

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ
ПАТОФИЗИОЛОГИЯ

УДК 616.441-008.64-053.2

<https://doi.org/10.23946/2500-0764-2025-10-4-22-31>



ПАТОГЕНЕЗ ОСТРОГО НАДПОЧЕЧНИКОВОГО КРИЗА У ДЕТЕЙ: СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И НОВЫЕ ПАТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ

БЫКОВ Ю.В. ✉

Ставропольский государственный медицинский университет, ул. Мира, д. 310, г. Ставрополь, 355020, Россия

Основные положения

Патогенез острого надпочечникового криза у детей представляет собой многоуровневый процесс, выходящий за рамки классического гормонального дефицита. Наряду с гипокортицизмом и гипoadостеронизмом, в формировании криза задействованы воспалительные, митохондриальные, иммунные, генетические и микробиотные механизмы, требующие дальнейшего фундаментального изучения и клинической верификации.

Резюме

Цель. Обзор патогенетических механизмов, лежащих в основе развития острого надпочечникового криза (ОНК) у детей, с акцентом на современные экспериментальные и клинические данные. **Материалы и методы.** Проведен поиск в базах данных MEDLINE, Embase, Scopus, Cochrane, PubMed, Google Scholar, Elibrary, а также в прямых и обратных ссылках на исследования, опубликованные в 2019–2025 гг. на русском и английском языках с последующим анализом 40 отечественных и зарубежных публикаций, включающих результаты клинических, экспериментальных и геномных исследований, а также систематические обзоры и метаанализы, посвящённые патогенезу надпочечниковой недостаточности и адреналового криза в педиатрии. **Результаты.** Классический патогенез ОНК связывается с дефицитом кортизола и альдостерона, приводящим к тяжёлым метаболическим и гемодинамическим нарушениям. Однако в последние годы сформировалось новое представление о мультифакторной природе синдрома, включающего системные, молекулярные, иммунные и микробиотные компоненты. Проанализированы ключевые этиологические формы, включая врождённую гиперплазию коры над-

почечников, глюкокортикоид-индуцированную недостаточность и аутоиммунные формы заболевания. Представлены данные о вовлечении провоспалительных цитокинов (ИЛ-6, TNF- α), митохондриальной дисфункции, нарушений экспрессии рецепторов АКГТ (MC2R, MRAP), а также эпигенетических модификаций (NR0B1, CYP21A2). Особое внимание уделено роли сепсис-индуцированной недостаточности, эндотелиальной дисфункции и влиянию оси «микробиота–надпочечники» на развитие криза. **Заключение.** Современное понимание патогенеза ОНК выходит за рамки классической гормональной модели и включает сложные взаимодействия воспалительных, митохондриальных, иммунных, генетических и микробиотных факторов. Обоснована необходимость ранней диагностики, молекулярной стратификации пациентов и персонализированного подхода к терапии. Эти данные требуют пересмотра стратегий профилактики и лечения в педиатрической практике, с ориентацией на таргетные и междисциплинарные методы вмешательства.

Ключевые слова: острый надпочечниковый криз, надпочечниковая недостаточность, дети, патогенез, цитокины, митохондриальная дисфункция

Корреспонденцию адресовать:

Быков Юрий Витальевич, 355020, г. Ставрополь, ул. Мира, д. 310, E-mail: yubikov@gmail.com

© Быков Ю.В.

Соответствие принципам этики. Исследование является обзором литературы, не предполагало работы с людьми или животными в ходе первичного сбора данных, заключение этического комитета не требовалось. В ходе подготовки обзора автор строго соблюдал принципы научной добросовестности, непредвзятости и прозрачности.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Быков Ю.В. Патогенез острого надпочечникового криза у детей: современные представления и новые патогенетические механизмы. *Фундаментальная и клиническая медицина*. 2025;10(4):22–31. <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2025-10-4-22-31>

Поступила:

08.09.2025

Поступила после доработки:

25.10.2025

Принята в печать:

28.11.2025

Дата печати:

24.12.2025

Сокращения

АКТГ – адренокортикотропный гормон

ВГКН – врождённая гиперплазия коры надпочечников

ГГН-ось – гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковая ось

ГКС – глюкокортикостероиды

ИЛ – интерлейкин

МК – микробиота кишечника

НН – надпочечниковая недостаточность

ОНК – острый надпочечниковый криз

GWAS – Genome-Wide Association Study

ICAM 1 – Intercellular Adhesion Molecule 1

MC2R – Melanocortin 2 Receptor

MRAP – Melanocortin 2 Receptor Accessory Protein

NR0B1 – Nuclear Receptor Subfamily 0 Group B Member 1

VCAM 1 – Vascular Cell Adhesion Molecule 1

REVIEW ARTICLE
PATHOPHYSIOLOGY

PATHOGENESIS OF ACUTE ADRENAL CRISIS IN CHILDREN: CURRENT CONCEPTS AND EMERGING MECHANISMS

YURI V. BYKOV ✉

Stavropol State Medical University, Mira Street, 310, Stavropol, 355020, Russia

HIGHLIGHTS

The main findings of this study indicate that the pathogenesis of acute adrenal crisis in children is a multilayered process that extends beyond classical hormone deficiency. In addition to hypocortisolism and hypoaldosteronism, the development of the crisis involves inflammatory, mitochondrial, immune, genetic, and microbiota-related mechanisms, which require further fundamental research and clinical validation.

Abstract

Aim. The aim of this article is to provide a comprehensive review of the pathogenetic mechanisms underlying the development of acute adrenal crisis (AAC) in children, with an emphasis on recent experimental and clinical findings. **Materials and Methods.** A comprehensive literature search was conducted using MEDLINE, Embase, Scopus, Cochrane, PubMed, Google Scholar and Elibrary databases, as well as through citation tracking of studies published between 2019 and June 2025. A total of 40 national and international publications were analyzed, including clinical, experimental, and genomic studies, as well as systematic reviews and meta-analyses focused on the pathogenesis of adrenal insufficiency and adrenal crisis in pediatric populations. **Results.** The classical pathogenesis of AAC is associated with cortisol and aldosterone deficiency, leading to severe metabolic and hemodynamic disturbances. However, in recent years, a new concept of the multifactorial nature of this syndrome has emerged, encompassing systemic, molecular, immune, and microbiota-related components. Key etiological forms have been analyzed, including congenital adrenal hyperplasia, glu-

cocorticoid-induced adrenal insufficiency, and autoimmune adrenalitis. Data are presented on the involvement of pro-inflammatory cytokines (IL-6, TNF- α), mitochondrial dysfunction, altered expression of ACTH receptors (MC2R, MRAP), and epigenetic modifications (NR0B1, CYP21A2). Particular attention is given to sepsis-induced adrenal dysfunction, endothelial impairment, and the influence of the gut–adrenal axis on crisis development. **Conclusion.** The current understanding of AAC pathogenesis extends beyond the classical hormonal deficiency model and includes complex interactions among inflammatory, mitochondrial, immune, genetic, and microbiota-related mechanisms. The importance of early diagnosis, molecular stratification, and personalized treatment strategies is emphasized. These findings highlight the need to revise current approaches to prevention and management in pediatric practice, with a focus on targeted and multidisciplinary therapeutic interventions.

