



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Оригинальная статья
УДК 618.36-008.64:616-073.756.8
<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2026-3-43-56>

Централизация плодового кровотока при поздней задержке роста плода: МР-морфометрические критерии перехода от гемодинамической адаптации к структурной декомпенсации

Е. В. Столярова¹, Е. М. Сыркашев², В. А. Зорина³,
А. М. Холин⁴, З. С. Ходжаева⁵, А. И. Гус⁶

^{1, 2, 4-6} ФГБУ «НМИЦ акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В. И. Кулакова» Минздрава России, Москва, Россия

³ ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова» Минздрава России, Москва, Россия

⁶ ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН), Москва, Россия

¹ <https://orcid.org/0009-0001-2049-3119>

² <https://orcid.org/0000-0003-4043-907X>

³ <https://orcid.org/0009-0000-7832-2788>

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-4068-9805>

⁵ <https://orcid.org/0000-0001-8159-3714>

⁶ <https://orcid.org/0000-0003-1377-3128>

Автор, ответственный за переписку: Елизавета Валерьевна Столярова,
stolyarovchliza@yandex.ru

Аннотация

Актуальность. Поздняя задержка роста плода (ЗРП) — вторая по частоте причина перинатальной смертности, при этом уровень ее гиподиагностики из-за трудностей дифференциации с конституциональной маловесностью (МГВ) достигает 30–40 %. Хроническая гипоксия при поздней ЗРП запускает эффект централизации кровообращения (brain-sparing), однако истощение этого компенсаторного механизма ведет к структурной декомпенсации мозга плода. Разработка объективных МР-морфометрических критериев необходима для точной дифференциации патологической маловесности и оценки степени церебральных нарушений.

Цель исследования. Оценить значение МР-волюметрии головного мозга плода в диагностике поздней ЗРП и МГВ, а также определить влияние централизации кровотока на выраженность его структурных изменений.

© Столярова Е. В., Сыркашев Е. М., Зорина В. А., Холин А. М., Ходжаева З. С., Гус А. И., 2026

Материалы и методы. В проспективное исследование включены 147 беременных: группа контроля (СГВ, $n = 71$), МГВ ($n = 38$) и поздняя ЗРП ($n = 38$) согласно критериям консенсуса Delphi (2016). Вольтометрия супратенториального мозга и мозжечка проводилась методом ручной сегментации на аксиальных Т2-ВИ с использованием стороннего программного обеспечения (ITK-SNAP). Статистический анализ выполняли в JASP и MedCalc.

Результаты. При поздней ЗРП зафиксировано выраженное снижение объемов супратенториального мозга (244 против 294 см³ при МГВ и 334 см³ при СГВ ($p < 0,001$) и мозжечка (14,5 против 17,7 и 20,6 см³ ($p < 0,001$)). Наличие brain-sparing-эффекта (ЦПО < 5-го перцентиля ($n=25$)) ассоциировано с дополнительным уменьшением супратенториального объема на 11,6 %: 251 [206–270] против 284 [246–292] см³ в подгруппе без централизации ($p = 0,045$) при отсутствии различий по объему мозжечка ($p = 0,075$). Наибольшую ценность в дифференциации поздней ЗРП и МГВ показал супратенториальный объем (AUC = 0,738; чувствительность 64,9 %, специфичность 69,4 %), превзошедший объем мозжечка (AUC = 0,687); комбинированная модель не повышала точность (AUC = 0,733).

Заключение. При поздней задержке роста плода мультимодальный подход позволяет верифицировать структурный дефицит головного мозга, а супратенториальный объем становится решающим дифференциально-диагностическим критерием, отличающим патологическую маловесность (AUC = 0,738). Наличие доплеровских признаков централизации кровотока (ЦПО < 5-го перцентиля) ассоциировано с дополнительным снижением супратенториального объема на 11,6 % ($p = 0,045$), что свидетельствует об истощении компенсаторных механизмов и может служить маркером перехода к стадии декомпенсации.

