

Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 4. С. 68-79.  
Animal Husbandry and Fodder Production. 2023. Vol. 106, no 4. P. 68-79.

Научная статья  
УДК 636.4:636.082.11  
doi:10.33284/2658-3135-106-4-68

### Диагностика мутации в гене *PHKG1*, детерминирующей PSE-синдром у свиней

Ольга Сергеевна Романенкова<sup>1</sup>, Ольга Васильевна Костюнина<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста, Дубровицы, Россия

<sup>1</sup>y7tteaip@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2682-6164>

<sup>2</sup>kostolan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8206-3221>

**Аннотация.** Интенсификация селекции на повышение продуктивности существенно повлияла на скорость роста свиней, однако негативным образом сказалась на качестве мяса. Таким образом, повышение качества мясной продукции остаётся актуальной проблемой свиноводства. Наиболее распространённым дефектом свинины является PSE. Этот порок проявляется в повышенной интенсивности окислительных процессов в мясе, в результате чего мясо становится непригодным для последующей технологической обработки. Различные неблагоприятные факторы приводят к появлению PSE-мяса свиней с пониженными технологическими характеристиками. Сложность разработки профилактических мер для снижения частоты возникновения животных с таким пороком в стаде обусловлена тем, что, как правило, такие животные выявляются уже после убоя. Методами молекулярной генетики были идентифицированы гены, ассоциированные с параметрами продуктивности свиней, в том числе с интенсивностью окислительных процессов в мясе, определена их хромосомная локализация и нуклеотидная последовательность. Одним из таких генетических маркеров является полиморфизм в гене *PHKG1*. Целью настоящей работы была разработка тест-системы анализа полиморфизма в гене *PHKG1* (g.8283, C>A), влияющего на качество свинины в послеубойный период, и исследование частоты встречаемости аллелей и генотипов у свиней различных пород. В лаборатории молекулярной генетики сельскохозяйственных животных ФГБНУ ВИЖ имени Л.К. Эрнста была разработана тест-система на основе метода полимеразной цепной реакции с детекцией результатов в реальном времени. Выделение геномной ДНК производилось с помощью набора реагентов «К-Сорб-100». Определение генотипов проводили по характеру кривых флуоресценции. Была исследована выборка свиней, включающая 100 образцов свиней крупной белой породы, 100 образцов свиней породы ландрас, 100 образцов свиней породы дюрок и 240 образцов гибридов F2. Впервые был изучен полиморфизм гена *PHKG1* в выборке свиней российской репродукции и установлена частота встречаемости нежелательного аллеля А.

**Ключевые слова:** свиньи, качество мяса, эксудативное мясо, PSE-синдром, тест-система, однонуклеотидный полиморфизм, ген, *PHKG1*

**Благодарности:** работа выполнена в соответствии с планом НИР за 2021-2023 гг. ФГБНУ ВИЖ имени Л.К. Эрнста (№ 0445-2021-0016).

**Для цитирования:** Романенкова О.С., Костюнина О.В. Диагностика мутации в гене *PHKG1*, детерминирующей PSE-синдром у свиней // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 4. С. 68-79. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-68>

Original article

### Diagnosis of a mutation in the *PHKG1* gene that determines PSE syndrome in pigs

Olga S Romanenkova<sup>1</sup>, Olga V Kostyunina<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member LK Ernst, Dubrovitsy, Russia

<sup>1</sup>y7tteaip@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2682-6164>

<sup>2</sup>kostolan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8206-3221>

**Abstract.** The intensification of selection to increase productivity significantly affected the growth rate of pigs, but had a negative impact on meat quality. Thus, improving the quality of meat products remains an urgent problem in pig farming. The most common defect in pork is PSE. This defect manifests

itself in the increased intensity of oxidative processes in meat, as a result of which meat becomes unsuitable for subsequent technological processing. Various unfavorable factors lead to the appearance of PSE pork with reduced technological characteristics. The difficulty of developing preventive measures to reduce the incidence of animals with such a defect in the herd is because, as a rule, such animals are identified after slaughter. Using molecular genetics methods, genes associated with pig productivity parameters, including the intensity of oxidative processes in pork, were identified, their chromosomal localization and nucleotide sequence were determined. One of these genetic markers is polymorphism in the *PHKG1* gene. The aim of this work was to develop a test system for analyzing polymorphism in the *PHKG1* gene (g.8283, C>A), which affects the quality of pork in the post-slaughter period and to study the frequency of occurrence of alleles and genotypes in pigs of various breeds. Laboratory of molecular genetics of farm animals of the Federal State Budgetary Scientific Institution VIZh named after L.K. Ernst developed a test system based on the polymerase chain reaction method with real-time detection of results. Genomic DNA was isolated using the K-Sorb-100 reagent kit. Genotypes were determined by the nature of the fluorescence curves. A sample of pigs was studied, including 100 samples of Large White pigs, 100 samples of Landrace pigs, 100 samples of Duroc pigs and 240 samples of F2 hybrids. For the first time, the polymorphism of the *PHKG1* gene was studied in a sample of Russian reproduction pigs and the frequency of occurrence of the undesirable allele A was determined.

**Keywords:** pigs, meat quality, exudative meat, PSE syndrome, test system, single nucleotide polymorphism, gene, *PHKG1*

**Acknowledgments:** the work was performed in accordance to the plan of research works for 2021-2023 Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member LK Ernst (No. 0445-2021-0016).

**For citation:** Romanenkova OS, Kostyunina OV. Diagnosis of a mutation in the *PHKG1* gene that determines PSE syndrome in pigs. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):68-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-68>

