

УДК 636.4:591.1:636.084

Стресс, оксидативный дисбаланс и адаптогены в свиноводстве: от механизмов к стратегиям коррекции

Кутын И. В., Остренко К.С.

ВНИИФБиП — филиал ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста,
Калужская обл., Россия

Аннотация. Обзор посвящён систематизации современных данных о механизмах стресса и оксидативного повреждения у свиней, а также анализу перспектив применения адаптогенов для повышения стрессоустойчивости в условиях промышленного свиноводства. В работе рассмотрена этиология стресс-факторов в свиноводстве, описаны стадии общего адаптационного синдрома и ключевые нейроэндокринные сдвиги. Показано, что хронический стресс приводит к иммуносупрессии, нарушению репродуктивной функции, снижению продуктивности и качества мяса. Отдельное внимание уделено оксидативному стрессу как универсальному механизму повреждения. Описаны критические периоды, когда оксидативный стресс наиболее выражен: послеотъёмный период у поросят и поздняя супоросность с лактацией у высокопродуктивных свиноматок. Проанализированы стратегии коррекции стресса: оптимизация микроклимата, снижение плотности посадки, использование высококачественных кормов, обогащённых витаминами Е и С, селеном, полифенолами, пробиотиками и адаптогенами. Представлена характеристика адаптогенов как класса соединений, повышающих неспецифическую резистентность организма. На примере органической соли лития — аскорбата лития — показаны нейропротекторные и антиоксидантные эффекты, низкая токсичность и широкий терапевтический коридор. Адаптогены являются перспективными стресс-протекторами для свиноводства, однако требуются дальнейшие исследования по оптимизации дозировок для различных технологических групп, изучению остаточных количеств в продукции и оценке экономической эффективности в условиях интенсивного производства.

Ключевые слова: стресс, оксидативный стресс, свиньи, адаптогены, аскорбат лития, продуктивность.

Для цитирования: Кутын И. В., Остренко К.С. Стресс, оксидативный дисбаланс и адаптогены в свиноводстве: от механизмов к стратегиям коррекции // Успехи наук о животных. 2026. № 2. С. 57—69. doi: 10.25687/3034-493X.2026.7.2.004

Stress, oxidative imbalance, and adaptogens in pig farming: from mechanisms to correction strategies

I.V. Kutin, K.S. Ostrenko

All-Russia Research Institute of Animal Physiology, Biochemistry,
and Nutrition, Branch of L.K. Ernst Federal Research Center
for Animal Husbandry
Kaluga Region, Russia

Abstract. The review is devoted to the systematization of current data on the mechanisms of stress and oxidative damage in pigs, as well as to the analysis of the prospects of using adaptogens for improving stress resistance in commercial pig farming. The review addresses the etiology of stress factors in pig farming. The stages of the general adaptation syndrome and key neuroendocrine shifts are described. Chronic stress is shown to result in immunosuppression, reproductive dysfunction, reduced performance, and decreased meat quality. Particular attention is given to oxidative stress as a universal damage mechanism: activation of lipid peroxidation, accumulation of malondialdehyde, initiation of NF kB dependent inflammation, and the formation of a vicious cycle of inflammation and oxidative stress. Critical periods when oxidative stress is most pronounced are outlined: the post weaning period in piglets and late gestation with lactation in high producing sows. Correction strategies are analyzed: microclimate optimization, reduced stocking density, use of high quality feeds enriched with vitamins E and C, selenium, polyphenols, probiotics, and adaptogens. Adaptogens as a class of compounds that increase nonspecific resistance of the organism are characterized. Using an organic salt of lithium, lithium ascorbate, as an example, neuroprotective and antioxidant effects, low toxicity, and a wide therapeutic window are demonstrated. Adaptogens are promising stress protective agents for pig farming; however, further studies are required to optimize dosages for different technological groups, to investigate residual amounts in products, and to assess economic efficiency under intensive production conditions.

Keywords: stress, oxidative stress, pigs, adaptogens, lithium ascorbate, productivity.

For citation: Kutin IV, Ostrenko KS. Stress, oxidative imbalance, and adaptogens in pig farming: from mechanisms to correction strategies. Ernst Journal of Animal Science. 2026. 2: 57—69. Russian. doi: 10.25687/3034-493X.2026.7.2.004

Введение. Современное промышленное свиноводство характеризуется высокой интенсивностью производства, направленной на достижение максимальной продуктивности в короткие сроки. Однако интенсификация сопровождается комплексом технологических нагрузок, которые нередко превышают физиологические возможности организма животных. В ответ на действие разнообразных стресс-факторов: транспортировка, смена рационов, ветеринарные манипуляции, нарушение микроклимата, высокая плотность содержания, у свиней развиваются генерализованные адаптационные реакции, затрагивающие нейроэндокринную, иммунную, метаболическую и репродуктивную системы [1-3]. Хроническое или чрезмерное воздействие стрессоров приводит к снижению продуктивности, ухудшению качества мяса, росту заболеваемости и экономическим потерям [4-6].

Особую роль в патогенезе стресс-индуцированных состояний играет оксидативный стресс, возникающий при дисбалансе между продукцией активных форм кислорода и активностью антиоксидантной системы [7]. Активация перекисного окисления липидов, повреждение клеточных мембран, митохондрий и ДНК лежат в основе иммуносупрессии, воспалительных процессов и нарушений репродуктивной функции [6, 8, 9]. Критические периоды: послеотъемный у поросят и поздняя супоросность с лактацией у свиноматок, характеризуются наибольшей уязвимостью к оксидативному стрессу [9, 10].

Для минимизации негативных последствий стресса в свиноводстве применяются различные стратегии: оптимизация условий содержания, балансирование рационов, использование антиоксидантов (витамины Е и С, селен, полифенолы), пробиотиков и адаптогенов [5, 11, 12]. Среди адаптогенов нового поколения особый интерес представляет аскорбат лития – органическая соль, объединяющая нейропротекторные свойства лития и антиоксидантные эффекты аскорбиновой кислоты. Данное соединение обладает низкой токсичностью (5 класс), широким терапевтическим коридором и перспективно для повышения стресс-резистентности свиней [13-16]. В отличие от традиционных антиоксидантов, действующих преимущественно на периферии, аскорбат лития способен влиять на центральные механизмы регуляции стресса, что делает его патогенетически обоснованным стресс-протектором.