Ключевые слова: задержка роста плода, маловесный для гестационного возраста, головной мозг плода, магнитно-резонансная томография, МРТ

Для цитирования: Столярова Е. В., Сыркашев Е. М., Зорина В. А., Холин А. М., Ходжаева З. С., Гус А. И. Централизация плодового кровотока при поздней задержке роста плода: МР-морфометрические критерии перехода от гемодинамической адаптации к структурной декомпенсации // Радиология — практика. 2026;3:43-56. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2026-3-43-56>

Источники финансирования

Исследование не финансировалось какими-либо источниками.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов. Мнения, изложенные в статье, принадлежат авторам рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Соответствие принципам этики

Работа соответствует этическим нормам Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2008 года и «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными приказом Минздрава РФ от 19.06.2003.

ORIGINAL RESEARCH

Original article

Centralization of Fetal Blood Flow in Late-onset Fetal Growth Restriction: MR Morphometric Criteria for the Transition from Hemodynamic Adaptation to Structural Decompensation

Elizaveta V. Stolyarova¹, Egor M. Syrkashev², Victoria A. Zorina³, Alexey M. Kholin⁴, Zulfiya S. Khodzhaeva⁵, Alexander I. Gus⁵

^{1, 2, 4-6} Kulakov National Medical Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

³ Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

⁶ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University), Moscow, Russia

¹<https://orcid.org/0009-0001-2049-3119>

²<https://orcid.org/0000-0003-4043-907X>

³<https://orcid.org/0009-0000-7832-2788>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-4068-9805>

⁵<https://orcid.org/0000-0001-8159-3714>

⁶<https://orcid.org/0000-0003-1377-3128>

Corresponding author: Elizaveta V. Stolyarova, stolyarovchliza@yandex.ru

Abstract

Background. Late fetal growth restriction (FGR) is the second leading cause of perinatal mortality, with underdiagnosis rates reaching 30–40 % due to challenges in differentiating it from constitutionally small-for-gestational-age (SGA) fetuses. Fetal chronic hypoxia triggers a compensatory brain-sparing effect, yet the exhaustion of this mechanism leads to structural cerebral decompensation. Developing objective MR-morphometric criteria is essential to accurately differentiate pathological smallness and assess the severity of brain impairment.

Objective. To evaluate the diagnostic value of fetal brain MR-volumetry in differentiating late FGR from SGA, and to determine the impact of blood flow centralization on the severity of brain structural impairment.

Methods. This prospective study included 147 pregnant women categorized into control (AGA, n = 71), SGA (n = 38), and late FGR (n = 38) groups based on the Delphi consensus criteria (2016). Fetal MRI was performed at 1.5 T. Supratentorial and cerebellar volumetry was conducted via manual segmentation (Cavalieri principle) using ITK-SNAP software. Statistical evaluation and ROC analysis were performed using JASP and MedCalc.

Results. Late FGR was characterized by a significant reduction in supratentorial brain volume (244 vs 294 cm³ in SGA and 334 cm³ in AGA; (p < 0.001) and cerebellar volume (14.5 vs 17.7 and 20.6 cm³; (p < 0.001). The brain-sparing effect (CPR < 5th percentile; (n = 25) was associated with an additional 11.6% decrease in supratentorial volume: 251 [206–270] cm³ vs 284 [246–292] cm³ in the non-centralized subgroup (p = 0.045), with no significant changes in cerebellar volume (p = 0.075). Supratentorial volume demonstrated the highest value in differentiating late FGR from SGA (AUC =

0,738; sensitivity 64.9 %, specificity 69.4 %), outperforming cerebellar volume (AUC = 0.687); the combined model yielded no diagnostic improvement (AUC = 0.733).

Conclusion. Multiparametric MR-morphometry successfully verifies fetal brain structural deficits in late FGR, with supratentorial volume serving as a key criterion for differentiating pathological smallness (AUC = 0.738). Doppler-derived blood flow centralization (CPR < 5th percentile) is associated with an additional 11.6 % reduction in supratentorial volume ($p = 0.045$), demonstrating the exhaustion of compensatory mechanisms and serving as an MR-marker for the transition from hemodynamic adaptation to structural decompensation.