### **Введение.**

Мясо в питании человека является важным источником энергии, животных белков и микронутриентов (Кешабянц Э.Э. и др., 2023). Свинина – это один из наиболее потребляемых видов мяса в мире. Объём совокупного мирового производства свинины в 2020 году составил 106,53 млн тонн, при этом за последние пять лет наблюдался и рост доли России в данном сегменте с 2,82 % до 3,63 %, наибольший удельный вес свинины в общем объёме мясных ресурсов составил 41,6 % (Хайруллина О.И., 2021). Примерно на 33-35 % рынок мяса и мясопродуктов России формируется за счёт мяса свиней (Макин М.В. и Афанасьев А.А., 2020). Современная промышленная технология свиноводства обеспечивает высокую интенсивность и экономическую эффективность производства свинины, но при этом связана с многочисленными экстремальными воздействиями на организм животного: большая скученность животных на ограниченной территории, недостаток естественного освещения, адинамия, длительная транспортировка, концентратный тип кормления (Козминская А.С., 2017). Данные факторы являются причиной понижения продуктивных показателей, ослабления иммунитета животных, ухудшения качества свинины и снижения устойчивости к стрессу. Одной из наиболее важных проблем является ухудшение качества свинины, возникновение порока мяса PSE (Pale, Soft, Exudative – бледное, мягкое, водянистое). PSE-порок вызывается процессом ускоренного распада гликогена до молочной кислоты в мышцах свиней и проявляется в течение 45 минут после убоя (Остренко К.С. и Полякова Л.Л., 2020) После обескровливания миоциты попадают в гипоксически-ишемическую среду, ускоряя гликолиз и энергетический обмен, что приводит к накоплению молочной кислоты и снижению pH. Как только pH мышечных белков падает до изоэлектрической точки, промежутки между толстыми и тонкими нитями начинают сужаться, а пространство между миофибриллами начинает сжиматься, что способствует снижению влагоудерживающей способности мяса. Когда потеря влаги миоцитами достигает определённой степени, нити становятся тоньше, а отражательная способность падающего света снижается, что приводит к бледности. При воздействии высоких температур денатурация мышечного белка ускоряется, а влагоудерживающая способность снижается (Zequan X et al., 2021). PSE-свинина отлича-

ется плохими технологическими свойствами и органолептическими показателями, что существенно затрудняет её использование при производстве копчёностей, сырокопчёных колбас, рубленых полуфабрикатов и мясных консервов. Такое мясо – более водянистое, имеет бледный цвет, а также подвержено быстрому окислению и микробиологической порче (Орлова О.Н. и др., 2020). Переработка PSE-свинины связана с дополнительными затратами и технологическими сложностями. Такое мясо рекомендуется использовать для производства только в сочетании с мясом нормального качества или различными белками, или при введении фосфатов. По данным исследований Орловой О.Н., количество свинины с пороком PSE, полученной на мясоперерабатывающих предприятиях Ростовской области, составляет от 40 до 65 % от общего количества сырья. При этом доля PSE-свинины возрастает с увеличением длительности транспортировки животных (Орлова О.Н. и др., 2018). По данным Trevisan L и Brum JS (2020), частота встречаемости свиней с пороком PSE составила 19,17 %.

Снижение качества мяса с пороком PSE подтверждено многочисленными исследованиями. Так, Лясота В.П. и коллеги (2020) обнаружили в мясе PSE в 1,5 раза большее количество микроорганизмов (в основном Гр+ палочки) ( $P \leq 0,001$ ) по сравнению с контролем. Это характерно при повышенной водянистости мяса и приводит к обсеменению его микрофлорой. Занижен также показатель pH до  $5,62 \pm 0,02$ . По показателю оптической плотности интенсивности цвета свинины качества PSE наблюдались значения в 1,34 раза меньше ( $P \leq 0,001$ ) по сравнению с контролем, по общему содержанию пигментов качества свинины PSE – в 1,64 раза меньше ( $P \leq 0,001$ ) относительно показателей качества свинины NOR. Одними из наиболее важных физико-химических характеристик мяса, значительно влияющих на его качество, являются такие показатели как влагоудерживающая способность (ВУС) и влагосвязывающая способность (ВСС). Показано, что минимальное значение ВСС у PSE-свинины в первые сутки хранения составляло 43,54 %, что на 12,91 % ниже, чем у NOR-мяса, также мясо с признаками PSE характеризовалось меньшей влагоудерживающей способностью на протяжении всего исследования (Шкабров О.В. и др., 2020).

К появлению мяса с признаками PSE может привести синдром стресса свиней (PSS Porcine Stress Syndrome). Среди методов, применяемых для снижения стресса, можно выделить три основных подхода. Технологический подход подразумевает соблюдение зоотехнических условий содержания, типа кормления, моциона (Сыса Л.В. и Сыса С.А., 2022). Фармацевтический метод включает в себя применение различных препаратов, таких как адаптогены, антиоксиданты, иммуномодуляторы, детоксиканты, пробиотики (Успешный А.В. и др., 2021; Быкова А.А. и Швагер О.В., 2021). Генетические методы профилактики чувствительности к стрессам базируются, прежде всего, на ДНК-диагностике животных по генам, ассоциированным со стрессоустойчивостью или с содержанием гликогена.

После убоя мышечный гликоген свиней преобразуется в лактат путём гликолиза, и это накопление лактата приводит к снижению pH. Поскольку уровень гликогена в большей степени зависит от генетических факторов, чем от факторов окружающей среды, мероприятия, направленные на выявление вредных генетических мутаций вариантов, позволят улучшить продуктивные качества свиней и повысить эффективность отрасли в целом (Xie X et al., 2023). В отечественных и зарубежных публикациях имеются данные о нескольких генах, связанных с проявлениями стресса у свиней. Однонуклеотидная замена 1843C>T в гене *RYR1* (p. Arg615Cys) обуславливает развитие у животных злокачественной гипертермии – наследуемого синдрома, проявляющегося как состояние острого гиперметаболизма скелетной мускулатуры с повышенным потреблением кислорода, накоплением лактата и продукцией большого количества углекислого газа и тепла. Носители мутантного аллеля имеют дефект регуляции высвобождения ионов  $Ca^{2+}$ , что приводит к злокачественной гипертермии (Acosta DB et al., 2020). В генетической структуре по локусу гена *RYR1* свиней идентифицированы следующие генотипы: *RYR1*\_NN – стрессоустойчивые носители, *RYR1*\_Nn – стрессоустойчивые скрытые носители, *RYR1*\_nn – стрессчувствительные носители (Василюк О.Я. и др., 2020). Поскольку полиморфизм в гене *RYR1* ассоциирован с высоким содержанием постного мяса в туше, то отбор животных по мясности способствовал значительному росту частоты встреча-

емости мутации 1843C>T в популяциях свиней. Однако появление генетического теста для выявления носителей мутантного аллеля позволило нивелировать его частоту. Романишко Е.Л. и коллеги (2021) с использованием метода KASP исследовали полиморфизм 1843C>T и не обнаружили носителей среди свиней пород ландрас, йоркшир и дюрок. Таким образом, в некоторых случаях возникновение порока PSE в свинине может обусловлено другими мутациями.