Цель настоящего обзора – систематизация современных данных о механизмах стресса и оксидативного повреждения у свиней, а также анализ перспектив применения адаптогенов, в частности аскорбата лития, для повышения стрессоустойчивости в условиях интенсивного животноводства.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обобщить современные представления об этиологии и нейроэндокринных механизмах стресса у свиней.
2. Проанализировать роль оксидативного дисбаланса как универсального механизма повреждения при стрессе.
3. Систематизировать данные о критических периодах стрессовой уязвимости у свиней.
4. Охарактеризовать адаптогены как класс стресс-протекторов и обосновать перспективность аскорбата лития.
5. Определить направления дальнейших исследований для внедрения адаптогенов в практику свиноводства.

Материалы и методы. Настоящий обзор выполнен на основе анализа научной литературы, опубликованной в рецензируемых российских и зарубежных журналах. Поиск источников проводился в базах данных PubMed, Web of Science, Scopus, Google Scholar, eLibrary.ru и КиберЛенинка за период с 1973 по 2026 годы. Основной фокус был сделан на

публикации последних 10 лет (2014–2026 гг.), однако для описания фундаментальных концепций стресса (общий адаптационный синдром, нейроэндокринные основы) привлекались также классические работы предшествующего периода. Поисковые запросы включали комбинации ключевых слов: «стресс свиньи», «оксидативный стресс свиноводство», «адаптогены животноводство», «аскорбат лития», «кортизол свиньи», «перекисное окисление липидов свиньи», «stress pigs», «oxidative stress pig farming», «adaptogens livestock», «lithium ascorbate», «cortisol swine», «lipid peroxidation pigs». Отбор источников проводился по критериям релевантности, научной значимости и наличия оригинальных экспериментальных данных или качественных обобщений. Всего в обзор включено 46 источников, из которых 23 опубликованы в последние 7 лет (2019–2026 гг.), что составляет 50% от общего числа.

Теоретические основы стресс-реакции у сельскохозяйственных животных.

Фундаментальные основы учения о стрессе были заложены в середине XX века Г. Селье, который описал неспецифическую реакцию организма на повреждающие факторы как общий адаптационный синдром. На основании клинических наблюдений был идентифицирован устойчивый симптомокомплекс, проявляющийся гипертрофией коры надпочечников, тимико-лимфатической инволюцией и геморрагически-язвенными поражениями гастродуоденальной зоны [17]. Несмотря на накопленные знания и появление множества теорий, проблема стресса до сих пор остаётся актуальной [1]. Современный нейроэндокринный подход отводит нервной системе ключевую роль в запуске и координации стресс-реакции, которая регулируется механизмами обратной связи, учитывающими внешние воздействия, внутренние потребности и накопленный опыт. Таким образом, стресс-реакция является результатом сложного взаимодействия нервной и эндокринной систем, интегрирующих генетические, физиологические и психологические составляющие [2].

В условиях промышленного животноводства организм животного испытывает функциональные нагрузки сверх физиологической нормы, что отрицательно влияет на адаптивные реакции. Стрессоры подразделяются на физиологические, биологические, физические и психогенные [3]. Согласно современным представлениям, стресс — это комплекс неспецифических и специфических реакций организма, имеющих адаптационную направленность [2]. Неспецифические реакции представляют собой ответ на воздействие стресс-фактора в виде комплекса нейрогуморальных и морфологических изменений [4]. Стресс инициирует выброс в кровь кортизола и катехоламинов (адреналина и норадреналина) для адаптации к экстремальным условиям [2, 18]. Параллельно происходит комплекс морфологических изменений: увеличение надпочечников, инволюция тимуса и образование язв в желудке, что наглядно демонстрирует влияние стресс-факторов на различные системы и нарушение гомеостаза [19–21].

Стресс имеет адаптационную направленность, активируя защитные механизмы организма для предотвращения неблагоприятного воздействия стрессогенных факторов. Это врождённый защитный механизм, который может развиваться в процессе онтогенеза [22, 23]. Физиологический стресс рассматривается как защита от воздействия физических факторов, психологический — от воздействия психогенных факторов [24, 25]. При стрессе, независимо от его причины, наблюдается увеличение процессов липопероксидации и избыточное образование свободных радикалов, что крайне неблагоприятно влияет на обмен веществ, здоровье животных, их продуктивность и качество продукции [1, 4, 7]. Липопероксидация приводит к окислительным повреждениям липидов в клетках, дисбалансу окислительно-восстановительных реакций и повреждению клеточных мембран. Этот процесс сопровождается увеличенной продукцией свободных радикалов, которые могут вызывать повреждения ДНК, белков и других клеточных компонентов [4, 6, 26].

Технологический стресс подразумевает систематическое воздействие различных стресс-факторов: транспортировка, смена рационов, изменение компонентов корма, условия содержания, ветеринарные манипуляции, производственный шум [3, 24]. Это может приводить к стрессовой дезадаптации — нарушению регуляторных механизмов адаптации. Также следует учитывать, что в разные физиологические периоды индивидуальная стресс-резистентность меняется, и организм особенно уязвим в периоды созревания (влияет на дальнейшее развитие и продуктивность) и гестации (влияет на развитие и продуктивность потомства) [10]. Существование эустресса как положительного воздействия, при котором защитные реакции протекают без потерь для организма, важно для полноценной адаптации. Дистресс, являясь антагонистом эустресса, при длительном воздействии ведёт к мобилизации и расходу чрезмерного количества адаптационных резервов, ухудшению физиологических функций, срыву адаптации и развитию соматических и психологических расстройств [23, 27].