Keywords: Fetal Growth Restriction, Small for Gestational Age, Fetal brain, Magnetic Resonance Imaging, MRI

For citation: Stolyarova E. V., Syrkashev E. M., Zorina V. A., Kholin A. M., Khodzhaeva Z. S., Gus A. I. Centralization of Fetal Blood Flow in Late-onset Fetal Growth Restriction: MR Morphometric Criteria for the Transition from Hemodynamic Adaptation to Structural Decompensation. *Radiology — Practice*. 2026;3:43-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2026-3-43-56>

Funding

The study was not funded by any sources.

Conflicts of Interest

The authors state that this work, its topic, subject and content do not affect competing interests. The opinions expressed in the article belong to the authors of the manuscript. The authors confirm the compliance of their authorship with the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, the preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Compliance with Ethical Standards

The work complies with the ethical standards of the Helsinki Declaration of the World Medical Association «Ethical Principles of conducting scientific medical research with human participation» as amended in 2008 and the «Rules of Clinical Practice in the Russian Federation» approved by the Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated 06/19/2003.

Введение

Поздняя задержка роста плода (ЗРП) представляет собой одну из наиболее актуальных проблем современного акушерства, занимая второе место среди причин перинатальной смертности и уступая лишь преждевременным родам [7]. Частота ЗРП в общей акушерской популяции составляет около 10 % [9, 16], возрастая до 25–30 % в группах высокого риска [13].

Распространенность патологии существенно превышает клинически верифицированные случаи: гиподиагностика достигает 30–40 %, что обусловлено прежде всего трудностями антенатального выявления поздней формы заболевания [7, 19, 20]. В отличие от ранней ЗРП поздняя

форма нередко протекает при сохранных показателях доплерометрии и не имеет выраженных клинических маркеров, что существенно затрудняет ее своевременную диагностику [6, 16].

Ключевой диагностической задачей при данной патологии является дифференцировка истинной задержки роста от конституционально маловесных для гестационного возраста (МГВ) плодов. Вовремя нераспознанная поздняя ЗРП сопряжена с высоким риском антенатальных потерь и неблагоприятных нейрокогнитивных исходов, тогда как ошибочная классификация МГВ-плодов, как ЗРП, ведет к гипердиагностике и необоснованным клиническим вмешательствам [9, 10].

Центральное место в патогенезе поздней ЗРП занимает хроническая плацентарная недостаточность, приводящая к прогрессирующей гипоксемии плода. В ответ на нарастающую гипоксию формируется компенсаторный механизм централизации плодового кровотока — так называемый brain-sparing-эффект, характеризующийся перераспределением кровотока в пользу жизненно важных органов, прежде всего головного мозга [8, 17].

Однако данный адаптивный ответ носит ограниченный и временный характер: длительная централизация кровотока сопровождается структурными изменениями церебральных структур, свидетельствующими о переходе процесса в стадию декомпенсации [3, 8]. Своевременная идентификация этого перехода имеет принципиальное значение для оптимизации тактики антенатального ведения и определения сроков родоразрешения [10].

Ультразвуковая доплерометрия остается методом первой линии в антенатальном мониторинге плода при ЗРП [12]. Вместе с тем ее возможности ограничены функциональной оценкой гемодинамики и не позволяют напрямую верифицировать объемные характеристики головного мозга.

В этом контексте магнитно-резонансная томография (МРТ) открывает дополнительные диагностические возможности: метод обеспечивает высокоточную волюметрическую оценку головного мозга вне зависимости от положения плода, индекса массы тела беременной или количества околоплодных вод. Это создает основу для дифференциальной диагностики патологической маловесности от конституциональных МГВ-плодов и открывает перспективы для разработки объективных критериев структурной декомпенсации при данной патологии.

Таким образом, целью данного исследования явилась оценка значения МР-волюметрии головного мозга плода в диагностике поздней ЗРП и МГВ, а также определение влияния централизации кровотока на выраженность его структурных изменений.