Ещё одна известная мутация, связанная с риском возникновения PSE, представляет собой замену R200Q (p.Arg225Gln) в гене субъединицы гамма АМФ-активируемой протеинкиназы *PRKAG3* (Dall'Olio S et al., 2018), которая приводит к усилению базальной активности фермента и, как следствие, к бледному мясу с низким значением pH и низкой водоудерживающей способностью. Полногеномные ассоциативные исследования (GWAS), проведённые на 5 тыс. головах свиней, принадлежащих Pig Improvement Company (PIC; Hendersonville, TN), также подтвердили ассоциацию региона миссенс-мутации в гене *PRKAG3* с показателями уровня pH свинины (Desire S et al., 2023). Исследование влияния этой мутации на качественные признаки мяса гибридных свиней F2 с генотипами RQ и RR показало весьма значимые различия по всем тестируемым признакам, включая уровень остаточного гликогена и лактата, гликолитического потенциала, pH 36 ч, потерю влаги и три цветовых параметра мяса (L\*, a\*, b\*). Примечательно, что особи с генотипом RQ имели почти в пять раз более высокий уровень остаточного гликогена (P=5,75e-49) и вдвое большую потерю влаги (P=2,93e-12), чем животные с генотипом RR, что подтверждает сильное влияние мутации R200Q (RN –) на качество мяса гибридных свиней F2 (Liu X et al., 2019). Помимо замены p.Arg225Gln в гене *PRKAG3* у других пород свиней были выявлены мутации, такие как T30N (p.Thr30Asn), G52S (p.Gly52Ser), и I199V (p.Ile199Val), для которых была подтверждена ассоциация с более высокими показателями качества мяса (Liu X et al., 2019). Liu X с коллегами была идентифицирована область между 114,8 и 121,4 Мб на SSC15, содержащая множество SNP, значимо связанных с уровнем остаточного гликогена и лактата, pH 36 ч, потерей влаги, цветовыми показателями. Более того, эта область содержит ген *PRKAG3* (120,86 Мб), который, как было показано, влияет на эти качества мяса у свиней породы гемпшир. Таким образом, *PRKAG3* является наиболее вероятным геном для качественных показателей мяса, исходя из его положения и функциональной аннотации.

Ещё одна мутация (g.8283, C>A) была идентифицирована в гене фосфорилазы киназы каталитической субъединицы гамма 1 (*PHKG1*) (Ma J et al., 2014; Liu Y et al., 2019). Было подтверждено, что эта мутация способна снижать активность фосфорилазы киназы и приводить к увеличению гликолитического потенциала, высокой скорости снижения pH и увеличению потери влаги в мясе (Zarraterra M et al., 2019). Наличие точечной мутации (rs330928088) в акцепторном сайте сплайсинга интрона 9 в гене *PHKG1* приводит к делеции 32 п.н. в открытой рамке считывания (ORF) и генерирует преждевременный стоп-кодон. Liu X с коллегами (2019) включили *PHKG1* g.8283C>A в GWAS, чтобы оценить его потенциальный вклад в сигнал QTL. Как и ожидалось, этот ранее обнаруженный причинный вариант показал весьма значимую связь с уровнем остаточного гликогена (P=1,85e-9) и потерей влаги (P=1,90e-3), а его минорный аллель «А» (MAF=0,049) увеличивал уровень остаточного гликогена и потерю влаги с аддитивными эффектами 5,82 мкмоль/г и 0,67 % соответственно. Более того, когда SNP g.8283C>A был включен в модель в качестве фиксированного эффекта, все протестированные SNP в этом регионе QTL больше не были значимыми.

Помимо известных генов-кандидатов *PRKAG3* и *PHKG1* с помощью GWAS были идентифицированы два новых гена-кандидата *LRATD1* и *TMCO1* на SSC3 и SSC4 соответственно (Liu X et al., 2019). Ген *TMCO1* кодирует трансмембранный белок эндоплазматической сети, который формирует функциональный кальций-селективный канал, предотвращающий переполнение запасов Ca<sup>2+</sup>. SNP rs319599168 (g.84976996C>T), обнаруженный при помощи GWAS, расположен в интроне этого гена. Интересно, что другой ген кальциевого канала, *RYR1*, который кодирует рианодинный рецептор, присутствующий в скелетных мышцах и опосредующий высвобождение Ca<sup>2+</sup> из саркоплазматического ретикулума в цитоплазму, также содержит мутации, которые вызывают у свиней предрасположенность к злокачественной гипертермии и приводит к получению

PSE-свинины. Также значимый SNP rs81347579, идентифицированный с помощью GWAS, был картирован на 57 т.п.н. ниже гена *СКВ*, кодирующего креатинкиназу, которая обратимо катализирует перенос фосфата между АТФ и различными фосфогенами. Креатинкиназа влияет на уровни АТФ и АДФ, которые имеют решающее значение для хранения гликогена у живых свиней, а также для скорости анаэробного гликолиза и снижения рН после убоя, ген *СКВ* является многообещающим кандидатом для уровня остаточного гликогена (Liu X et al., 2019). Таким образом, идентификация генетических вариантов генов, ассоциированных с качественными показателями мяса, в частности с гликолитическим потенциалом и уровнем остаточного гликогена, может быть применима в селекционно-племенной работе для получения высококачественной продукции.

#### **Цель исследования.**

Разработка молекулярно-генетической тест-системы анализа полиморфизма гена *PHKG1* и исследование частот распространения животных-носителей в популяциях свиней российской репродукции.

#### **Материалы и методы исследования.**

**Объект исследования.** Образцы ткани (ушной выщип) свиней пород ландрас (n=100), крупная белая (n=100), дюрок (n=100) и гибриды F2 (n=240).

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов (Приказ Минздрава СССР № 755 от 12.08.1977 «О мерах по дальнейшему совершенствованию организационных форм работы с использованием экспериментальных животных») и «Guide for the Care and Use of Laboratory Animals» (National Academy Press, Washington, D.C., 1996). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

**Схема эксперимента.** Нами был разработан дизайн тест-системы диагностики полиморфизма гена *PHKG1* g.16830320 C>A (rs330928088). В качестве базового метода для моделирования тест-системы оценки полиморфизма в гене *PHKG1* был использован метод ПЦР в реальном времени (RT-PCR). Опираясь на данные о нуклеотидных последовательностях гена, а также о фланкирующих областях мутации из баз данных OMIA и NCBI в программе Primer 3 web (Koressaar T et al., 2018) были подобраны праймеры и зонды для ПЦР-амплификации – For - TGGAGGGGGAGAGACAGGTT, Rev - ACAGAAGCCAGCACCGTCAGA, FAM - CCGGACTCGCGCAGGTGAT - BHQ1, R6G - CCGGACTCGAGCAGGTGATC - BHQ1.