Адаптация — системный, развивающийся по стадиям процесс приспособления организма к стрессовым факторам, активация защитных приспособительных механизмов. Адаптация, протекающая на системном уровне с вовлечением всех или большинства систем организма, получила название общего адаптационного синдрома [2]. В его динамике выделяют три стадии. Первая стадия — реакция тревоги: это остропротекающая стадия, происходит активная мобилизация адаптационных процессов в организме в ответ на всякое смещение гомеостаза. Вторая стадия — резистентность: устанавливается повышенная сопротивляемость ко всем стресс-факторам, она носит неспецифический характер. При стрессе, слишком сильном или длительном, когда защитные механизмы не справляются, снижается резистентность не только к действующему, но и другим стрессорам, наступает стадия истощения [3, 5]. Для поддержания продуктивности и качества продукции без негативного воздействия на здоровье животных снижение стресса имеет важное значение для животноводства [28]. В настоящее время для этого используются различные стратегии: оптимизация условий содержания, балансировка рационов, использование биологически активных веществ, в том числе антиоксидантов и адаптогенов [14].

Системные изменения при стрессе: нейроэндокринные, метаболические и клинические маркеры. Стрессовые реакции у животных носят неспецифический характер и варьируются в зависимости от вида, однако выделяются общие паттерны, затрагивающие нейроэндокринную, метаболическую и физиологическую системы. У свиней, как высокочувствительных к стрессу животных, эти реакции выражены ярко, что требует детального анализа для оптимизации их содержания [1, 3, 29]. К неспецифическим поведенческим и физиологическим реакциям относят: снижение или потерю аппетита, психоэмоциональное возбуждение или апатию, мышечный тремор, тахикардию, учащение дыхания, повышение температуры тела, цианоз слизистых оболочек, усиление диуреза и дефекации [1]. Эти симптомы связаны с активацией симпатической нервной системы и гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси [30, 31].

Изменения в биохимическом профиле крови служат ключевым индикатором стрессовой нагрузки по следующим показателям: электролитному дисбалансу (снижение уровня калия, натрия, хлора и кальция при одновременном повышении неорганического фосфора) [32, 33]; нарушению липидного и белкового обмена (увеличение свободных жирных кислот, холестерина, пировиноградной кислоты, снижение уровня летучих жирных кислот и альбуминов) [34, 35]; окислительному стрессу (активация перекисного окисления липидов с накоплением малонового диальдегида) [20, 26]; гормональному сдвигу (повышение кортизола, катехоламинов, адренкортикотропного гормона, а также снижение мелатонина, инсулина, лептина и вазопрессина) [36].

Физиологические реакции на стресс у животных охватывают изменения на уровне органов и систем. Со стороны сердечно-сосудистой системы повышается сердечный ритм и артериальное давление для обеспечения быстрого кровоснабжения мышц и органов [24, 37]. Дыхательная система стимулирует увеличение частоты дыхания и объёма вдоха для повышения поступления кислорода [29]. Замедление пищеварения в виде снижения перистальтики и аппетита вплоть до его полного отсутствия — это реакция со стороны пищеварительной системы [22, 34]. Активация симпатической нервной системы перераспределяет ресурсы организма на более важные в данный момент функции. Происходят различные метаболические изменения в липидном, белковом и других обменах, а также активация нейроэндокринной системы с выделением различных гормонов и медиаторов [22]. У животных наблюдаются различные поведенческие изменения, например агрессивность, апатия или изменение пищевого поведения [24, 28, 37]. Стресс оказывает влияние на репродуктивную функцию: у животных, находящихся в стрессовом состоянии, снижается репродуктивная активность, могут происходить задержки половой охоты, ухудшение качества ооцитов и увеличение количества абортотворений [31, 38, 39].

Молекулярные основы и клинические последствия оксидативного дисбаланса у свиней. Оксидативный стресс в организме развивается, когда продукция активных форм кислорода начинает превышать естественные возможности антиоксидантной системы [7, 6]. У свиней это состояние ассоциируется с воспалением, нарушением метаболизма, снижением продуктивности и качества продукции. Активация ядерного фактора транскрипции NF-κB как контролера экспрессии генов иммунного ответа и апоптоза происходит при воздействии активных форм кислорода [40, 41]. Стимулированная таким образом выработка провоспалительных цитокинов провоцирует продукцию новых свободных радикалов, замыкая порочный круг, где окислительный стресс запускает воспаление, а воспаление стимулирует окислительный стресс [41, 42]. Данный механизм лежит в основе целого ряда патологий, включая синдром «шелковичного сердца», повышение эпителиальной/кишечной проницаемости и каннибализм [43, 44].

Клинические проявления оксидативного стресса разнообразны. Под действием избыточного образования активных форм кислорода частично подавляется активность лимфоцитов и фагоцитов, что приводит к иммуносупрессии (снижению резистентности к бактериальным и вирусным агентам) [6, 8, 37]. Метаболические нарушения обусловлены перекисным окислением липидов и деградацией белков, что приводит к мышечной дистрофии и гепатопатиям [6, 9, 42]. Кроме того, избыток активных форм кислорода индуцирует апоптоз и некроз, повреждая ДНК и митохондриальные структуры.

Одним из периодов, характеризующихся высоким риском развития оксидативного стресса у свиней, является послеотъёмный период у поросят. Он представляет собой критическую фазу, сопровождающуюся социальным стрессом, резкой сменой рациона и неблагоприятными воздействиями различных стресс-факторов [8, 10]. Кормовой стресс является результатом перехода с легкоусвояемого молока свиноматки на твёрдый корм в основном из растительных компонентов. Непереваренный белок попадает в толстый кишечник и становится доступным для патогенных бактерий, способных вызвать воспаление и оксидативный стресс [9, 10]. Антиген бета-конглицинин сои способен индуцировать оксидативный стресс и воспалительные процессы как часть иммунного ответа на антиген [10, 45]. Другим критическим периодом является поздняя супоросность и лактация у высокопродуктивных свиноматок. В этот период происходит переход от анаболизма к катаболизму, резко возрастает потребность в энергии и антиоксидантной защите, что делает организм свиноматки особенно уязвимым к оксидативному повреждению [8, 9].

Нейроэндокринные механизмы стресс-индуцированных нарушений у свиней.