Материалы и методы

Характеристика выборки

В проспективное исследование включили 147 беременных пациенток, которых разделили на три группы: 1-я группа (n = 71) — соответствующие гестационному возрасту (СГВ), 2-я группа (n = 38) — с поздней задержкой роста плода (ЗРП) и 3-я группа (n = 38) — маловесные для гестационного возраста (МГВ).

Диагноз поздней ЗРП (≥ 32 недели гестации) и МГВ верифицировали антенатально на основании срока беременности, результатов ультразвуковой фетометрии и доплерометрии в соответствии с критериями международного консенсуса Delphi (Gordijn et al., 2016). Диагноз поздней ЗРП устанавливался при предполагаемой массе плода (ПМП) или окружности живота ниже 3-го перцентиля либо при значениях ниже 10-го перцентиля в сочетании с патологическими доплеровскими показателями: повышением пульсационного индекса (ПИ) в артерии пуповины (ПА) выше 95-го перцентиля, снижением церебро-плацентарного отношения (ЦПО) ниже 5-го перцентиля. Диагноз МГВ устанавливался при ПМП ниже 10-го перцентиля при нормальных доплерометрических показателях и отсутствии признаков плацентарной дисфункции. Группу СГВ составили плоды с ПМП в диапазоне 10–90-го перцентиля и нормальными показателями доплерометрии.

Протокол МРТ и обработка изображений

МРТ плода выполняли на томографе Toshiba Excelart Vantage с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл. Все измерения проводились в аксиальной плоскости на T2-ВИ. Для сегментации использовали T2-ВИ (SS-FSE, single shot FSE) в аксиальной плоскости со следующими параметрами сканирования: TR — 4800, TE — 130, FOV — 350×350 , матрица — 256×256 , толщина среза — 3–4 мм. Волюметрической оценке подлежали анатомические структуры: супратенториальный отдел головного мозга

с анализом правого и левого полушарий и мозжечков. Для последующего анализа в каждом случае отбиралась аксиальная серия изображений без двигательных артефактов, обеспечивающая четкую границу анатомических структур. Объем анатомических структур головного мозга плода вычисляли путем ручного выделения зон интереса (region of interest, ROI) и суммирования выделенных областей с использованием стороннего программного обеспечения (ITK-SNAP 3.0 software. Cognitica, Philadelphia, PA, USA, www.itksnap.org) (рис. 1). Все измерения выполнялись одним специалистом в условиях ослепления: исследователь не располагал сведениями о принадлежности плода к группе (СГВ, МГВ или ЗРП) на момент выполнения измерений, что исключает межнаблюдательную вариабельность и систематическую ошибку классификации.

Статистический анализ

Статистическая обработка данных выполнялась с использованием программ JASP (версия 0.19, Университет Амстердама, Нидерланды) и MedCalc (версия 16.4, MedCalc Software, Бельгия); первичная систематизация материала осуществлялась в Microsoft Excel (Microsoft Corporation, США). Нормальность распределения оценивалась по критерию Шапиро — Уилка; количественные переменные представлены в виде $M \pm SD$ при нормальном распределении или $Me [Q1; Q3]$ при его отклоне-

нии; категориальные — в виде абсолютных значений и долей (%). Межгрупповые различия анализировались с применением ANOVA (критерий Тьюки) или критерия Краскела — Уоллиса (критерий Данна, U-критерий Манна — Уитни) в зависимости от характера распределения. Поскольку срок беременности на момент выполнения МРТ статистически различался между группами, был проведен дополнительный ковариационный анализ (ANCOVA) с поправкой на гестационный возраст. Для категориальных переменных использовался точный критерий Фишера с расчетом ОШ (95 % ДИ). Корреляционный анализ проводился методом Спирмена. Диагностическая значимость показателей оценивалась с помощью ROC-анализа (AUC с 95 % ДИ, оптимальный порог — индекс Юдена; сравнение кривых — метод DeLong). Уровень статистической значимости — $p < 0,05$.