Выделение ДНК производили с помощью набора «К-Сорб-100» (ЗАО «Синтол», Россия) в соответствии с инструкцией производителя. ПЦР выполняли в конечном объеме 15 мкл реакционной смеси, содержащей 10xПЦР буфера (16.6 mM (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 67.7 mM Трис-НCl, pH=8.8, 0.1 % (v/v) Tween 20, 1.5 mM MgCl<sub>2</sub>), 0,5 mM MgCl<sub>2</sub>, 200мкМ дНТП, 30 пмоль каждого из праймеров и зондов, 1 Ед Taq-полимеразы и 1 мкл тестируемой ДНК. Реакции выполняли в следующем температурно-временном режиме: начальная денатурация +95 °С – 10 мин., 50 циклов +95 °С – 30 с, +60 °С – 45 ск. Детекция результатов генотипирования животных в режиме реального времени проводилась по характеру кривых флуоресценции.

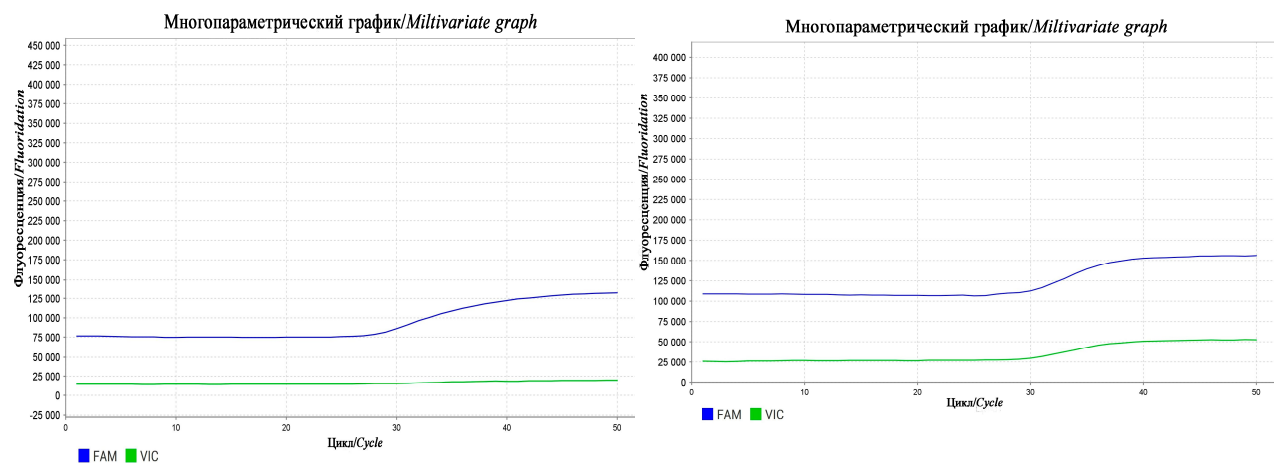
**Оборудование и технические средства.** Работа была выполнена в лаборатории молекулярной генетики сельскохозяйственных животных ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. Для проведения ПЦР использовали прибор Quant Studio 5 (AppliedBiosystems, США).

**Статистическая обработка.** Статистический анализ выполняли с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США).

#### **Результаты исследования.**

Апробацию разработанной тест-системы проводили на племенных свиньях пород крупная белая, ландрас, дюрок и гибридах F2 в лаборатории молекулярной генетики сельскохозяйственных животных ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста в 2023 году.

На рисунке 1 показаны кривые флуоресценции, полученные при генотипировании с использованием предложенной тест-системы идентификации генотипов по гену *PHKG1*.



**Рис. 1 – Кривые флуоресценции при генотипировании с использованием тест-системы идентификации генотипов по гену *PHKG1*. Канал VIC – *PHKG1\_A*, канал FAM – *PHKG1\_C*. (Левый график – генотип CC, правый график – генотип AC)**

**Figure 1 – Fluorescence curves during genotyping using a test system for identifying genotypes by the *PHKG1* gene. The VIC channel is *PHKG1\_A*, the FAM channel is *PHKG1\_C*. (Left graph CC genotype right graph AC genotype)**

Как показано на рисунке 1, идентификация генотипов производится по наличию или отсутствию сигналов в соответствующих каналах. Кривые флуоресценции позволяют точно идентифицировать генотипы животных.

В результате апробации разработанной тест-системы был выявлен полиморфизм и определены частоты встречаемости аллелей и генотипов *PHKG1*. Среди чистопородных свиней пород крупная белая, ландрас и дюрок носителей аллеля А не обнаружено, в группе гибридных свиней частота носителей гетерозиготного варианта составила 18,75 %, частота встречаемости аллеля А фиксировалась на уровне 0,094.

#### **Обсуждение полученных результатов.**

Качество свинины является экономически важным показателем в свиноводстве и его улучшение – это одна из основных целей современного свиноводства. Однако улучшение качества свинины традиционными методами селекции затруднено из-за низкой наследуемости данных признаков, а также возможности их оценки только после убоя животных (Liu X et al., 2019), к тому же такие измерения трудоёмки, дороги. Это резко увеличивает интервал поколений и замедляет общий генетический прогресс (Magalhaes AFB et al., 2019). Поэтому понимание генетических механизмов, лежащих в основе характеристик, связанных с качеством мяса свиней, имеет очень важное значение. Одним из генетических маркеров качества мяса выступает полиморфизм в гене *PHKG1*.

Ген *PHKG1* – каталитическая гамма 1 субъединица киназы фосфорилазы, которая опосредует нервную и гормональную регуляцию распада гликогена (гликогенолиза) путём фосфорилирования и тем самым активации гликогенфосфорилазы. Группа китайских учёных (Ma J et al., 2014) провела полногеномное ассоциативное исследование (GWAS) с показателями качества мяса: оценка цвета и мраморности, содержание внутримышечного жира, гликолитический потенциал, остаточный гликоген, глюкозо-6-фосфат (G-6-P) и лактата у гибридных свиней. Они идентифицировали сплайсинговую мутацию в гене *PHKG1*, которую они предположили в качестве причинного варианта для содержания гликогена и качества мяса в скелетных мышцах свиней. Вариант

g.16830320C>A расположен на свиной хромосоме 3 в положении 16 830 320 (сборка генома Sscrofa11.1), также он называется g.8283C>A, кодирующая последовательность размещена в GenBank под номером KJ481910.1. Результаты GWAS продемонстрировали, что данная мутация, вероятно, влияет на преобразование гликогена и глюкозы (или G-6-P), но не на преобразование G-6-P в лактат и объясняет 19,6 % фенотипической дисперсии остаточного гликогена. Результаты измерения активности фермента киназы фосфорилазы в образцах мышц генотипированных свиней позволили обнаружить разницу в активности фермента между аллелями в локусе. Также они выполнили картирование экспрессии QTL, используя данные транскриптома мышц 497 свиней, и обнаружили связь с экспрессией *PHKG1* в этом локусе. Секвенирование кДНК *PHKG1* выявило делецию сдвига рамки считывания на 32 п.о. в экзоне 10, которая вызывает преждевременный стоп-кодон. Ма J и коллеги (Ma J et al., 2014) не обнаружили этой делеции в геномной ДНК, но идентифицировали вариант g.16830320C>A и предположили, что он может быть вариантом сплайсинга. Анализы сплайсинга в двух линиях клеток человека (HeLa и 293 T) показали, что g.16830320C>A ответственен за aberrантный сплайсинг 32 нуклеотидов, наблюдаемый в экзоне 10 *PHKG1*. По всей видимости, укороченный *PHKG1*, экспрессирующийся на уровне 56 % от уровня экспрессии нормально сплайсируемого аллеля, скорее всего, деградирует в результате нонсенс-опосредованного распада (Ma J et al., 2014).