Стрессовое воздействие любой этиологии на организм вызывает ответную комплексную реакцию со стороны нейроэндокринной системы, направленную на регуляцию адаптации. Однако интенсивные или длительные воздействия стресс-факторов перегружают систему адаптации, приводя к дисфункции или истощению, что затрагивает гомеостаз организма и нарушает оптимальное функционирование его систем — метаболической, иммунной и репродуктивной [22, 27, 29]. При получении информации о воздействии стресс-фактора гипоталамус инициирует выработку кортикотропин-рилизинг-гормона, который стимулирует переднюю долю гипофиза к секреции адренотропного гормона. Последний, в свою очередь, индуцирует синтез кортизола в коре надпочечников. Кортизол играет ключевую роль в мобилизации энергетических ресурсов, усиливая глюконеогенез, липолиз и протеолиз [38]. Однако хроническая активность гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси приводит к нарушению системы отрицательной обратной связи, что может вызывать избыточное накопление кортизола и развитие патологических состояний [40, 46].

Кортизол как основной гормон стресса оказывает многовекторное воздействие на организм свиней. С одной стороны, он способствует адаптации, повышая уровень глюкозы в крови за счёт активации глюконеогенеза и мобилизации жирных кислот [38, 19]. С другой стороны, длительное повышение уровня кортизола приводит к иммуносупрессии, подавляя активность лимфоцитов, макрофагов и нейтрофилов, а также снижая синтез провоспалительных цитокинов [27, 30]. Стрессовые ситуации подавляют репродуктивную функцию через ингибирование гипоталамо-гипофизарно-гонадной оси. У лактирующих свиноматок стресс подавляет секрецию пролактина, что приводит к снижению молочной продуктивности и ухудшению выживаемости поросят.

Методы диагностики и оценки стресса у свиней. Эффективная коррекция стресс-индуцированных состояний невозможна без объективной и своевременной диагностики стресса. В промышленном свиноводстве оценка стрессовой нагрузки у животных традиционно осложняется отсутствием вербализованной обратной связи, стрессогенностью самих процедур отбора проб и необходимостью быстрого принятия решений. Наиболее доступным и не требующим специального оборудования подходом является регистрация поведенческих изменений. При остром стрессе у свиней наблюдаются двигательное возбуждение, вокализация (визг, хрюканье), попытки побега, тахипноэ, тремор мышц. При хроническом стрессе, напротив, развиваются апатия, снижение пищевой и исследовательской активности, лежачее положение, стереотипии (бордюрный грыз, «пустое жевание», маятникообразные движения головы) [24, 29, 30]. Поведенческие методы широко доступны для фермерского уровня, однако их недостатками являются субъективность, трудоёмкость и невозможность выявления субклинических форм стресса [21].

Основным биохимическим маркером стрессовой реакции у свиней считается концентрация кортизола [24, 28, 34]. Наиболее физиологично исследование кортизола в слюне, отражающее свободную, биологически активную фракцию гормона, тогда как в сыворотке крови определяется общий кортизол, включающий связанные с белками фракции. Важным методическим ограничением является циркадный ритм секреции кортизола с пиком в утренние часы и его быстрая реакция на стресс-факторы — рост через 5–15 минут после воздействия. Для ретроспективной оценки стресса перспективно определение кортизола в фекалиях, отражающего интегральный уровень за 12–24 часа [43, 46]. Параллельно с кортизолом целесообразно исследовать соотношение нейтрофилов к лимфоцитам (стресс-лейкограмму), которое при хроническом стрессе сдвигается в сторону нейтрофилии за счёт апоптоза лимфоцитов под действием глюкокортикоидов.

Ключевыми показателями оксидативного стресса, тесно связанного с общей стресс-реакцией, являются малоновый диальдегид (МДА) как конечный продукт перекисного окисления липидов, диеновые конъюгаты как ранние продукты липопероксидации, а также показатели антиоксидантной защиты — общая антиоксидантная активность, активность супероксиддисмутазы, каталазы и глутатионпероксидазы в эритроцитах [6, 8, 26]. Наиболее чувствительным показателем редокс-статуса клетки служит соотношение восстановленного глутатиона к окисленному (GSH/GSSG). Повышение МДА и снижение активности антиоксидантных ферментов свидетельствуют об истощении антиоксидантной системы и развитии оксидативного стресса.

Отдельного внимания заслуживают белки теплового шока семейства HSP70, которые рассматриваются как универсальный маркер клеточного стресса. При воздействии различных стресс-факторов (тепловой, оксидативный, технологический) происходит внутриклеточная аккумуляция HSP70, определяемая иммуноферментными методами. Преимуществом HSP70 является более медленная динамика по сравнению с кортизолом, что делает его удобным для диагностики хронического стресса [42, 39].

Среди инструментальных методов заслуживает внимания инфракрасная термография. Повышение температуры в области глазного яблока и века коррелирует с активацией симпатической нервной системы и увеличением уровня катехоламинов. Метод неинвазивен и позволяет проводить групповой скрининг за секунды, однако требует дорогостоящей тепловизионной аппаратуры и учёта внешних факторов (температура воздуха, влажность, сквозняки) [45]. Другим подходом является регистрация частоты сердечных сокращений и её вариабельности с помощью беспроводных датчиков, фиксируемых на ухе или груди свиньи. Тахикардия и снижение вариабельности сердечного ритма являются ранними и объективными признаками стресса [29, 30].

Для комплексной оценки соотношения про- и антиоксидантных систем используется коэффициент оксидативного стресса (отношение МДА к общей антиоксидантной активности), а в клинической практике свиноводства также применяется интегральный индекс стресс-чувствительности, сочетающий уровень кортизола, соотношение нейтрофилов/лимфоцитов и концентрацию глюкозы [4, 5, 9]. Углублённая оценка МДА, соотношения GSH/GSSG и HSP70 показана при возникновении вспышек заболеваний или в рамках научно-исследовательских работ. Таким образом, комплексное применение поведенческих, биохимических и инструментальных методов позволяет объективно оценить уровень стресса у свиней, выявить критические периоды оксидативной уязвимости и обосновать необходимость применения адаптогенов [4, 11].

Адаптогены как стресс-протекторы: общая характеристика и перспективы применения аскорбата лития. В современной научной литературе термин «адаптоген» прочно закрепился благодаря Н. В. Лазареву, который в середине XX века предложил его для обозначения веществ, повышающих неспецифическую резистентность организма к разнообразным стрессовым воздействиям [46]. Сегодня понимание механизмов действия этих соединений существенно расширилось: акцент делается на их мультифакторном влиянии. Адаптогены способны комплексно модулировать активность центральной нервной системы (в том числе через регуляцию нейротрансмиттеров), воздействовать на эндокринную регуляцию (прежде всего на гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковую ось и уровень кортизола), а также проявлять антиоксидантные свойства за счёт усиления эндогенной антиоксидантной защиты. При этом ключевыми критериями для отнесения вещества к адаптогенам по-прежнему остаются его способность защищать организм от широкого спектра негативных факторов, восстанавливать нарушенный физиологический гомеостаз и обладать приемлемым профилем безопасности [47, 48].