Результаты Клинико-анамнестическая характеристика

Группы были сопоставимы по возрасту матери и индексу массы тела (ИМТ) ($p > 0,05$) и различались по частоте акушерских осложнений. Гестационная артериальная гипертензия (ГАГ) достоверно чаще выявлялась в группе поздней ЗРП (24 %) по сравнению с группами МГВ (13 %) и СГВ (7 %; $p = 0,005$), что согласуется с патогенетической ролью нарушения

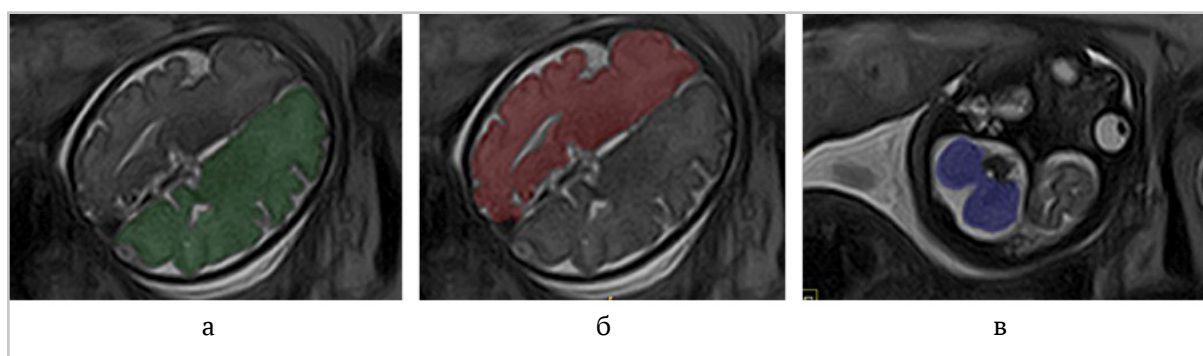


Рис. 1. Пренатальная МРТ головного мозга плода (1,5 Тл, T2-ВИ SS-FSE, аксиальная плоскость). Ручная сегментация зон интереса (ROI) в программе ITK-SNAP 3.0: а — правая гемисфера (зеленый), б — левая гемисфера (красный), в — мозжечок (синий)

маточно-плацентарного кровообращения при данной патологии. Сроки родоразрешения в группе ЗРП был статистически значимо ниже — 37,3 [35,4–38,3] нед относительно групп МГВ (39,1 [38,1–40,1]) и СГВ (39,4 [39,1–39,6]; $p < 0,001$), что отражает клиническую тактику досрочного родоразрешения.

По данным УЗ-фетометрии ПМП статистически значимо различалась между группами в абсолютных значениях ($p < 0,001$): в группе СГВ медиана составила 3378 г [3054–3651], в группе МГВ — 2722 г [2513–2965], в группе поздней ЗРП — 2331 г [2045–2601]. Вместе с тем при процентильной оценке ПМП с учетом гестационного возраста статистически значимых различий между группами ЗРП и МГВ выявлено не было ($p = 0,154$), что свидетельствует о сопоставимой степени задержки роста в этих группах при различных патогенетических механизмах ее формирования.

По данным доплерометрии в группе ЗРП зафиксированы значимо более высокие значения ПИ АП (1,04 [0,90–1,26]; $p < 0,001$) и более низкие значения ЦПО (1,17 [1,00–1,49]; $p < 0,001$). На основании этих показателей группа поздней ЗРП была разделена на две подгруппы: без нарушения кровотока по доплерометрии ($n = 13$) и с признаками централизации плодового кровотока — brain-sparing-эффект (ЦПО < 5 -го перцентиля, $n = 25$).