Показано, что однонуклеотидная замена g.16830320C>A может оказывать негативное влияние на активность белка, вызывая медленный распад мышечного гликогена и его повышенное накопление у живых свиней. Так, у животных с нежелательным аллелем А в генотипе было выявлено более сильное снижение рН в мясе и отмечена более низкая способность мяса удерживать влагу по сравнению с животными с генотипом СС (Zappaterra M et al., 2019). Показано, что мутации в гене *PHKG1* связаны с влагоудерживающей способностью через 24 и 48 часов, рН и цветом мяса у желтого бройлера Нинду. Также было отмечено, что экспрессия гена значительно различалась между двумя фенотипическими/генотипическими группами ( $P<0,05$ ) (Xiong X et al., 2022).

В исследованных нами группах свиней пород ландрас, дюрок и крупная белая носителей аллеля А выявлено не было. В итоге, частота мутантного аллеля А в исследованной выборке составила 0,00. Однако были обнаружены носители мутантного аллеля в выборке гибридов F2 с частотой 18,75 %. По результатам Zappaterra M с коллегами (2019) было установлено, что мутантный аллель *PHKG1* А у свиней породы итальянская крупная белая встречался с частотой 0,54, а частота носителей АА генотипа составила 30,8 %. У китайских черных свиней Лулай частота аллеля А составила 0,073 и было выявлено 12 % особей с нежелательным аллелем А в генотипе (АА и АС) (Xu J et al., 2022). У свиней породы сухой SNP rs330928088 *PHKG1* не является полиморфным (Wang B et al., 2019). По данным Ма J и коллег (2014), частота встречаемости мутантного аллеля А у свиней породы белый дюрок составила 0,700, у свиней породы дюрок – 0,320, в популяции свиней крупной белой породы – 0,030, у пьетрена – 0,010, у ландраса, кабанана, свиней пород лайву и эрхулиан не встречался. Несмотря на то, что в наших исследованиях не было выявлено носителей аллеля А в группе свиней породы дюрок, наличие животных с таким аллелем в группе гибридных свиней показывает, что, вероятнее всего, такой аллель был унаследован от хряков-носителей мутантного аллеля, поскольку по результатам зарубежных учёных у дюрока его частота довольно высока.

### Заключение.

Проблема подверженности животных стрессу в процессе промышленного разведения и его влияния на качество мяса остаётся актуальной. Использование молекулярно-генетических подходов может способствовать улучшению селекционных программ за счёт отбора животных с благоприятными генотипами и уменьшения интервалов генерации. Предложенный ПЦР-РВ метод пригоден для массовой диагностики нормального и мутантного аллеля в гене *PHKG1* свиней и даст возможность формировать группы племенных животных, свободных от генетического дефекта (хряков-производителей, ремонтных свиней, свиноматок), тем самым заложить основу для созда-

ния качественного поголовья в регионах при разведении чистопородных животных и при их промышленном скрещивании, а также позволит получать свинину без признаков PSE.

#### Список источников

1. Быкова А.А., Швагер О.В. Влияние антистрессового препарата Фоспасим на ветеринарно-санитарные характеристики свинины // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 6(92). С. 269-273. [Bykova AA, Shvager OV. The effect of the anti-stress drug Fospasim on the veterinary and sanitary characteristics of pork. Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2021;92(6):269-273. (In Russ.)]. doi: 10.37670/2073-0853-2021-92-6-269-273
2. Влияние транспортирования и предубойной подготовки на качество свинины на примере мясоперерабатывающих предприятий ЮФО / О.Н. Орлова, Л.С. Дмитриева, В.И. Ерошенко, В.С. Мкртчян, Л.В. Кричун // Всё о мясе. 2020. № 55. С. 254-256. [Orlova ON, Dmitrieva LS, Eroshenko VI, Mkrtychyan VS, Krichun LV. Impact of transportation and pre-slaughter testing the quality of pork by example meat processing enterprises of SFD. Vsyo o myase. 2020;55:254-256. (In Russ.)]. doi: 10.21323/2071-2499-2020-5S-254-256
3. Идентификация свинины качества NOR, PSE и DFD в условиях агропромышленного рынка / В.П. Лясота, Н.М. Богатко, Н.В. Букалова, Л.М. Богатко, Т.Н. Прилипко, Л.П. Артеменко, Т.В. Дудус // Животноводство и ветеринарная медицина. 2020. № 2(37). С. 3-6. [Liasota VP, Bogatko NM, Bukalova NV, Bogatko LM, Prilipko TN, Artemenko LP, Dudus TV. Identification of pork of quality NOR, PSE and DFD in the conditions of agro-industrial market. Animal Agricultural and Veterinary Medicine. 2020;2(37):3-6. (In Russ.)].
4. Исследование органолептических и функционально-технологических свойств мышечной ткани NOR и PSE свинины на мясоперерабатывающих предприятиях ЮФО / О.Н. Орлова, В.С. Мкртчян, Л.В. Скрыпник, Л.В. Кричун // Теория и практика переработки мяса. 2018. № 4. С. 49-57. [Orlova ON, Mkrtychyan VS, Skripnik LV, Krichun LV. The study of organoleptic and functional-technological properties of pork muscletissue NOR and PSE at the industrial enterprises of the Southern Federal District. Theory and Practice of Meat Processing. 2018;3(4):49-57. (In Russ.)]. doi: 10.21323/2414-438X-2018-3-4-49-57
5. Козминская А.С. Оценка адаптивного и генетического потенциала свиней, селекционно-генетический мониторинг в условиях промышленной технологии: дис. канд. с.-х. наук. Мичуринск – наукоград РФ, 2017. 146 с. [Kozminskaya AS. Ocenka adaptivnogo i geneticheskogo potenciala svinej, selekcionno-geneticheskij monitoring v uslovijah promyshlennoj tehnologii. [dissertation] Michurinsk – naukoograd RF;2017:146 p. (In Russ.)].
6. Макин М.В., Афанасьев А.А. Текущее состояние и развитие национального рынка мяса и мясопродуктов // Форум молодых ученых. 2020. № 1(41). С. 393-396. [Makin MV, Afanasiev AA. Current state and development of the national meat and meat products market. Forum molodyh uchenyh. 2020;1(41):393-396. (In Russ.)].
7. Остренко К.С., Полякова Л.Л. Снижение предубойного стресса как фактор повышения качества мясной продукции // Проблемы биологии продуктивных животных. 2020. №2. С. 66-74. [Ostrenko KS, Polyakova LL. Reducing pre-slaughter stress as a factor for improving the quality of meat products. Problems of Productive Animal Biology. 2020;2:66-74. (In Russ.)]. doi: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.2.66-74
8. Оценка качества мяса длиннейшей мышцы свинины с признаками PSE в процессе автолиза / О.В. Шкабров, Е.А. Трилинская, И.И. Андреева, Л.Ю. Харкевич // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия. 2020. №2(29). С. 56-63. [Shkabrov OV, Trilinskaya EA, Andreeva II, Kharkevich LYu. Estimation of the quality of the longissimus pork muscle (musculus longissimus dorsi) with signs of PSE during autolysis. Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies. 2020;2(29):56-63 (In Russ.)].