Особое практическое значение адаптогены приобретают в ветеринарии, в частности в интенсивном свиноводстве. В условиях современных производств животные регулярно сталкиваются с технологическими стрессами, что ведёт к нарушению гомеостаза, снижению продуктивности и повышению риска заболеваний. В этой связи применение адаптогенов рассматривается как рациональная стратегия для коррекции стресс-индуцированных нарушений [48].

Традиционно адаптогены классифицируют по происхождению, что напрямую отражает различия в их химическом составе, механизмах действия и спектре эффектов.

Растительные адаптогены (фитоадаптогены) – наиболее изученная группа. К числу значимых представителей относят женьшень (*Panax ginseng*), родиолу розовую (*Rhodiola rosea*), элеутерококк колючий (*Eleutherococcus senticosus*), лимонник китайский (*Schisandra chinensis*) и аралию маньчжурскую [46]. Их фармакологическая активность обусловлена двумя основными классами биологически активных соединений. Тритерпеновые сапонины (например, гинзенозиды в женьшене) оказывают выраженное влияние на гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковую систему: они способны модулировать чувствительность рецепторов к кортикотропин-рилизинг-гормону (CRH) и адренкортикотропному гормону (АКТГ), обеспечивая «нормализующий» эффект — сглаживая избыточный выброс кортизола при стрессе, но не подавляя его полностью в нормальных условиях [49]. Фенилпропаноиды и их производные (розавин, салидрозид, лигнаны лимонника) участвуют в регуляции стресс-ответа, повышают устойчивость тканей к гипоксии и способствуют поддержанию высокой работоспособности [50].

На практике это реализуется через целый комплекс эффектов: ингибирование моноаминоксидазы (что ведёт к повышению концентрации дофамина и серотонина в синаптической щели и улучшает когнитивные функции, снижает тревожность); активацию эндогенных антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутаза, каталазы, глутатионпероксидазы) и прямое связывание свободных радикалов; оптимизацию митохондриальной функции (повышение синтеза АТФ, оптимизация дыхательной цепи); иммуномодулирующее и противовоспалительное действие (подавление провоспалительных сигнальных путей, таких как NF-κB и MAPK, и снижение продукции цитокинов, например IL-6 и TNF-α) [51].

Синергизм различных компонентов в составе растения усиливает общий адаптогенный эффект. Однако, несмотря на широкий спектр действия, большинство природных адаптогенов обладают умеренной антиоксидантной активностью и требуют длительного курсового применения для достижения устойчивого эффекта. Кроме того, стресс-протекторный эффект ограничен вариативностью химического состава в зависимости от условий произрастания и заготовки, что создает трудности при стандартизации [46, 49].

Адаптогены животного происхождения включают препараты на основе пантов марала и северного оленя, а также компоненты, выделенные из морских биоресурсов [52]. Особого внимания заслуживает направление, связанное с использованием вторичных продуктов переработки рыбной промышленности: в условиях Приморского края проводились исследования по применению таких отходов в качестве источника природных адаптогенных веществ для поросят-отъёмышей, что является перспективным изысканием с точки зрения ресурсосбережения и поиска средств поддержки молодняка в критические периоды выращивания [52]. Действие таких препаратов обусловлено богатым набором биологически активных молекул: пептидов, аминокислот, факторов роста (например, IGF-1, TGF-β), микро- и макроэлементов, липидов [46].

Синтетические адаптогены — это искусственно созданные соединения, которые разрабатываются для целенаправленного воздействия на конкретные звенья стресс-ответа

и метаболизма. Их преимущество заключается в более предсказуемом фармакологическом эффекте и возможности точной дозировки. Примерами служат протеинат селена («Селенопиран»), дигидрокверцетин и некоторые соединения лития [51].

Селен в форме протеината лучше усваивается и дольше циркулирует в крови, обеспечивая пролонгированную антиоксидантную поддержку; в сочетании с витамином Е наблюдается синергия. Витамин Е обрывает цепь перекисного окисления липидов в мембранах, а селенозависимые ферменты (глутатионпероксидаза) обезвреживают образующиеся гидроперекиси [53, 54].

Механизм действия дигидрокверцетина (флавоноид) обуславливает многоуровневую систему с разветвленной структурой отсроченного эффекта. Напрямую нейтрализует свободные радикалы и хелатирует ионы переходных металлов (Fe, Cu), катализирующих образование гидроксильных радикалов, с последующей модуляцией сигнальных путей (в частности, влияет на Nrf2-зависимую экспрессию антиоксидантных генов, усиливая эндогенную защиту), что оказывает метаболические эффекты (улучшает чувствительность к инсулину, регуляция липидного обмена и снижение продукции провоспалительных медиаторов). Отдельно стоит отметить сосудистый и реологический эффект (улучшает микроциркуляцию, снижает агрегацию тромбоцитов, что особенно важно при стрессорных нарушениях кровотока) [55, 56].

Аскорбат лития как перспективный адаптоген полимодального действия.

Среди синтетических адаптогенов нового поколения особый интерес представляет аскорбат лития — органическая соль, в которой катион лития соединены с анионом аскорбиновой кислоты, обеспечивая синергетический эффект [57]. Литий участвует в модуляции нейромедиаторов (серотонин, дофамин), стабилизирует мембраны клеток и уменьшает окислительный стресс [58]. Аскорбиновая кислота обеспечивает антиоксидантную защиту посредством нейтрализации свободных радикалов, участвует в синтезе коллагена, стимулирует активность иммунных клеток [59].

Основной механизм действия аскорбата лития направлен на воздействие на ферментативную систему обмена гамма-аминомасляной кислоты (ГАМК) — ключевого тормозного нейромедиатора. В отличие от седативных средств и транквилизаторов, при таком механизме действия не происходит блокировки нейрорецепторов мозга, что является более физиологичным для организма и позволяет избежать угнетения поведения и продуктивности животных, которое часто наблюдается при использовании классических седативных препаратов [59].