Частота внутрижелудочковых кровоизлияний (ВЖК) была достоверно выше в группе поздней ЗРП — 8 (21,1 %) — по сравнению с группами МГВ (1; 2,6 %) и СГВ (0; 0 %; $p < 0,001$). При проведении МРТ признаков ВЖК ни в одной из групп выявлено не было. Все случаи диагностированы постнатально: в группе поздней ЗРП — 8 случаев (6 — I степени, 2 — II степени), в группе МГВ — 1 случай I степени по классификации Papile. Ограниченный характер кровоизлияний без вовлечения паренхимы мозга и расширения желудочковой системы исключает их значимое влияние на результаты антенатальной МРТ-волю-

метрии. Частота комбинированных неблагоприятных перинатальных исходов также была наибольшей в группе ЗРП — 20 (52,6 %) против 9 (23,7 %) в группе МГВ и 9 (12,7 %) в группе СГВ ($p < 0,001$).

Сравнительный анализ групп СГВ, МГВ и поздней ЗРП

В табл. 1 и на рис. 2 приведены результаты сравнительного анализа МРТ-параметров структур головного мозга плода в группах беременных с СГВ, МГВ и поздней ЗРП, в котором были обнаружены статистически значимые различия по ряду исследуемых показателей.

В группе поздней ЗРП срок беременности на момент проведения МРТ составил 35,8 (34,1–37,5) нед и был статистически значимо меньше по сравнению с группами СГВ и МГВ ($p < 0,001$). В группе СГВ соответствующий показатель составил 38,3 (37,4–39,3) нед, в группе МГВ — 37,8 (36,6–39,3) нед; достоверных различий между указанными группами выявлено не было ($p = 0,170$). Следует отметить, что меньший срок беременности на момент проведения МРТ в группе поздней ЗРП отражает особенности тактики ведения пациенток с данной патологией и обусловлен более ранним родоразрешением, что ограничивает возможности проведения МРТ на поздних сроках гестации.

Значения объема супратенториального мозга значимо различались между всеми исследуемыми группами ($p < 0,001$). Наибольшие значения зарегистрированы в группе СГВ — 334 см³ (304–362), наименьшие — в группе поздней ЗРП — 244 см³ (218–285; $p < 0,001$). В группе МГВ медиана объема супратенториального мозга составила 294 см³ (263–325), что было значимо ниже по сравнению с СГВ ($p < 0,001$), но выше, чем в группе поздней ЗРП ($p < 0,001$). Анализ объемов левого и правого полушарий выявил сходные закономерности: минимальные значения зафиксированы в группе поздней ЗРП, тогда как в группе МГВ показатели занимали

Таблица 1

Количественная характеристика объемов структур головного мозга плода по данным МРТ в изучаемых группах

Показатель	СГВ (n = 71)	МГВ (n = 38)	ЗРП (n = 38)	p-value (межгр.)	p-value ¹ (СГВ/ ЗРП)	p-value ² (СГВ / МГВ)	p-value ³ (ЗРП / МГВ)
Срок беременности на момент МРТ, нед	38,34 (37,35–39,3)	37,75 (36,6–39,3)	35,75 (34,08–37,5)	< 0,001*	< 0,001*	0,170	< 0,001*
Объем супратенториального мозга, см ³	334 (304–362)	294 (263–325)	244 (218–285)	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*
Левое полушарие СТМ, см ³	167 (152–182)	146 (131–160)	122 (107–143)	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*
Правое полушарие СТМ, см ³	168 (152–182)	148 (132–166)	122 (107–144)	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*
Объем мозжечка, см ³	20,6 (17,7–22,8)	17,7 (15,4–20,9)	14,5 (12,3–17,5)	< 0,001*	< 0,001*	0,003*	0,006*
Отношение объема мозжечка к СТМ, %	6,3 (6,0–7,0)	5,9 (5,8–7,0)	5,8 (5,0–7,0)	0,124	0,136	0,371	0,877

Примечание. Количественные данные представлены в виде медианы и интерквартильного размаха, Me [Q1; Q3]. * — статистически значимая разница между группами ($p < 0,05$). Группы: СГВ — соответствующий гестационному возрасту плод; ЗРП — поздняя задержка роста плода; МГВ — маловесный для гестационного возраста плод; СТМ — супратенториальный мозг.