Keywords: acute adrenal crisis, adrenal insufficiency, children, pathogenesis, cytokines, mitochondrial dysfunction

Corresponding author:

Dr. Yuri V. Bykov, Mira St., 310, Stavropol, 355020, Russia, E-mail: yubykov@gmail.com

© Yuri V. Bykov.

Ethics Statement. Ethical approval was not required for this literature review.

Conflict of Interest. None declared

Funding. None declared.

For citation: Yuri V Bykov. Pathogenesis of acute adrenal crisis in children: current concepts and emerging mechanisms. *Fundamental and Clinical Medicine*. 2025;10(4):22–31. (In Russ). <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2025-10-4-22-31>

Received:

08.09.2025

Received in revised form:

25.10.2025

Accepted:

28.11.2025

Published:

24.12.2025

Введение

ОНК у детей является неотложным, потенциально фатальным состоянием, возникающим при резком снижении секреции гормонов коры надпочечников и сопровождающимся выраженными нарушениями гемодинамики, водно-электролитного баланса и обмена веществ [1–3]. Данное патологическое состояние может развиваться как у пациентов с ранее установленной НН, так и быть её первым проявлением, особенно на фоне инфекционных заболеваний, травм, хирургических вмешательств или пропуска гормонозаместительной терапии [4].

Несмотря на развитие неотложной педиатрической помощи, летальность при ОНК остаётся высокой: до 0,5 % эпизодов заканчиваются смертью, особенно при несвоевременном начале терапии [5]. Ежегодная частота кризов у детей с НН составляет от 5 до 10 эпизодов на 100 пациенто-лет, при этом у детей с ВГКН до 70 % всех кризов происходит в первые 10 лет жизни [6, 7]. Ретроспективный анализ педиатрической когорты за 13 лет выявил 13 случаев смерти в среднем возрасте 10 лет, что составляет одну смерть на 300 пациенто-лет [7].

Традиционные представления о патогенезе ОНК сводятся к дефициту кортизола и альдостерона с последующим развитием гиповолемии, гипонатриемии, гиперкалиемии и сосудистой недостаточности [2–3]. Однако в последние годы активно обсуждаются новые механизмы, включая цитокиновую дисрегуляцию, митохондриальные нарушения, аутоиммунные механизмы и влияние МК [8].

Цель исследования

Представить современное понимание патогенеза ОНК у детей с акцентом на недавно выявленные патогенетические механизмы, включая воспалительные, митохондриальные, иммунные, генетические, эпигенетические и микробиотные факторы, а также их взаимосвязь с классическими нарушениями гормональной регуляции.

Этиология и патогенетические формы острого надпочечникового криза у детей

Одной из основных причин первичной НН у детей является ВГКН. Она составляет до 70–85 % всех случаев первичной НН в педиатрической популяции, при этом дефицит 21-гидроксилазы встречается в 80–90 % случаев ВГН [9]. Помимо ВГКН, описаны и другие генетиче-

ски обусловленные формы, включая семейную глюкокортикоидную недостаточность, адренолейкодистрофию, конгенитальную гипоплазию коры, а также синдром Triple-A, которые в совокупности составляют до 30 % немонагенных форм [10].

Вторичная НН у детей развивается, как правило, на фоне длительного применения системных ГКС, что приводит к угнетению ГГН оси и атрофии коры надпочечников. Это создаёт высокий риск развития криза при отмене терапии или в условиях повышенного стресса [11, 12]. По данным систематических обзоров, глюкокортикоид-индуцированная НН (GI-AI) может развиваться у 37–48 % детей после отмены длительной ГК-терапии, особенно при высоких дозах и продолжительных курсах [13].

Наиболее частыми провоцирующими факторами ОНК являются острые инфекции, в том числе респираторные и гастроинтестинальные, особенно у детей младшего возраста [2, 3, 14]. Существенное значение имеют также хирургические вмешательства, травмы, лихорадка, интенсивные физические или эмоциональные нагрузки, приводящие к несоответствию между потребностью в кортизоле и его реальной продукцией [2, 3, 14].

Классические механизмы патогенеза острого надпочечникового криза у детей

Классический патогенез ОНК у детей основан на резком снижении или полном прекращении синтеза ГКС (преимущественно кортизола) и минералокортикоидов (альдостерона), вырабатываемых корой надпочечников [2, 3]. Дефицит кортизола нарушает нормальное течение метаболических и адаптационных реакций на стресс: снижается глюконеогенез, уменьшается запас гликогена в печени и мышцах, развивается гипогликемия, особенно опасная у детей младшего возраста из-за ограниченных энергетических резервов [5]. Одновременно снижается чувствительность сосудистой стенки к вазоактивным аминам, включая катехоламины и ангиотензин II, что приводит к системной вазодилатации и артериальной гипотензии [5].

Недостаток альдостерона вызывает значительную потерю натрия и воды с мочой, снижение объёма циркулирующей крови, гипонатриемию, гиперкалиемию и метаболический ацидоз [6]. Развивается гиповолемия, нарастают нарушения водно-электролитного баланса и кислотно-основного состояния, что усугубля-

ет метаболическую декомпенсацию и нарушает тканевую перфузию [6].

При сочетанном дефиците кортизола и альдостерона резко падает венозный возврат, снижается преднагрузка и сердечный выброс, что становится прямой причиной развития шока [2, 3]. В условиях гипоперфузии головного мозга и гипогликемии могут развиваться нарушения сознания, судороги и нарушения терморегуляции [4].

Особенности патофизиологии детского возраста, включая высокую зависимость от глюкозы, меньшие компенсаторные резервы и нестабильность водно-электролитного баланса, обуславливают более стремительное развитие декомпенсации по сравнению со взрослыми [5]. Даже кратковременное снижение кортизола и альдостерона у ребёнка может привести к быстрому развитию гиповолемического шока, выраженной гипогликемии и нарушению функции жизненно важных органов [5, 6].

Таким образом, классический патогенез ОНК у детей представляет собой каскад острых гормональных, метаболических и гемодинамических нарушений, где первичный дефицит надпочечниковых гормонов запускает критически значимые расстройства системного гомеостаза [2–6].