Согласно данным исследований на крысах, безопасная доза аскорбата лития составляет 10–20 мг/кг массы тела в сутки, предельно допустимая доза — 50 мг/кг массы тела в сутки. Аскорбат лития относится к соединениям 5 класса токсичности (практически нетоксичные вещества) [57, 59]. При соблюдении рекомендуемых дозировок аскорбат лития является безопасным соединением, обладающим широким стресс-протекторным и антиоксидантным потенциалом, что расширяет перспективы его применения в животноводстве. Исследования на свиниматках показали, что применение аскорбата лития в дозе 10 мг/кг корма способствовало классическому стресс-протекторному эффекту обеспечивая поддержания концентрации уровня кортизола в сыворотке крови на 15–20% на физиологическом уровне. Одновременно проявляется антиоксидантный эффект за счет уменьшения концентрации малонового диальдегида (МДА) — ключевого маркера перекисного окисления липидов, повышению активности глутатионпероксидазы, что свидетельствует о выраженном антиоксидантном эффекте [16].

Кроме того, отмечено увеличение молочной продуктивности и сохранности поросят в подсосный период, что подтверждает практическую значимость применения данного адаптогена в критический период лактации [59].

В отличие от природных адаптогенов, которые требуют стандартизации по активным веществам и часто демонстрируют вариабельность эффектов, аскорбат лития представляет собой химически чистое соединение с воспроизводимыми фармакологическими свойствами, что делает его более предсказуемым инструментом для коррекции стресса.

Сравнительный анализ показывает, что большинство природных адаптогенов обладают умеренной антиоксидантной активностью и оказывают преимущественно тонизирующее действие на центральную нервную систему, но их стресс-протекторный эффект часто ограничен из-за необходимости длительного курсового применения и недостаточно выраженного влияния на ключевые звенья оксидативного стресса [Хабибуллин]. В отличие от них, аскорбат лития сочетает в себе центральное нейромодулирующее действие (через ГАМК-ергическую систему) с мощным периферическим антиоксидантным эффектом (за счёт аскорбиновой кислоты), что позволяет воздействовать одновременно на два ключевых звена патогенеза стресса: нейроэндокринную дисрегуляцию и оксидативный дисбаланс.

Таким образом, разнообразие происхождения и механизмов действия адаптогенов открывает широкие возможности для их применения в ветеринарии, где они могут стать эффективным инструментом профилактики и коррекции стресс-индуцированных нарушений. При этом аскорбат лития, благодаря своему двойному механизму действия, высокой безопасности и воспроизводимости эффекта, представляет собой наиболее перспективный адаптоген для внедрения в практику промышленного свиноводства.

Заключение. Обобщение результатов исследований показывает, что технологические и кормовые стресс-факторы индуцируют каскад нейроэндокринных нарушений, включающий гиперпродукцию кортизола и катехоламинов, которые закономерно приводят к иммуносупрессии, оксидативному повреждению клеток и снижению репродуктивной функции [1, 4, 16]. Хронический стресс переводит адаптационные резервы организма в русло дистресса с формированием метаболического «порочного круга», что подчёркивает интегративную роль стресса в снижении продуктивности свиней [19].

Независимо от этиологии стрессора, ключевым звеном повреждения является дисбаланс в системе прооксиданты/антиоксиданты с активацией NF- κ B-зависимого воспаления, что делает оксидативный стресс универсальной мишенью для коррекции [40, 41, 42]. Критические периоды, такие как ранний постнатальный онтогенез поросят и лактационный период у свиноматок, характеризуются наиболее низкой антиоксидантной ёмкостью плазмы, что диктует необходимость обязательной фармакологической поддержки именно в эти фазы. Традиционно используемые антиоксиданты (витамины Е и С, селен, полифенолы) эффективны преимущественно на периферии, но не воздействуют на центральные механизмы регуляции стресса [11, 42]. Именно это ограничение открывает перспективу для применения адаптогенов как класса соединений, способных повышать неспецифическую резистентность организма к широкому спектру стрессовых факторов [41, 44].

Адаптогены, благодаря своему комплексному действию на нейроэндокринную и антиоксидантную системы, представляют собой патогенетически обоснованный подход к коррекции стресс-индуцированных состояний в свиноводстве. В отличие от седативных средств и транквилизаторов, адаптогены не блокируют нейрорецепторы, а физиологически модулируют нейромедиаторные системы, что исключает угнетение поведения и продуктивности животных. Среди адаптогенов нового поколения наиболее перспективным представляется аскорбат лития, который сочетает центральное нейромодулирующее действие с мощным периферическим антиоксидантным эффектом, что подтверждается

снижением уровня кортизола, малонового диальдегида и повышением активности антиоксидантных ферментов в экспериментальных исследованиях [16].

Важным аспектом применения адаптогенов в животноводстве является их благоприятный токсикологический профиль. Соединения, относимые к классу адаптогенов (как природного, так и синтетического происхождения), при соблюдении рекомендуемых дозировок характеризуются низкой токсичностью и отсутствием тератогенного действия, что делает их безопасными для длительного применения у продуктивных животных.

Таким образом, адаптогены представляют собой перспективный класс стресс-протекторов для свиноводства, сочетающий нейромодулирующее действие с антиоксидантной активностью и низкой токсичностью. Переход от эмпирического применения отдельных антиоксидантов к патогенетически обоснованному использованию адаптогенов двойного действия (центральная нервная система и периферические антиоксидантные системы) может стать стратегическим направлением повышения стрессоустойчивости и продуктивности свиней в условиях интенсивного животноводства.