9. Потребление мяса и мясных продуктов в Российской Федерации: ретроспективный анализ и реалии сегодняшнего дня / Э.Э. Кешабянц, Н.Н. Денисова, М.С. Андропова, Е.А. Смирнова // *Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО*. 2023. Т. 31. № 2. С. 47-55. [Keshabyants EE, Denisova NN, Andronova MS, Smirnova EA. Consumption of meat and processed meats in the Russian Federation: A retrospective analysis and current realities. *Public Health and Life Environment – Ph&Le*. 2023;31(2):47-55. (*In Russ.*). doi: 10.35627/2219-5238/2023-31-2-47-55]
10. Профилактика транспортного стресса свиней комплексными иммуностимулирующими препаратами серии PigStim / А.В. Успешный, Л.П. Гладких, В.Г. Семенов, Д.А. Никитин // *Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства*. 2021. № 23. С. 488-492. [Uspeshnyy AV, Gladkikh LP, Semenov VG, Nikitin DA. Profilaktika transportnogo stressa svinej kompleksnymi immunotropnymi preparatami serii PigStim. *Aktual'nyye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii sel'skogo khozyaystva*. 2021;23:488-492 (*In Russ.*)].
11. Результаты генетического тестирования хряков белорусской крупной белой породы в зависимости от их линейной принадлежности / О.Я. Василюк, Н.А. Лобан, И.Ф. Гридюшко, И.П. Шейко, Е.В. Пищелка, С.М. Квашевич // *Зоотехническая наука Беларуси*. 2020. Т. 55. № 1. С. 72-84. [Vasilyuk OY, Loban NA, Gridyushko IF, Sheiko IP, Pischelka EV, Kvashevich SM. Results of genetic testing of belarusian large white breed of boars depending on the linear affiliation. *Zootekhnicheskaya nauka Belarusi*. 2020;55(1):72-84. (*In Russ.*)].
12. Романишко Е.Л., Михайлова М.Е., Шейко Р.И. Выявление полиморфизмов 1843C>T в гене RYR1 и 5860C>T в гене DMD, ассоциированных со стрессочувствительностью свиней, с использованием технологии KASP // *Молекулярная и прикладная генетика*. 2021. Т. 30. С. 61-67. [Ramanishka EL, Mikhailova ME, Sheiko RI. Identification of polymorphisms 1843C>T in the RYR1 gene and 5860C>T in the DMD gene associated with the stress sindrom of pigs using KASP technology. *Molekulyarnaya i prikladnaya genetika*. 2021;30:61-67. (*InRuss.*). doi: 10.47612/1999-9127-2021-30-61-67]
13. Сыса Л.В., Сыса С.А. Основные факторы, негативно влияющие на состояние животных в условиях ряда свиноводческих хозяйств // *Животноводство и ветеринарная медицина*. 2022. № 3(46). С. 26-29. [Sysa LV, Sysa SA. The main factors negatively influencing the state of animals in the conditions of a series of pig farms. *Animal Agricultural and Veterinary Medicine*. 2022;3(46):26-29. (*In Russ.*)].
14. Хайруллина О.И. Тенденции производства и потребления основных видов мяса в России // *Креативная экономика*. 2021. Т. 15. № 5. С. 2245-2260. [Khairullina OI. Trends in the production and consumption of the main types of meat in Russia. *Creative Economy*. 2021;15:2245-2260. (*In Russ.*)]. doi: 10.18334/ce.15.5.112098]
15. Acosta DB, Español LÁ, Figueroa CE, Marini SJ, MacAllister ME, Carpinetti BN, Fernández GP, Merino ML. Wild pigs (*Sus scrofa*) population as reservoirs for deleterious mutations in the RYR1 gene associated with Porcine Stress Syndrome. *Veterinary and Animal Science*. 2020;11:100160. doi: 10.1016/j.vas.2020.100160
16. Dall'Olio S, Scotti E, Costa LN, Fontanesi L. Effects of single nucleotide polymorphisms and haplotypes of the protein kinase AMP-activated non-catalytic subunit gamma 3 (PRKAG3) gene on production, meat quality and carcass traits in Italian Large White pigs. *Meat Science*. 2018;136:44-49. doi: 10.1016/j.meatsci.2017.09.012
17. Desire S, Johnsson M, Ros-Freixedes R, Chen CY, Holl JW, Herring WO, Gorjanc G, Mellanby RJ, Hickey JM, Jungnickel MK. A genome-wide association study for loin depth and muscle pH in pigs from intensely selected purebred lines. *Genetics Selection Evolution*. 2023;55(1):42. doi: 10.1186/s12711-023-00815-0
18. Koressaar T, Lepamets M, Kaplinski L, Raime K, Andreson R, Remm M. Primer3\_masker: integrating masking of template sequence with primer design software. *Bioinformatics*. 2018;34(11):1937-1938. doi: 10.1093/bioinformatics/bty036