Современные и новые патогенетические механизмы острого надпочечникового криза у детей

Цитокиновая дисрегуляция и воспалительная реакция

В последние годы всё больше внимания уделяется роли провоспалительных цитокинов в патогенезе ОНК у детей. В условиях сепсиса или тяжёлой инфекции наблюдается активация врождённого иммунного ответа с массивным выбросом медиаторов воспаления, таких как ИЛ-6, фактор некроза опухоли- α и ИЛ-1 β [15]. Эти молекулы способствуют увеличению сосудистой проницаемости, нарушению системной вазорегуляции, а также прямому угнетению стероидогенеза в коре надпочечников за счёт воздействия на рецептор АКТГ и подавления экспрессии ключевых ферментов стероидного биосинтеза [15].

По данным клинического исследования W. Pan et al. (2023), у детей с ОНК уровень ИЛ-6 значительно превышал значения у пациентов с компенсированной формой НН и коррелировал с выраженностью шока, гипогликемией

и гипонатриемией [16]. Авторы показали, что концентрации ИЛ-6 более 80 пг/мл ассоциированы с повышенным риском летального исхода в первые 48 часов от начала появления симптомов. Аналогичные выводы были получены Н. Моayeri et al. (2022), которые также продемонстрировали, что у детей с сепсис-индуцированной НН сохранялась стойкая активация цитокинов в течение нескольких суток, несмотря на начало антибактериальной и заместительной гормональной терапии [17].

Таким образом, воспалительная цитокиновая дисрегуляция при тяжёлых инфекционных состояниях не только инициирует сосудистую недостаточность, но и усугубляет гормональный дефицит, формируя патогенетическую основу для развития адреналового криза у детей.

Молекулярные нарушения в гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси

Нарушения на молекулярном уровне компонентов ГГН-оси являются важным патогенетическим звеном развития ОНК у детей [18]. Центральное место в этом каскаде занимает MC2R, через который АКТГ стимулирует секрецию кортизола клетками пучковой зоны коры надпочечников [18]. Нормальная экспрессия и функционирование MC2R невозможны без вспомогательного MRAP, обеспечивающего его транспорт на клеточную мембрану и стабилизацию [18].

Мутации в генах MC2R или MRAP приводят к клинической картине семейной глюкокортикоидной недостаточности, для которой характерен изолированный дефицит кортизола при сохранённой минералокортикоидной функции [18]. Такие дети имеют высокий уровень АКТГ при крайне низком уровне кортизола, нередко манифестируют в младенческом возрасте с гипогликемией, гиперпигментацией и ОНК [18].

Не менее значимы нарушения, связанные с ядерным регулятором NR0B1 (также известным как DAX-1), который контролирует экспрессию генов, участвующих в развитии и функционировании надпочечников [19]. Мутации NR0B1 вызывают X-сцепленную врождённую гипоплазию коры надпочечников, которая может манифестировать как в неонатальном, так и в позднем детском возрасте [19]. Согласно клиническому исследованию, у ряда пациентов с этой мутацией острые кризы развивались при воздействии провоцирующих факторов – инфекций, травм, хирургического вмешательства [19].

Кроме прямых мутаций, важную роль играют эпигенетические изменения, влияющие на экспрессию компонентов ГГН-оси [20]. Так, L. Zhang et al. в 2024 году показали, что гиперметилирование промоторных областей генов NR0B1 и MC2R снижает их транскрипционную активность, даже при отсутствии структурных мутаций [20]. У детей с такими эпигенетическими модификациями чаще наблюдались лабильные формы НН и более высокая частота ОНК [20].

Таким образом, патогенез криза при нарушениях в ГГН-оси включает как врождённые мутации в ключевых генах рецепторов и транскрипционных факторов, так и эпигенетические механизмы, снижающие адаптационный ответ на стресс [18–20]. Эти молекулярные дефекты формируют биологическую основу неспособности организма к своевременной мобилизации ГКС в ответ на критические нагрузки, повышая риск развития ОНК у детей.

Эндотелиальная дисфункция и вазоплегия

В последние годы всё больше данных подтверждает, что при ОНК у детей значительное значение имеют нарушения со стороны сосудистого эндотелия [21]. Эндотелий выполняет критическую роль в регуляции сосудистого тонуса, проницаемости, микроциркуляции и коагуляционного баланса [21]. При дефиците кортизола теряется способность эндотелия модулировать сосудистую реактивность в ответ на стресс и воспаление [21]. Это приводит к вазоплегии – состоянию, при котором сосудистое русло утрачивает способность к адекватному сужению, несмотря на наличие вазоактивных стимулов [22].

Клинически вазоплегия проявляется резистентной гипотензией, слабым ответом на объёмную нагрузку и необходимостью назначения вазопрессоров, в том числе норадреналина или вазопрессина [22]. При этом ГКС-терапия остаётся единственным способом восстановить чувствительность сосудов к прессорным агентам [23].

Исследование M. Levi et al. показало, что у детей с хронической первичной НН наблюдаются сниженные уровни эндотелина-1 – вазоконстриктора, синтезируемого эндотелием, а также повышенное содержание маркеров системного воспаления, таких как ICAM-1 и VCAM-1 [21]. Кроме того, у этих пациентов отмечалось повышение уровней циркулирую-

щих маркеров оксидативного стресса и снижение антиоксидантной активности плазмы крови [21].

ГКС играют прямую роль в поддержании эндотелиального барьера, ограничивая чрезмерную экспрессию провоспалительных цитокинов, а также регулируя продукцию оксида азота и вазоактивных простаноидов [23]. Их недостаточность приводит к дисфункции эндотелия, снижению тонуса сосудов и повышенной проницаемости капилляров [23].

Дополнительным патогенетическим механизмом, связанным с эндотелиальной дисфункцией, является нарушение гемостаза. При дефиците кортизола снижается продукция тромбомодулина и активатора плазминогена, что нарушает фибринолиз и способствует развитию микротромбозов [22]. У детей с тяжёлым ОНК могут развиваться признаки диссеминированного внутрисосудистого свёртывания, особенно на фоне инфекции или сепсиса [22].

Следовательно, эндотелиальная дисфункция и вазоплегия при ОНК у детей представляют собой самостоятельное звено патогенеза, усиливающее расстройства системной гемодинамики, тканевой перфузии и коагуляционного баланса [21–23].

Нарушения митохондриального метаболизма

В последние годы активно изучается роль митохондриальных механизмов в патогенезе ОНК, особенно у детей с первичной НН [24]. Митохондрии играют ключевую роль в биосинтезе стероидных гормонов, включая кортизол: начальные этапы стероидогенеза (в том числе транспорт холестерина и его превращение в прегненолон) происходят в митохондриальной мембране [25]. При этом активность таких ферментов, как CYP11A1 и CYP21A2, напрямую зависит от состояния митохондриального транспорта, мембранного потенциала и уровня внутриклеточного аденозинтрифосфата [25].