Литература

1. Курдеко А.П., Богомольцева М.В., Богомольцев А.В. Стресс: диагностика, лечение, профилактика : учеб.-метод. пособие. Витебск: ВГАВМ, 2017. 24 с.
2. Гуцол Л.О., Гузовская Е.В., Серебренникова С.Н., Семинский И.Ж. Стресс (общий адаптационный синдром) // БМЖ. 2022. № 1. С. 70 – 80.
3. van der Staay F.J., Schuurman T., Hulst M. et al. Effects of chronic stress: a comparison between tethered and loose sows // *Physiology & Behavior*. 2010. Vol. 100, № 2. P. 154 – 164.
4. Остренко К.С., Галочкин В.А., Громова О.А. и др. Аскорбат анион – эффективный противострессовый лиганд нового поколения для лития / К. С. Остренко, // Фармакокинетика и фармакодинамика. 2017. № 2. С. 45 – 52.
5. Остренко К.С., Галочкина В.П. Влияние адаптогенов нового поколения на продуктивность свиней // Сб. науч. тр. СКНИИЖ. 2019. № 2. С. 59 – 62.
6. Lykkesfeldt J., Svendsen O. Oxidants and antioxidants in disease: oxidative stress in farm animals // *The Veterinary Journal*. 2007. Vol. 173, № 3. P. 502 – 511.
7. Droge W. Free radicals in the physiological control of cell function // *Physiological Reviews*. 2002. Vol. 82, № 1. P. 47 – 95.
8. Berchieri-Ronchi C.B., Kim S.W., Zhao Y. et al. Oxidative stress status of highly prolific sows during gestation and lactation // *Animal*. 2011. Vol. 5, № 11. P. 1774 – 1779.
9. Hao Y., Xing M., Gu X. Research progress on oxidative stress and its nutritional regulation strategies in pigs // *Animals*. 2021. Vol. 11, № 5. P. 1384.
10. Wang L., Li W., Xin S. et al. Soybean glycinin and β -conglycinin damage the intestinal barrier by triggering oxidative stress and inflammatory response in weaned piglets // *European J. of Nutrition*. 2023. Vol. 62, № 7. P. 2841 – 2854.
11. Шабанов П.Д. Адаптогены и антигипоксанты // *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*. 2003. № 3. С. 50 – 81.
12. Nekrasov R., Ostrenko K., Ovcharova A. et al. Effect of dihydroquercetin and vitamins E, C on the biochemical status and productive qualities of pigs under stress // *Agricultural Biology*. 2023. Vol. 58, № 4. P. 56 – 70.
13. Беккер Р.А., Быков Ю.В. Препараты лития в психиатрии, наркологии и неврологии. Ч. II. Биохимическая // *Acta Biomedica Scientifica*. 2019. № 2. С. 80 – 100.
14. Rowe M.K., Chuang D.M. Lithium neuroprotection: molecular mechanisms and clinical implications // *Expert Reviews in Molecular Medicine*. 2004. Vol. 6, № 21. P. 1 – 18.
15. Остренко К.С., Сардарян И.С. Исследование аскорбата лития на эмбриотоксичность и тератогенность у крыс линии Вистар // *Молодой ученый*. 2016. № 1 (105). С. 57 – 59.
16. Ostrenko K., Nekrasov R., Ovcharova A. et al. The Effect of Lithium Salt with Ascorbic Acid on the Antioxidant Status and Productivity of Gestating Sows // *Animals*. 2022. Vol. 12, № 7. P. 915.
17. Салехов С.А. Патогенетический анализ достоверности критериев классической триады стресса Г. Селье // *Вестн. НовГУ*. 2019. № 3 (115). С. 28 – 30.
18. Абрамович С.Г. Неспецифическая адаптационная реактивность и её роль в физиотерапии // БМЖ. 2001. № 1. С. 5 – 9.
19. Chrousos G.P. Stress and disorders of the stress system // *Nature Reviews Endocrinology*. 2009. Vol. 5, № 7. P. 374 – 381.