19. Liu X, Zhou L, Xie X, Wu Z, Xiong X, Zhang Z, Yang J, Xiao S, Zhou M, Ma J, Huang L. Muscle glycogen level and occurrence of acid meat in commercial hybrid pigs are regulated by two low-frequency causal variants with large effects and multiple common variants with small effects. *Genetics Selection Evolution*. 2019;51(1):46. doi: 10.1186/s12711-019-0488-0
20. Liu Y, Liu Y, Ma T, Long H, Niu L, Zhang X, Lei Y, Wang L, Chen Y, Wang Q, Zheng Z, Xu X. A splicing mutation in PHKG1 decreased its expression in skeletal muscle and caused PSE meat in Duroc×Luchuan crossbred pigs. *Animal Genetics*. 2019;50(4):395-398. doi: 10.1111/age.12807
21. Ma J, Yang J, Zhou L, Ren J, Liu X, Zhang H, Yang B, Zhang Z, Ma H, Xie X, Xing Y, Guo Y, Huang L. A splice mutation in the PHKG1 gene causes high glycogen content and low meat quality in pig skeletal muscle. *PLoS Genet*. 2014;10(10):e1004710. doi: 10.1371/journal.pgen.1004710
22. Magalhaes AFB, Schenkel FS, Garcia DA, Gordo DGM, Tonussi RL, Espigolan R, Silva RMO, Braz CU, Fernandes Jr GA, Baldi F, Carvalheiro R, Boligon AA, de Oliveira HN, Char-dulo LAL, de Albuquerque LG. Genomic selection for meat quality traits in Nelore cattle. *Meat Sci*. 2019;148:32-37. doi: 10.1016/j.meatsci.2018.09.010
23. Trevisan L, Brum JS. Incidence of pale, soft and exudative (PSE) pork meat in reason of extrinsic stress factors. *An Acad Bras Cienc*. 2020;92(3):e20190086. doi: 10.1590/0001-3765202020190086
24. Wang B, Li P, Zhou W, Gao C, Liu H, Li H, Niu P, Zhang Z, Li Q, Zhou J, Huang R. Association of twelve candidate gene polymorphisms with the intramuscular fat content and average backfat thickness of chinese suhuai pigs. *Animals (Basel)*. 2019;9(11):858. doi: 10.3390/ani9110858
25. Xie X, Huang C, Huang Y, Zou X, Zhou R, Ai H, Huang L, Ma J. Genetic architecture for skeletal muscle glycolytic potential in Chinese Erhualian pigs revealed by a genome-wide association study using 1.4M SNP array. *Frontiers in Genetics*. 2023;17(14):1141411. doi: 10.3389/fgene.2023.1141411
26. Xiong X, Liu X, Zhu X, Tan Y, Wang Z, Xu J, Tu X, Rao Y, Duan J, Zhao W, Zhou M. A mutation in PHKG1 causes high drip loss and low meat quality in Chinese Ningdu yellow chickens. *Poult Sci*. 2022;101(1):101556. doi: 10.1016/j.psj.2021.101556
27. Xu J, Jiang A, Zhang C, Zheng Y, Zhang T, Zhou L. Potential of eight mutations for marker-assisted breeding in Chinese Lulai black pigs. *Canadian Journal of Animal Science*. 2022;102(3):431-439. doi: 10.1139/cjas-2021-0108
28. Zappaterra M, Dalal Sami D, Roberta Davoli R. Association between the splice mutation g.8283C>A of the PHKG1 gene and meat quality traits in Large White pigs. *Meat Science*. 2019;148:38-40. doi: 10.1016/j.meatsci.2018.10.003
29. Zequan X, Yonggang S, Guangjuan L, Shijun X, Li Z, Mingrui Z, Yanli X, Zirong W. Proteomics analysis as an approach to understand the formation of pale, soft, and exudative (PSE) pork. *Meat Sci*. 2021;177:108353. doi: 10.1016/j.meatsci.2020.108353

## References

1. Bykova AA, Shvager OV. The effect of the anti-stress drug Fospasim on the veterinary and sanitary characteristics of pork. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021;92(6):269-273. doi: 10.37670/2073-0853-2021-92-6-269-273
2. Orlova ON, Dmitrieva LS, Eroshenko VI, MkrtychyanVS, KrichunLV. Impact of transportation and pre-slaughter testing the quality of pork by example meat processing enterprises of SFD. *Everything about Meat*. 2020;55:254-256. doi: 10.21323/2071-2499-2020-5S-254-256
3. Liasota VP, Bogatko NM, Bukalova NV, Bogatko LM, Prilipko TN, Artemenko LP, Dudus TV. Identification of pork of quality NOR, PSE and DFD in the conditions of agro-industrial market. *Animal Agricultural and Veterinary Medicine*. 2020;2(37):3-6.
4. Orlova ON, Mkrtychyan VS, Skripnik LV, Krichun LV. The study of organoleptic and functional-technological properties of pork muscle tissue NOR and PSE at the industrial enterprises of the Southern Federal District. *Theory and Practice of Meat Processing*. 2018;3(4):49-57. doi: 10.21323/2414-438X-2018-3-4-49-57