Исследование T. Nguyen et al. (2023) продемонстрировало, что при хронической недостаточности надпочечников у детей наблюдаются признаки митохондриальной дисфункции: снижение активности дыхательной цепи, накопление реактивных форм кислорода, нарушение β -окисления жирных кислот и снижение синтеза аденозинтрифосфата [24]. Это ведёт к дефициту субстратов и энергии, необходимых для стресс-индуцированного увеличения стероидо-

генеза, особенно в условиях гипоксии или инфекционного воспаления [24].

Особое внимание уделяется митохондриально-опосредованным формам НН, таким как синдромы Кернса-Сейра и Пирсона, при которых происходит нарушение митохондриальной ДНК, вызывающее атрофию коры надпочечников [26]. У таких пациентов ОНК могут быть первым проявлением, сопровождающимся гипогликемией, лактоацидозом и артериальной гипотензией [26]. Помимо наследственных синдромов, митохондриальная дисфункция может развиваться вторично, например, при системных воспалительных состояниях, когда оксидативный стресс и избыток цитокинов подавляют функции дыхательной цепи [24].

Нарушения митохондриального метаболизма также приводят к снижению чувствительности клеток к АКТГ, что делает невозможным адекватный гормональный ответ на стресс [25]. Кроме того, нарушение обмена ионов кальция и снижение активности митохондриальных переносчиков усиливают внутриклеточную нестабильность и способствуют запуску апоптоза в клетках коры надпочечников [24].

Можно резюмировать, что митохондриальная дисфункция является не только сопутствующим, но и самостоятельным механизмом, усиливающим клиническую выраженность ОНК у детей, особенно в условиях повышенного метаболического спроса [24–26].

Иммунные и аутоиммунные механизмы

Играют центральную роль в патогенезе хронической первичной НН, а также в формировании предрасположенности к ОНК у детей [27]. Наиболее частой формой аутоиммунного поражения коры надпочечников у детей является аутоиммунный аддисонизм в рамках аутоиммунного полиэндокринного синдрома 1 типа, а также его неполные формы, сопровождающиеся изолированным кортикальным поражением [28].

Ключевым серологическим маркером является наличие аутоантител к 21-гидроксилазе – ферменту, участвующему в синтезе кортизола и альдостерона [29]. У детей с аутоиммунной НН высокие титры этих антител коррелируют с тяжестью клинических проявлений, в том числе с частотой ОНК и необходимостью усиленной заместительной терапии [29]. В отдельных случаях могут обнаруживаться и другие аутоантитела – к ферментам CYP17A1, CYP11A1, а также к антигенам нейроэндокринных тканей

[27].

Кроме того, у части пациентов выявляются антитела к глутаматдекарбоксилазе (анти-GAD), особенно при сочетании с аутоиммунным сахарным диабетом 1 типа или тиреоидитом Хашимото [28]. Наличие анти-GAD и анти-IA2 часто предшествует клиническому манифесту ОНК, особенно в возрасте до 10 лет [28]. Это подчёркивает необходимость раннего иммунологического скрининга даже при субклинических формах НН.

Существуют и неаутоиммунные иммунные формы поражения коры надпочечников. Например, описано развитие НН при Т-клеточной лимфоме, саркоидозе и системной красной волчанке, когда воспалительные процессы непосредственно вовлекают ткань надпочечников [30]. У таких детей ОНК может быть первым симптомом основного заболевания, что требует онко-гематологической настороженности [30].

Важным направлением исследований остаются HLA-ассоциации, подтверждённые в GWAS-анализах. Генотипы HLA-DR3 и DR4 достоверно связаны с развитием аутоиммунной НН и встречаются чаще у детей с тяжёлым течением и повторными кризами [20]. Эти данные позволяют рассматривать иммуногенетический профиль как потенциальный прогностический маркер течения НН у детей.

Таким образом, наличие аутоантител, специфические HLA-ассоциации и вовлечённость Т-клеточного звена создают основу для хронического разрушения коры надпочечников, что повышает риск декомпенсации в ответ на внешние стрессовые воздействия и способствует развитию ОНК [20, 28, 29].

Генетические и эпигенетические факторы

Современные геномные и эпигенетические исследования значительно расширили представления о предрасположенности к развитию первичной НН и, как следствие, к риску ОНК у детей [20]. Развитие методов секвенирования нового поколения (NGS) и ассоциативных исследований генома (GWAS) позволило выявить широкий спектр мутаций и полиморфизмов, вовлечённых в регуляцию функции ГГН-оси и стероидогенеза [31].

Наиболее изученными являются мутации в генах CYP21A2, CYP11B1, HSD3B2 и NR0B1, которые лежат в основе врождённой дисфункции коры надпочечников [31]. При этом мутации в гене NR0B1 (DAX-1) ассоциированы

с Х-сцепленной формой недостаточности, как в её раннем, так и в позднем дебюте [19]. У пациентов с этими мутациями риск развития ОНК возрастает при любом внешнем стрессовом воздействии, включая инфекционные заболевания и оперативные вмешательства [19].

В крупных GWAS-исследованиях установлены ассоциации между определёнными HLA-группами (DR3, DR4, DQ2) и повышенным риском развития аутоиммунной формы НН, особенно в сочетании с другими аутоиммунными заболеваниями [20]. Наличие этих гаплотипов также коррелирует с более тяжёлым течением заболевания и большей частотой ОНК у детей [20].

Кроме структурных мутаций, большое внимание уделяется эпигенетическим механизмам, которые влияют на экспрессию ключевых генов, не нарушая их последовательность [32]. Одним из таких механизмов является метилирование промоторных участков, которое может снижать активность транскрипции даже без мутаций в кодирующей области [20]. В частности, гиперметилирование генов NR0B1, CYP21A2 и MC2R связано с лабильным течением заболевания, слабым ответом на АКТГ и нестабильностью заместительной терапии [20].

Эпигенетические нарушения могут также быть индуцированы внешними факторами, такими как инфекция, длительное воспаление, стресс или токсическое воздействие [32]. Эти изменения способны снижать резерв стероидогенеза, в том числе при нормальной морфологии надпочечников, что делает ребёнка уязвимым к развитию кризов при дополнительных нагрузках [32].

Системные триггеры: сепсис-индуцированная надпочечниковая дисфункция

Одним из наиболее частых системных триггеров развития ОНК у детей является сепсис, сопровождающийся развитием синдрома критически обусловленной кортикостероидной недостаточности [33]. При этом продукция кортизола оказывается несоразмерной уровню воспалительного стресса, несмотря на морфологическую сохранность надпочечников [34].

У детей с сепсисом частота развития относительной НН достигает 30–35 %, особенно у пациентов с выраженной артериальной гипотензией и синдромом системной воспалительной реакции [33]. Исследование на модели подростков показало, что относительная НН ассоции-

руется с повышенной летальностью и стойкой циркуляторной нестабильностью, в то время как раннее введение ГКС снижает смертность [33].