20. Патологическая физиология экстремальных состояний / под ред.: П.Д. Горизонтова, Н.Н. Сиротинина. М.: Медицина, 1973. 383 с.
21. Панин Л.Е. Биохимические механизмы стресса / Л.Е. Панин; отв. ред. Д.Н. Маянский. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1983. 233 с.
22. Юкомзан Е.В. Адаптационные механизмы при различных видах стресса у животных // E-Scio. 2022. № 1 (64). С. 309 – 324.
23. Михайлис А.А. Эустресс, дистресс и суперстресс как варианты течения стресса: экспериментальные подходы, клинические параллели, патофизиологические основы // Здоровье и образование в XXI веке. 2008. — № 4. — С. 593–594.
24. Фёдорова А.О., Кухаренко Н.С. Стресс-фактор и реакция организма животных на его влияние : моногр. Благовещенск: Дальневосточный ГАУ, 2021. 216 с.
25. Иващенко В.В., Кирпатовский В.И., Чернышев И.В. и др. Гипохлорит натрия и общий адаптационный синдром Селье // ЭКУ. 2012. № 3. С. 15 – 18.
26. Аникин Д.А., Соловьева И.А., Демко И.В. и др. Свободнорадикальное окисление как патогенетическое звено метаболического синдрома // Ожирение и метаболизм. 2022. Т. 19, № 3. С. 306 – 316.
27. McEwen B.S. Physiology and neurobiology of stress and adaptation: central role of the brain // Physiological Reviews. 2007. Vol. 87, № 3. P. 873 – 904.
28. Moberg G.P., Mench J.A. Biology of animal stress. Wallingford: CABI Publishing, 2000. 388 p.
29. Ермакова И.В. Современные представления о механизмах регуляции функции гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы // Новые исследования. 2014. № 4 (41). С. 77-86.
30. Кубасов Р.В. Гормональные изменения в ответ на экстремальные факторы внешней среды // Вестн. РАМН. 2014. № 9-10. С. 102 – 109.
31. Литвицкий П.Ф. Нарушения ионного обмена // ВСП. 2015. № 3. С. 349 – 357.
32. Ковальчикова М., Ковальчик К. Адаптация и стресс при содержании и разведении сельскохозяйственных животных. М.: Колос, 1978. 271 с.
33. Ангиров А.В., Манжиев В.И., Мыева А.В. Стресс как физиологическая реакция: нейроэндокринные механизмы и его влияние на организм // Вестн. науки. 2024. № 12(81). С. 1420–1426.
34. Немец В.В., Виноградова Е.П. Стресс и стратегии поведения // Нац. психологический журн. 2017. № 2 (26). С. 59 – 72.
35. Беляева И.А. Стресс и его влияние на сердечно-сосудистую систему // Терапия. 2022. Т. 8, № 9. С. 119 – 128.
36. Лебедева Д.А., Игонина Т.Н., Брусенцев Е.Ю. и др. Влияние гонадотропной стимуляции яичников в условиях хронического психосоциального стресса на качество ооцитов мышей // Рос. физиологический журн. им. И. М. Сеченова. 2024. Т. 110, № 6. С. 930 – 944.
37. Gessner D.K., Fiesel A., Most E. et al. Supplementation of a grape seed and grape marc meal extract decreases activities of the oxidative stress-responsive transcription factors NF-κB and Nrf2 in the duodenal mucosa of pigs // Acta Veterinaria Scandinavica. 2013. Vol. 55, № 1. P. 18.
38. Corset A., Remot A., Graulet B. et al. Effects of parity and week after calving on the metabolic, redox, and immune status of dairy cows // J. Dairy Sci. 2024. Vol. 107, № 10. P. 8592 – 8608.
39. Клейменова Н.В., Смагина Т.В., Химичева С.Н. Терапия последствий каннибализма в промышленном свиноводстве // Вестн. ОрелГАУ. 2016. № 2. С. 84 – 88.
40. Кохан С.Т., Кривошеева Е.М. Экспериментальное исследование антиоксидантных свойств растительных адаптогенов // Вестн. фармации. 2010. № 4 (50). С. 29 – 33.
41. Трофимова Л.К., Сурова И.А., Маслова М.В. Влияние однократного иммобилизационного стресса на метаболизм ГАМК и поведение беременных и небеременных самок крыс в раннем постстрессорном периоде // Нейрохимия. 2009. Т. 26, № 3. С. 220 – 224.
42. McComb M.A. et al. Expression of stress proteins in porcine tissues: developmental changes and effect of immunological challenge // J. Anim. Sci. 1997. Vol. 75, № 1. P. 104 – 109.
43. Ostrenko K.S., Lemiasheuski V.O., Ovcharova A.N. et al. Effect of adaptogens on the quality of pig meat // Ukrainian J. of Ecology. 2020. Vol. 10, № 1. P. 344 – 348.
44. Cruz Neto G.A. et al. Infrared thermography as a non-invasive method to quantify the heat stress response in weaned piglets after road transport in a semi-arid region // International J. of Biometeorology. 2025. Vol. 69, № 3. P. 633 – 642.
45. Stewart M., Webster J.R., Schaefer A.L. et al. Infrared thermography as a non-invasive tool to assess stress in pigs // Animal Welfare. 2015. Vol. 24, № 2. P. 137 – 145.
46. Panossian A., Hambardzumyan M., Hovhanissyan A., Wikman G. The adaptogens rhodiola and schizandra modify the response to immobilization stress in rabbits by suppressing the increase of phosphorylated stress-activated protein kinase, nitric oxide and cortisol // Drug Target Insights. 2007. Vol. 2. P. 39 – 54.

47. Shantanova L.N., Olennikov D.N., Matkhanov I.E. et al. Rhaponticum uniflorum and Serratula centauroides Extracts Attenuate Emotional Injury in Acute and Chronic Emotional Stress // *Pharmaceuticals* (Basel). 2021. Vol. 14, № 11. P. 1186.
48. Such S., Puchalski C., Kogut Ł., Zaguła G. System-Level, Molecular and Cellular Mechanisms of Selected Plant Adaptogens-A Review // *Nutrients*. 2026. Vol. 18, № 6. P. 931.
49. Кохан С.Т., Патеюк А.В., Кривошеева Е.М. Стресс-протекторное действие растительных адаптогенов в эксперименте // *Acta Biomedica Scientifica*. 2015. № 3 (103). С. 38 – 42.
50. Максимович Н.Е., Бонь Е.И. Белки теплового шока. Свойства. Роль в адаптации. Методические подходы к определению // *Биомедицина*. 2020. № 16 (2). С. 60 – 67.
51. Алексеева Э.А., Шантанова Л.Н. Молекулярные механизмы действия растительных адаптогенов // *Вестн. Бурятского гос. ун-та. Медицина и фармация*. 2021. № 2. С. 16 – 22.
52. Хабибуллин Р.М., Миронова И.В., Хабибуллин И.В. и др. Влияние адаптогенов растительного и животного происхождения и физических нагрузок на организм // *Наука и спорт: соврем. тенденции*. 2022. Т. 10, № 1. С. 49 – 54.
53. Kurkutow E.O., Shainyan B.A. Iodine-Mediated Alkoxyseleenylation of Alkenes and Dienes with Elemental Selenium // *Molecules*. 2022. Vol. 27, № 19. P. 6169.
54. Миних В.Б. Базовые аспекты метаболизма селена и биосинтеза селенопротеинов в организме человека // *Успехи биологической химии*. 2022. Т. 62. С. 369 – 390.
55. Миняйло Л.А., Корчина Т.Я., Корчин В.И. и др. Оценка антиоксидантного действия дигидрокверцетина у взрослых жителей Севера в условиях неблагоприятных воздействий среды обитания // *Здоровье населения и среда обитания*. 2023. Т. 31, № 4. С. 63 – 69.
56. Халилов Р.А., Джафарова А.М., Рабаданова З.Г., Джафаров М.Б. Влияние дигидрокверцетина на интенсивность оксидативного стресса в митохондриях печени крыс при гипотермии // *Рос. физиологический журн. им. И.М. Сеченова*. 2024. Т. 110, № 6. С. 945 – 958.
57. Пронин А.В., Громова О.А., Сардарян И.С. и др. Адаптогенные и нейрпротективные свойства аскорбата лития // *Журн. неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2016. Т. 116, № 12. С. 86 – 91.
58. Torshin I.Y., Gromova O.A., Ostrenko K.S. et al. Lithium Ascorbate as a Promising Neuroprotector: Fundamental and Experimental Studies of an Organic Lithium Salt // *Molecules*. 2022. Vol. 27, № 7 (30). P. 2253.
59. Gęgotek A., Skrzydlewska E. Antioxidative and Anti-Inflammatory Activity of Ascorbic Acid // *Antioxidants* (Basel). 2022. Vol. 11, № 10. P. 1993.