5. Kozminskaya A.S. Assessment of the adaptive and genetic potential of pigs, selection and genetic monitoring in the conditions of industrial technology. [dissertation] Michurinsk - science city of the Russian Federation; 2017:146 p.
6. Makin MV, Afanasiev AA. Current state and development of the national meat and meat products market. Forum of Young Scientists. 2020;1(41): 393-396.
7. Ostrenko KS, Polyakova LL. Reducing pre-slaughter stress as a factor for improving the quality of meat products. Problems of Productive Animal Biology. 2020;2:66-74. doi: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.2.66-74
8. Shkabrov OV, Trilinskaya EA, Andreeva II, Kharkevich LYu. Estimation of the quality of the longissimus pork muscle (musculus longissimus dorsi) with signs of PSE during autolysis. Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies. 2020;2(29):56-63.
9. Keshabyants EE, Denisova NN, Andronova MS, Smirnova EA. Consumption of meat and processed meats in the Russian Federation: A retrospective analysis and current realities. Public Health and Life Environment – Ph&Le. 2023;31(2):47-55. doi: 10.35627/2219-5238/2023-31-2-47-55
10. Uspeshnyy AV, Gladkikh LP, Semenov VG, Nikitin DA. Prevention of transport stress in pigs with complex immunotropic preparations of the PigStim series. Current Issues of Improving the Technology of Production and Processing of Agricultural Products. 2021;23:488-492.
11. Vasilyuk OY, Loban NA, Gridyushko IF, Sheiko IP, Pischelka EV, Kvashevich SM. Results of genetic testing of belarusian large white breed of boars depending on the linear affiliation. Zootechnical Science of Belarus. 2020;55(1):72-84.
12. Ramanishka EL, Mikhailova ME, Sheyko RI. Identification of polymorphisms 1843C>T in the RYR1 gene and 5860C>T in the DMD gene associated with the stress sindrom of pigs using KASP technology. Molecular and Applied Genetics. 2021;30:61-67. doi: 10.47612/1999-9127-2021-30-61-67
13. Sysa LV, Sysa SA. The main factors negatively influencing the state of animals in the conditions of a series of pig farms. Animal Agricultural and Veterinary Medicine. 2022;3(46):26-29.
14. Khairullina OI. Trends in the production and consumption of the main types of meat in Russia. Creative Economy. 2021;15:2245-2260. doi: 10.18334/ce.15.5.112098
15. Acosta DB, Español LÁ, Figueroa CE, Marini SJ, MacAllister ME, Carpinetti BN, Fernández GP, Merino ML. Wild pigs (*Sus scrofa*) population as reservoirs for deleterious mutations in the RYR1 gene associated with Porcine Stress Syndrome. Veterinary and Animal Science. 2020;11:100160. doi: 10.1016/j.vas.2020.100160
16. Dall'Olio S, Scotti E, Costa LN, Fontanesi L. Effects of single nucleotide polymorphisms and haplotypes of the protein kinase AMP-activated non-catalytic subunit gamma 3 (PRKAG3) gene on production, meat quality and carcass traits in Italian Large White pigs. Meat Science. 2018;136:44-49. doi: 10.1016/j.meatsci.2017.09.012
17. Desire S, Johnsson M, Ros-Freixedes R, Chen CY, Holl JW, Herring WO, Gorjanc G, Mellanby RJ, Hickey JM, Jungnickel MK. A genome-wide association study for loin depth and muscle pH in pigs from intensely selected purebred lines. Genetics Selection Evolution. 2023;55(1):42. doi: 10.1186/s12711-023-00815-0
18. Koressaar T, Lepamets M, Kaplinski L, Raime K, Andreson R, Remm M. Primer3\_masker: integrating masking of template sequence with primer design software. Bioinformatics. 2018;34(11):1937-1938. doi: 10.1093/bioinformatics/bty036
19. Liu X, Zhou L, Xie X, Wu Z, Xiong X, Zhang Z, Yang J, Xiao S, Zhou M, Ma J, Huang L. Muscle glycogen level and occurrence of acid meat in commercial hybrid pigs are regulated by two low-frequency causal variants with large effects and multiple common variants with small effects. Genetics Selection Evolution. 2019;51(1):46. doi: 10.1186/s12711-019-0488-0
20. Liu Y, Liu Y, Ma T, Long H, Niu L, Zhang X, Lei Y, Wang L, Chen Y, Wang Q, Zheng Z, Xu X. A splicing mutation in PHKG1 decreased its expression in skeletal muscle and caused PSE meat in Duroc×Luchuan crossbred pigs. Animal Genetics. 2019;50(4):395-398. doi: 10.1111/age.12807

21. Ma J, Yang J, Zhou L, Ren J, Liu X, Zhang H, Yang B, Zhang Z, Ma H, Xie X, Xing Y, Guo Y, Huang L. A splice mutation in the PHKG1 gene causes high glycogen content and low meat quality in pig skeletal muscle. PLoS Genet. 2014;10(10):e1004710. doi: 10.1371/journal.pgen.1004710
22. Magalhaes AFB, Schenkel FS, Garcia DA, Gordo DGM, Tonussi RL, Espigolan R, Silva RMO, Braz CU, Fernandes Jr GA, Baldi F, Carvalheiro R, Boligon AA, de Oliveira HN, Char-dulo LAL, de Albuquerque LG. Genomic selection for meat quality traits in Nelore cattle. Meat Sci. 2019;148:32-37. doi: 10.1016/j.meatsci.2018.09.010
23. Trevisan L, Brum JS. Incidence of pale, soft and exudative (PSE) pork meat in reason of extrinsic stress factors. An Acad Bras Cienc. 2020;92(3):e20190086. doi: 10.1590/0001-3765202020190086
24. Wang B, Li P, Zhou W, Gao C, Liu H, Li H, Niu P, Zhang Z, Li Q, Zhou J, Huang R. Association of twelve candidate gene polymorphisms with the intramuscular fat content and average backfat thickness of chinese suhuai pigs. Animals (Basel). 2019;9(11):858. doi: 10.3390/ani9110858
25. Xie X, Huang C, Huang Y, Zou X, Zhou R, Ai H, Huang L, Ma J. Genetic architecture for skeletal muscle glycolytic potential in Chinese Erhualian pigs revealed by a genome-wide association study using 1.4M SNP array. Frontiers in Genetics. 2023;17(14):1141411. doi: 10.3389/fgene.2023.1141411
26. Xiong X, Liu X, Zhu X, Tan Y, Wang Z, Xu J, Tu X, Rao Y, Duan J, Zhao W, Zhou M. A mutation in PHKG1 causes high drip loss and low meat quality in Chinese Ningdu yellow chickens. Poultry Sci. 2022;101(1):101556. doi: 10.1016/j.psj.2021.101556
27. Xu J, Jiang A, Zhang C, Zheng Y, Zhang T, Zhou L. Potential of eight mutations for marker-assisted breeding in Chinese Lulai black pigs. Canadian Journal of Animal Science. 2022;102(3):431-439. doi: 10.1139/cjas-2021-0108
28. Zappaterra M, Dalal Sami D, Roberta Davoli R. Association between the splice mutation g.8283C>A of the PHKG1 gene and meat quality traits in Large White pigs. Meat Science. 2019;148:38-40. doi: 10.1016/j.meatsci.2018.10.003
29. Zequan X, Yonggang S, Guangjuan L, Shijun X, Li Z, Mingrui Z, Yanli X, Zirong W. Proteomics analysis as an approach to understand the formation of pale, soft, and exudative (PSE) pork. Meat Sci. 2021;177:108353. doi: 10.1016/j.meatsci.2020.108353

#### Информация об авторах:

**Ольга Сергеевна Романенкова**, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики сельскохозяйственных животных, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская область, городской округ Подольск, п. Дубровицы, 60, тел.: +7 (4967) 651102.

**Ольга Васильевна Костюнина**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики сельскохозяйственных животных, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская область, городской округ Подольск, п. Дубровицы, 60, тел.: +7 (4967) 651102.

#### Information about the authors:

**Olga S Romanenkova**, Cand. Sci. (Biology), researcher, Laboratory of Molecular Genetics of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member LK Ernst, 60 Dubrovitsy, Podolsk district, Moscow region, 142132, cell: +7(4967)651102.

**Olga V Kostyunina**, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Molecular Genetics of Farm Animals, Laboratory of Molecular Genetics of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member LK Ernst, 60 Dubrovitsy, Podolsk district, Moscow region, 142132, cell: +7(4967)651102.

Статья поступила в редакцию 22.11.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023; принята к публикации 11.12.2023.

The article was submitted 22.11.2023; approved after reviewing 05.12.2023; accepted for publication 11.12.2023.