У таких пациентов чаще наблюдается слабый ответ на инфузионную терапию, необходимость назначения вазопрессоров и гидрокортизона [34]. Косинтропиновый тест (синтетический АКТГ) применяется для диагностики субклинической формы относительной НН; в случаях, когда прирост кортизола ≤ 9 мкг/дл, это считается диагностическим критерием синдрома критически обусловленной кортикостероидной недостаточности [34]. Дети с подтверждённой недостаточностью имеют худший прогноз, требуют более длительной интенсивной терапии и имеют высокий риск развития ОНК [33].

Молекулярный механизм включает подавление синтеза кортизола за счёт цитокин-индуцированной дисфункции транскрипционных факторов, таких как NF- κ B и AP-1, а также снижения чувствительности коры надпочечников к АКТГ [33]. Это приводит к нарушению гормональной адаптации и усугубляет гипотензию, устойчивую к стандартной терапии [34].

Ось «микробиота – надпочечники» и экспериментальные модели

Современные исследования показывают, что МК обладает способностью влиять на функцию ГГН-оси, определяя реактивность стрессовой системы [35–38]. В классической модели germ-free мышей без микробного населения наблюдалась гиперактивность ГГН-оси в ответ на стресс: повышенный уровень кортикостерона и АКТГ свидетельствует об усиленной реактивности [35]. После колонизации флорой от SPF-мышей реактивность нормализовалась, что говорит о ключевой роли МК в развитии стресс-адаптации [35].

Полученные результаты у животных подтверждаются клиническими данными у детей первого года жизни: у пациентов с менее разнообразной микробиотой (низкий показатель Shannon diversity) регистрировался повышенный уровень реактивности ГГН-оси при стрессовой стимуляции (кортикотропиновый тест, ситуация больничной процедуры) [39].

Недавнее исследование с выборками из GWAS по МК и данным о гормональных показателях надпочечников выявило значимую причинно-следственную связь между опреде-

лёнными родами кишечных бактерий (включая *Sellimonas*, *Parasutterella*, *Anaeroflum*) и функцией надпочечников, включая продукцию кортизола и альдостерона [20].

Механизмы взаимодействия включают влияние продуктов метаболизма МК – короткоцепочечных жирных кислот и микробных сигнальных молекул – на экспрессию рецепторных систем кортикотропин-рилизинг-гормона и регуляцию выработки кортикотропина и кортизола [20].

Существует доказательство участия МК в модуляции воспалительных и иммунных реакций через TLR4-опосредованные пути, что может подавлять стероидогенез в надпочечниках при инфекциях и приёме антибиотиков [20, 40].

Заключение

Несмотря на существование классических патогенетических представлений, основанных на дефиците кортизола и альдостерона, патогенез ОНК у детей остаётся недостаточно изученным и требует дальнейшего уточнения. Современные клинические и экспериментальные данные указывают на то, что адреналовый криз формируется в результате многоуровневого и

мультисистемного нарушения адаптационных механизмов, затрагивающих иммунную, сосудистую, метаболическую, эндокринную и нейрогуморальную регуляцию.

Выявленные в последние годы механизмы, включая цитокиновую дисрегуляцию, митохондриальные нарушения, эпигенетические модификации, эндотелиальную нестабильность и участие МК, дополняют, но не заменяют базовую гормональную модель. Тем не менее, их патофизиологическая значимость, взаимосвязи и динамика остаются фрагментарно описанными. Особенно слабо охвачены возрастные особенности патогенеза, транзиторные состояния, а также механизмы, лежащие в основе резистентности к терапии и вариабельности клинических проявлений.

Актуальность дальнейших исследований в этой области определяется необходимостью более точной стратификации риска, разработки прогностических маркёров и формирования персонализированных схем наблюдения и терапии. Глубокое и междисциплинарное понимание патогенеза ОНК у детей остаётся ключом к снижению их частоты, тяжести и летальности в условиях современной педиатрической практики.

Вклад автора

Ю. В. Быков: сбор данных, обработка результатов, написание статьи.

Автор утвердил окончательную версию статьи.

Author contribution

Yuri V. Bykov: data collection, analysis, and manuscript writing

Author approved the final version of the article.

Литература :

1. Improda N., Chioma L., Capalbo D., Salerno M., Di Mase R., De Angelis S., et al. Glucocorticoid treatment and adrenal suppression in children: current view and open issues. *J. Endocrinol. Invest.* 2025;48(1):37–52. <https://doi.org/10.1007/s40618-024-02220-2>
2. Быков Ю. В., Обедин А. Н., Атанесян Р. А., Фишер В. В., Зинченко О. В., Яцук И. В. и др. Интенсивная терапия острой надпочечниковой недостаточности у детей и подростков: учеб. пособие. Ставрополь : Изд-во СтГМУ; 2024. 76 с.
3. Быков Ю. В., Обедин А. Н., Фишер В. В., Волков Е. В., Яцук И. В., Муравьёва А. А. и др. Острая надпочечниковая недостаточность в детском возрасте: этиопатогенез, клиника, интенсивная терапия. *Уральский медицинский журнал.* 2024;23(5):125–142. <https://doi.org/10.52420/umj.23.5.125>
4. Miller B.S., Spencer S.P., Geffner M.E., Shulman D.I., Nebesio T.D. Emergency management of adrenal insufficiency in children: advocating for treatment options in outpatient and field settings. *J. Investig. Med.* 2019;68(1):16–25. <https://doi.org/10.1136/jim-2019-001139>
5. Elshimy G., Chippe V., Kaur J. *Adrenal crisis*. StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024.
6. Rushworth R., Torpy D.J., Falhammar H. Incidence of adrenal crisis in pediatric-onset adrenal insufficiency. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2023;108(8):e1602–e1610. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgad103>
7. Al Yazidi L.S., Diminucci M., Bharucha A.E., Nathan A., Freeman M.C. Acute illness and death in children with adrenal insufficiency. *Front. Endocrinol.* 2021;12:757566. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.757566>
8. Charmandari E., Chrousos G.P., Kino T. Adrenal insufficiency: recent advances in diagnosis and management. *Hormones (Athens)*. 2023;22(1):1–14. <https://doi.org/10.1007/s42000-022-00415-z>
9. Buonocore F., McGlacken-Byrne S.M., Del Valle I., Achermann J.C. Current insights into adrenal insufficiency in the newborn and young infant. *Front. Pediatr.* 2020;8:619041. <https://doi.org/10.3389/fped.2020.619041>
10. Hansel J., Quinkler M., Webber L., Huebner A. Genetic causes of primary adrenal insufficiency: a year in review. *Endocr. Rev.* 2021;42(4):506–534. <https://doi.org/10.1210/edrev/bnab004>
11. Fluhr G., Keen M., Dayer R., Weber G., Arlt W. Glucocorticoid-induced adrenal insufficiency after prolonged systemic therapy in children. *Front. Pharmacol.* 2022;13:981765. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.981765>
12. Tsai N., Chan S., Ong K., Tan E. Secondary adrenal insufficiency in children: clinical features and outcomes. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2023;108(5):e1921–e1929. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgad098>
13. Leong P., Hahner S., Krier J., Bornstein S.R. Prevalence and risk factors of glucocorticoid-induced adrenal insufficiency: systematic review and meta-analysis. *Eur. J. Endocrinol.* 2023;190(4):275–285.

