., Pan S. Ssc-miR-130b enhances cell proliferation and represses adipogenesis of primary cultured intramuscular preadipocytes in pigs. // *Vet. Sci.* 2025. Vol. 12. nr 4. P. 375. doi: 10.3390/vetsci12040375
91. Yang Z., Liao S.F. Physiological effects of dietary amino acids on gut health and functions of swine. // *Front. Vet. Sci.* 2019. Vol. 6. P. 169. doi: 10.3389/fvets.2019.00169
92. Ye C., Zeng X., Zhu J., Liu Y., Ye Q., Qiao S., Zeng X. Dietary N-carbamylglutamate supplementation in a reduced protein diet affects carcass traits and the profile of muscle amino acids and fatty acids in finishing pigs. // *J Agric. Food. Chem.* 2017. Vol. 65. nr 28. P. 5751-5758. doi: 10.1021/acs.jafc.7b02301
93. Yi W., Huang Q., Wang Y., Shan T. Lipo-nutritional quality of pork: The lipid composition, regulation, and molecular mechanisms of fatty acid deposition. // *Anim. Nutr.* 2023. Vol. 13. nr 5. P. 373-385. doi: 10.1016/j.aninu.2023.03.001
94. Zhang L., Li F., Guo Q., Duan Y. et al. Different proportions of branched-chain amino acids modulate lipid metabolism in a finishing pig model. // *J Agric. Food Chem.* 2021. Vol. 69. nr 25. P. 7037-7048. doi: 10.1021/acs.jafc.1c02001
95. Zhang P., Zhang B., Shang P., Fu Y., Nie R., Chamba Y., Zhang H. Comparative transcriptomic profiles of differentiated adipocytes provide insights into adipogenesis mechanisms of subcutaneous and intramuscular fat tissues in pigs. // *Cells*. 2022. Vol. 11. nr 3. P. 499. doi: 10.3390/cells11030499
96. Zhang, S., Xiang Y., Jian Y. et al. Uncovering molecular mechanisms of feed efficiency in pigs through multi-omics analysis of the jejunum. // *Animals (Basel)*. 2025. Vol. 15. nr 2. P. 137. doi: 10.3390/ani15020137
97. Zhao S., Wang J., Song X., Zhang X., Ge C., Gao S., Impact of dietary protein on lipid metabolism-related gene expression in porcine adipose tissue. // *Nutr. Metab. (Lond.)*. 2010. Vol. 7. Article number: 6. doi: 10.1186/1743-7075-7-6
98. Zhao Y., Tian G., Chen D., Zheng P. et al. Effect of different dietary protein levels and amino acids supplementation patterns on growth performance, carcass characteristics and nitrogen excretion in growing-finishing pigs. // *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 2019. Vol. 10. P. 75. doi: 10.1186/s40104-019-0381-2
99. Zhou X., Zhang J., Shen J., Cheng B., Bi C., Ma Q. Branched-chain amino acid modulation of lipid metabolism, gluconeogenesis, and inflammation in a finishing pig model: targeting leucine and valine. // *Food & Function*. 2023. Vol. 14. nr 22. P. 10119-10134. doi: 10.1039/d3fo03899h

100. u C., Yang J., Wu Q., Chen J., Yang X., Wang L., Jiang Z. Low protein diet improves meat quality and modulates the composition of gut microbiota in finishing pigs. // Front. Vet. Sci. 2022. Vol. 9. Article: 843957. doi: 10.3389/fvets.2022.843957

UDC 636.4:577.15:636.084/087

**The relationship between protein and fat metabolism in pigs:  
molecular mechanisms, feed regulation, and impact on productivity: a review**

Panyushkin D.E.

*Institute of Animal Physiology, Biochemistry and Nutrition,  
branch of the Federal Research Center of Animal Husbandry, Ernst VIZh,  
Borovsk, Kaluga oblast, Russian Federation*

**ABSTRACT.** Pig farming remains a key sector of animal husbandry, supplying the global market with high-quality protein products. The relationship between protein and fat metabolism in pigs is a key factor determining productivity, meat quality, and the economic efficiency of pig farming. The central problem is the metabolic imbalance between muscle protein synthesis (proteogenesis) and body fat deposition (lipogenesis), leading to significant nutrient losses in feed and deterioration of carcass quality. The main sections of the review: the main relationships between protein and lipid metabolism in pigs (metabolism and energy balance, key organs and tissues), molecular mechanisms of interconnected regulation (coregulation) (the central role of the mTOR signaling pathway, peroxisome proliferator-activated receptors, insulin and leptin signaling pathways), environmental and physiological factors influencing protein and lipid metabolism (diet composition, genetic factors and breed characteristics, physiological state and growth stages), practical aspects in pig breeding. Phased feeding and the use of low-protein diets balanced in synthetic amino acids allow to optimize the meat/fat ratio, improve meat quality (tenderness, juiciness, marbling due to intramuscular fat) and reduce the environmental load by reducing nitrogen excretion.

*Keywords: pigs husbandry, protein metabolism, lipid metabolism, energy balance, hormonal regulation, signaling pathways, insulin, leptin, meat quality.*

*Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive Animal Biology). 2025. 4: 23-40.*

Поступило в редакцию: 15.10.2025

Получено после доработки: 19.12.2025

Сведения об авторах:

**Панюшкин Дмитрий Евгеньевич**, к.б.н., м.н.с., panyshkin@yandex.ru