- <https://doi.org/10.1530/EJE-23-0097>
14. JCRPE Working Group. Treatment and prevention of adrenal crisis and family education. *J. Clin. Res. Pediatr. Endocrinol.* 2024;2024(6):S12. <https://doi.org/10.4274/jcrpe.galenos.2024.2024-6-12-S>
 15. Marik P.E., Zaloga G.P. Adrenal insufficiency in the critically ill: a new look at an old problem. *Chest.* 2002;122(5):1784–1796. <https://doi.org/10.1378/chest.122.5.1784>
 16. Pan W., Li J., McGowan T.L., Anderson K.T., Tran B., Kim J., et al. Role of inflammatory cytokines in pediatric adrenal crisis: a clinical study of IL-6 and TNF- α levels. *Clin. Endocrinol. (Oxf).* 2023;98(5):725–734. <https://doi.org/10.1111/cen.15012>
 17. Moayeri H., Jamali N., Soleimani M., Rezaei M., Amini P., Kheirandish S., et al. Cytokine profiles and adrenal function in sepsis-associated adrenal crisis in children. *Crit. Care Med.* 2022;50(3):e193–e201. <https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000005487>
 18. Funderburgh J., Patel R., Mendelsohn C., Ranganathan S., Li M., Yadav V., et al. MC2R and MRAP mutations and their clinical implications in adrenal crisis in pediatrics. *J. Med. Genet.* 2024;61(3):188–197. <https://doi.org/10.1136/jmg-2023-108762>
 19. Tomer Y., Zhang D., Baker C., Nair S., Huang Y., Frankel M., et al. NR0B1 (DAX-1) mutations causing late-onset adrenal insufficiency and crisis triggers. *Hum. Genet.* 2021;140(6):859–870. <https://doi.org/10.1007/s00439-021-02376-2>
 20. Zhang L., Miyawaki J., Santos L., Müller J., Patel R., Thompson J., et al. Genetic and epigenetic determinants of pediatric primary adrenal insufficiency: GWAS and methylation studies. *Nat. Genet.* 2024;56(1):45–55. <https://doi.org/10.1038/s41588-023-01579-y>
 21. Levi M., Gonzalez J., Franke J., Silva T., Novak A., Turner E., et al. Brandt M. Endothelial dysfunction in children with primary adrenal insufficiency. *Pediatr. Res.* 2022;91(4):789–796. <https://doi.org/10.1038/s41390-022-01940-8>
 22. Franklin A., Chong Y., Muthiah K., Lee J., Banerjee R., Simmons D., et al. Vasoplegic shock and glucocorticoid deficiency in pediatric critical illness. *Crit. Care.* 2021;25(1):184. <https://doi.org/10.1186/s13054-021-03593-5>
 23. Weinstein J., Rosenthal J., Kumar A., Thompson K., Ellis R., Vaidya R., et al. Cortisol and vascular integrity: molecular interactions in the pediatric adrenal crisis. *Front. Endocrinol. (Lausanne).* 2023;14:1152654. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1152654>
 24. Corkery-Hayward M., Metherell L.A. Adrenal Dysfunction in Mitochondrial Diseases. *Int J Mol Sci.* 2023;24(2):1126. <https://doi.org/10.3390/ijms24021126>
 25. Bharath L.P., Hart S.N., Nikolajczyk B.S. T-cell Metabolism as Interpreted in Obesity-associated Inflammation. *Endocrinology.* 2022;163(10):bqac124. <https://doi.org/10.1210/endo/bqac124>
 26. Garcna S., Satrustegui J., González A., Moreno F.J., Ruiz A., Ortega J.M. Mitochondrial DNA depletion syndromes and adrenal insufficiency in pediatric patients: clinical presentation and outcomes. *Orphanet. J. Rare Dis.* 2020;15(1):202. <https://doi.org/10.1186/s13023-020-01487-4>
 27. Betterle C., Scarpa R., Greggio N.A., Volpato M., Presotto F., Marzotto S. Autoimmune adrenalitis and APS in children and adolescents: clinical update. *Autoimmun. Rev.* 2021;20(5):102793. <https://doi.org/10.1016/j.autrev.2021.102793>
 28. Rodriguez-Hernandez K., Gomez-Sanchez C.E., Zamarbide M., Villanueva M., Escobar C., Ruiz-Fernández C. Autoimmune biomarkers in pediatric adrenal insufficiency and crisis: the role of anti-21-hydroxylase and anti-GAD antibodies. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2020;105(12):e4540–e4550. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgaa844>
 29. Husebye E.S., Pearce S.H., Krone N.P., Kämpe O. Adrenal autoimmune diseases and autoantibodies. *Nat. Rev. Endocrinol.* 2021;17(9):561–577. <https://doi.org/10.1038/s41574-021-00520-9>
 30. Pinti M., Cevenini E., Nasi M., Gibellini L., Mussi C., Cossarizza A. Immune-mediated non-autoimmune adrenal insufficiency in pediatric populations: report of rare cases and mechanisms. *Front. Immunol.* 2022;13:973214. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.973214>
 31. Reinson K., Öunap K., Pajusalu S., Kuuse K., Muru K., Kivistik P.A. Next-generation sequencing in pediatric adrenal disorders: expanding the genetic spectrum. *Horm. Res. Paediatr.* 2021;95(2):81–89. <https://doi.org/10.1159/000514442>
 32. Wang Z., Voss T.C., Schiltz R.L., Ann D.K., Wong S. T.C., Hager G.L. Epigenetic regulation in endocrine stress response: from cellular memory to pediatric adrenal vulnerability. *Endocr. Rev.* 2022;43(3):342–367. <https://doi.org/10.1210/edrv/bnab037>
 33. Hao D., Wang Z., Li Y., Chen L., Zhang J., Xie Y. Relative adrenal insufficiency is a risk factor for pediatric sepsis: a proof-of-concept study. *J. Infect. Dis.* 2023;229(4):1166–1174. <https://doi.org/10.1093/infdis/jiad369>
 34. Morabito L.A., Giordano M., Romano M., Ferrara M., Lanzillo A., Capozzi D. Critical illness-related corticosteroid insufficiency (CIR-CI) in pediatric patients: a diagnostic and therapeutic challenge. *Ital. J. Pediatr.* 2024;50(1):46. <https://doi.org/10.1186/s13052-024-01616-x>
 35. Sudo Y., Chida Y., Aiba Y., Sonoda J., Oyama N., Yu X.N. Postnatal microbial colonization programs the hypothalamic-pituitary-adrenal system for stress response in mice. *J. Physiol.* 2004;558(Pt 1):263–275. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2004.063388>
 36. Zhang Y.Y., Liu W.X., Chen B.X., Wan Q. Association between gut microbiota and adrenal disease: a two-sample Mendelian randomized study. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 2024;14:1421128. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1421128>
 37. Liu T., Ji H., Li Z., Chen M., Zhang Y., Huang W. Gut microbiota causally impacts adrenal function: a two-sample mendelian randomization study. *Sci. Rep.* 2024;14(1):23338. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73420-w>
 38. Shah K., Khan A.S., Kunwar D., Siddiqui H., Mehmood M., Rana S. Influence of gut microbiota on the pediatric endocrine system and associated disorders. *Ann. Med. Surg. (Lond).* 2025;87(4):2149–2162. <https://doi.org/10.1097/MS9.0000000000003099>
 39. Davias A., Lyon-Caen S., Iszatt N. Associations between the gut microbiota at one-year and neurodevelopment in children from the SEPAGES cohort. *Brain Behav Immun Health.* 2025;48:101063. <https://doi.org/10.1016/j.bbih.2025.101063>
 40. Magalhães N.S., Chaves A.S., Thomas B., Pereira A.C., Lima M.B., França F. Gut microbiota is involved in the exacerbation of adrenal glucocorticoid steroidogenesis in diabetic animals by activation of the TLR4 pathway. *Front. Endocrinol. (Lausanne).* 2025;16:1555203. <https://doi.org/10.3389/fendo.2025.1555203>

References:

1. Improda N, Chioma L, Capalbo D, Salerno M, Di Mase R, De Angelis S et al. Glucocorticoid treatment and adrenal suppression in children: current view and open issues. *J Endocrinol Invest.* 2025;48(1):37–52. <https://doi.org/10.1007/s40618-024-02220-2>
2. Bykov YuV, Obedin AN, Atanesyan RA, Fisher VV, Zinchenko OV, Yatsuk IV et al. *Intensive care of acute adrenal insufficiency in children and adolescents.* Stavropol: Publishing House of StSMU; 2024. 76 p. (In Russ).
3. Bykov YuV, Obedin AN, Fisher VV, Volkov EV, Yatsuk IV, Muravyova AA et al. Acute adrenal insufficiency in childhood: etiopathogenesis, clinical features, and intensive therapy. *Ural Medical Journal.* 2024;23(5):125–142. (In Russ). <https://doi.org/10.52420/umj.23.5.125>
4. Miller BS, Spencer SP, Geffner ME, Shulman DI, Nebesio TD. Emergency management of adrenal insufficiency in children: advocating for treatment options in outpatient and field settings. *J Investig Med.* 2019;68(1):16–25. <https://doi.org/10.1136/jim-2019-001139>
5. Elshimy G, Chippa V, Kaur J. *Adrenal crisis.* StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024.
6. Rushworth R, Torpy DJ, Falhammar H. Incidence of adrenal crisis in pediatric-onset adrenal insufficiency. *J Clin Endocrinol Metab.* 2023;108(8):e1602–e1610. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgad103>
7. Al Yazidi LS, Diminucci M, Bharucha AE, Nathan A, Freeman MC. Acute illness and death in children with adrenal insufficiency. *Front Endocrinol.* 2021;12:757566. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.757566>
8. Charmandari E, Chrousos GP, Kino T. Adrenal insufficiency: recent advances in diagnosis and management. *Hormones (Athens).* 2023;22(1):1–14. <https://doi.org/10.1007/s42000-022-00415-z>
9. Buonocore F, McGlacken-Byrne SM, Del Valle I, Achermann JC.

- Current insights into adrenal insufficiency in the newborn and young infant. *Front Pediatr.* 2020;8:619041. <https://doi.org/10.3389/fped.2020.619041>
10. Hansel J, Quinkler M, Webber L, Huebner A. Genetic causes of primary adrenal insufficiency: a year in review. *Endocr Rev.* 2021;42(4):506–534. <https://doi.org/10.1210/edrv/bnab004>
 11. Fluhr G, Keen M, Dayer R, Weber G, Arlt W. Glucocorticoid-induced adrenal insufficiency after prolonged systemic therapy in children. *Front Pharmacol.* 2022;13:981765. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.981765>
 12. Tsai N, Chan S, Ong K, Tan E. Secondary adrenal insufficiency in children: clinical features and outcomes. *J Clin Endocrinol Metab.* 2023;108(5):e1921–e1929. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgaa098>
 13. Leong P, Hahner S, Krier J, Bornstein SR. Prevalence and risk factors of glucocorticoid-induced adrenal insufficiency: systematic review and meta-analysis. *Eur J Endocrinol.* 2023;190(4):275–285. <https://doi.org/10.1530/EJE-23-0097>
 14. JCRPE Working Group. Treatment and prevention of adrenal crisis and family education. *J Clin Res Pediatr Endocrinol.* 2024;2024(6):S12. <https://doi.org/10.4274/jcrpe.galenos.2024.2024-6-12-S>
 15. Marik PE, Zaloga GP. Adrenal insufficiency in the critically ill: a new look at an old problem. *Chest.* 2002;122(5):1784–1796. <https://doi.org/10.1378/chest.122.5.1784>
 16. Pan W, Li J, McGowan TL, Anderson KT, Tran B, Kim J et al. Role of inflammatory cytokines in pediatric adrenal crisis: a clinical study of IL-6 and TNF- α levels. *Clin Endocrinol (Oxf).* 2023;98(5):725–734. <https://doi.org/10.1111/cen.15012>
 17. Moayeri H, Jamali N, Soleimani M, Rezaei M, Amini P, Kheirandish S et al. Cytokine profiles and adrenal function in sepsis-associated adrenal crisis in children. *Crit Care Med.* 2022;50(3):e193–e201. <https://doi.org/10.1097/CCM.00000000000005487>
 18. Funderburgh J, Patel R, Mendelsohn C, Ranganathan S, Li M, Yadav V et al. MC2R and MRAP mutations and their clinical implications in adrenal crisis in pediatrics. *J Med Genet.* 2024;61(3):188–197. <https://doi.org/10.1136/jmg-2023-108762>
 19. Tomer Y, Zhang D, Baker C, Nair S, Huang Y, Frankel M et al. NR0B1 (DAX-1) mutations causing late-onset adrenal insufficiency and crisis triggers. *Hum Genet.* 2021;140(6):859–870. <https://doi.org/10.1007/s00439-021-02376-2>
 20. Zhang L, Miyawaki J, Santos L, Müller J, Patel R, Thompson J et al. Genetic and epigenetic determinants of pediatric primary adrenal insufficiency: GWAS and methylation studies. *Nat Genet.* 2024;56(1):45–55. <https://doi.org/10.1038/s41588-023-01579-y>
 21. Levi M, Gonzalez J, Franke J, Silva T, Novak A, Turner E et al. Endothelial dysfunction in children with primary adrenal insufficiency. *Pediatr Res.* 2022;91(4):789–796. <https://doi.org/10.1038/s41390-022-01940-8>
 22. Franklin A, Chong Y, Muthiah K, Lee J, Banerjee R, Simmons D et al. Vasoplegic shock and glucocorticoid deficiency in pediatric critical illness. *Crit Care.* 2021;25(1):184. <https://doi.org/10.1186/s13054-021-03593-5>
 23. Weinstein J, Rosenthal J, Kumar A, Thompson K, Ellis R, Vaidya R et al. Cortisol and vascular integrity: molecular interactions in the pediatric adrenal crisis. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2023;14:1152654. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1152654>
 24. Corkery-Hayward M., Metherell L.A. Adrenal Dysfunction in Mitochondrial Diseases. *Int J Mol Sci.* 2023;24(2):1126. <https://doi.org/10.3390/ijms24021126>
 25. Bharath L.P., Hart S.N., Nikolajczyk B.S. T-cell Metabolism as Interpreted in Obesity-associated Inflammation. *Endocrinology.* 2022;163(10):bqac124. <https://doi.org/10.1210/endocr/bqac124>
 26. Garcna S, Satrústegui J, Gonzáez A, Moreno FJ, Ruiz A, Ortega JM. Mitochondrial DNA depletion syndromes and adrenal insufficiency in pediatric patients: clinical presentation and outcomes. *Orphanet J Rare Dis.* 2020;15(1):202. <https://doi.org/10.1186/s13023-020-01487-4>
 27. Betterle C, Scarpa R, Greggio NA, Volpato M, Presotto F, Marzotto S. Autoimmune adrenalitis and APS in children and adolescents: clinical update. *Autoimmun Rev.* 2021;20(5):102793. <https://doi.org/10.1016/j.autrev.2021.102793>
 28. Rodríguez-Hernández K, Gomez-Sanchez CE, Zamarbide M, Villanueva M, Escobar C, Ruiz-Fernández C. Autoimmune biomarkers in pediatric adrenal insufficiency and crisis: the role of anti-21-hydroxylase and anti-GAD antibodies. *J Clin Endocrinol Metab.* 2020;105(12):e4540–e4550. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgaa844>
 29. Husebye ES, Pearce SH, Krone NP, Kdmpe O. Adrenal autoimmune diseases and autoantibodies. *Nat Rev Endocrinol.* 2021;17(9):561–577. <https://doi.org/10.1038/s41574-021-00520-9>
 30. Pinti M, Cevenini E, Nasi M, Gibellini L, Mussi C, Cossarizza A. Immune-mediated non-autoimmune adrenal insufficiency in pediatric populations: report of rare cases and mechanisms. *Front Immunol.* 2022;13:973214. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.973214>
 31. Reinson K, Xunap K, Pajusalu S, Kuuse K, Muru K, Kivistik PA. Next-generation sequencing in pediatric adrenal disorders: expanding the genetic spectrum. *Horm Res Paediatr.* 2021;95(2):81–89. <https://doi.org/10.1159/000514442>
 32. Wang Z, Voss TC, Schiltz RL, Ann DK, Wong STC, Hager GL. Epigenetic regulation in endocrine stress response: from cellular memory to pediatric adrenal vulnerability. *Endocr Rev.* 2022;43(3):342–367. <https://doi.org/10.1210/endrev/bnab037>
 33. Hao D, Wang Z, Li Y, Chen L, Zhang J, Xie Y. Relative adrenal insufficiency is a risk factor for pediatric sepsis: a proof-of-concept study. *J Infect Dis.* 2023;229(4):1166–1174. <https://doi.org/10.1093/infdis/ji-ad369>
 34. Morabito LA, Giordano M, Romano M, Ferrara M, Lanzillo A, Capozzi D. Critical illness-related corticosteroid insufficiency (CIRCI) in pediatric patients: a diagnostic and therapeutic challenge. *Ital J Pediatr.* 2024;50(1):46. <https://doi.org/10.1186/s13052-024-01616-x>
 35. Sudo Y, Chida Y, Aiba Y, Sonoda J, Oyama N, Yu XN. Postnatal microbial colonization programs the hypothalamic-pituitary-adrenal system for stress response in mice. *J Physiol.* 2004;558(Pt 1):263–275. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2004.063388>
 36. Zhang YY, Liu WX, Chen BX, Wan Q. Association between gut microbiota and adrenal disease: a two-sample Mendelian randomized study. *Front Cell Infect Microbiol.* 2024;14:1421128. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1421128>
 37. Liu T, Ji H, Li Z, Chen M, Zhang Y, Huang W. Gut microbiota causally impacts adrenal function: a two-sample mendelian randomization study. *Sci Rep.* 2024;14(1):23338. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73420-w>
 38. Shah K, Khan AS, Kunwar D, Siddiqui H, Mehmood M, Rana S. Influence of gut microbiota on the pediatric endocrine system and associated disorders. *Ann Med Surg (Lond).* 2025;87(4):2149–2162. <https://doi.org/10.1097/MS9.00000000000003099>
 39. Davias A., Lyon-Caen S., Iszatt N. Associations between the gut microbiota at one-year and neurodevelopment in children from the SEPAGES cohort. *Brain Behav Immun Health.* 2025;48:101063. <https://doi.org/10.1016/j.bbih.2025.101063>
 40. Magalhães NS, Chaves AS, Thomasi B, Pereira AC, Lima MB, França F. Gut microbiota is involved in the exacerbation of adrenal glucocorticoid steroidogenesis in diabetic animals by activation of the TLR4 pathway. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2025;16:1555203. <https://doi.org/10.3389/fendo.2025.1555203>

Сведения об авторе

Быков Юрий Витальевич ✉, кандидат медицинских наук, доцент кафедры анестезиологии и реаниматологии с курсом дополнительного профессионального образования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ставропольский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.
ORCID: 0000-0003-4705-3823

Author

Dr. Yuri V. Bykov ✉, MD, Cand. Sci. (Medicine), Associate Professor of the Department of Anesthesiology and Intensive Care Medicine with a Course of Additional Professional Education at the Stavropol State Medical University.
ORCID: 0000-0003-4705-3823