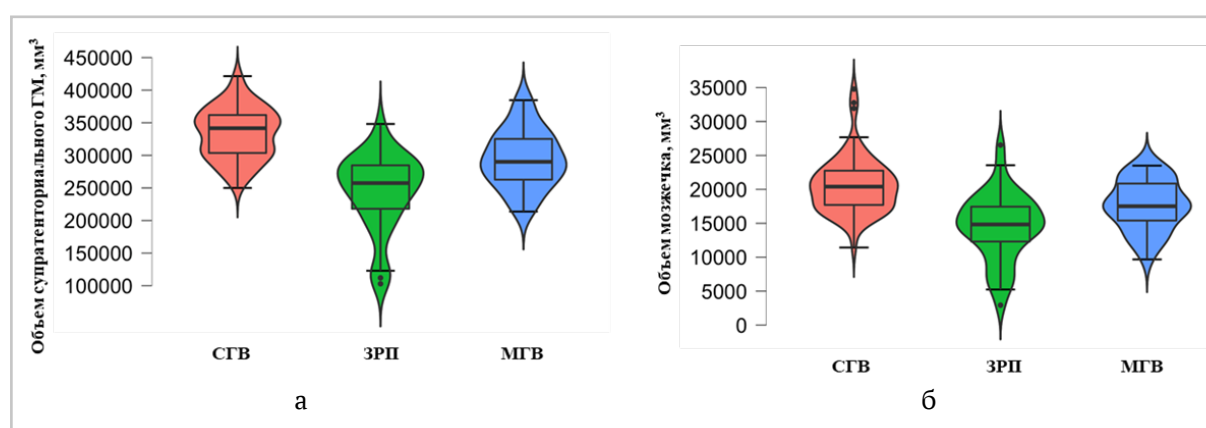


Рис. 2. Описательные характеристики объема супратенториального мозга (а) и мозжечка (б) плода по данным МРТ в группах сравнения. Комбинированная диаграмма: график плотности распределения («скрипка», violin plot) отражает форму и плотность распределения значений; диаграмма размаха (box plot, «ящик с усами») показывает медиану, межквартильный диапазон (25–75-й процентиля) и крайние значения («усы») соответствуют минимальным и максимальным значениям

Примечание. СГВ — плод, соответствующий гестационному возрасту; ЗРП — поздняя задержка роста плода; МГВ — плод, малый для гестационного возраста.

промежуточное положение между контрольной группой и группой поздней ЗРП ($p < 0,001$).

Объем мозжечка также значимо различался между группами ($p < 0,001$). Медиана в группе СГВ составила $20,6 \text{ см}^3$ (17,7–22,8), в группе МГВ — $17,7 \text{ см}^3$ (15,4–20,9), в группе поздней ЗРП — $14,5 \text{ см}^3$ (12,3–17,5). Объем мозжечка в группе МГВ был достоверно выше по сравнению с группой поздней ЗРП ($p = 0,006$), но ниже, чем в группе СГВ ($p = 0,003$).

Отношение объема мозжечка к объему супратенториального мозга не продемонстрировало статистически значимых различий между группами ($p = 0,124$), что свидетельствует о пропорциональном снижении объемов обеих структур.

С целью оценки структурных церебральных изменений, ассоциированных с гемодинамической централизацией кровотока, МР-волуметрический анализ проводился в группе поздней ЗРП ($n = 38$) с разделением на две подгруппы в зависимости от наличия или отсутствия доплерометрических признаков brain-sparing-эффекта (ЦПО < 5-го перцентиля): без признаков централизации кровотока (группа 3а, $n = 13$) и с признаками централизации плодового кровотока (группа 3б, $n = 25$) (табл. 2, рис. 3).

При межгрупповом сравнении у плодов с признаками централизации кровотока выявлено статистически значимое снижение супратенториального объема головного мозга: медиана составила 251

Таблица 2

Сравнительная характеристика объемов головного мозга при поздней ЗРП в зависимости от наличия признаков централизации кровотока (по данным доплерометрии)

Показатель	ЗРП без нарушения кровотока ($n = 13$)	ЗРП с признаками централизации кровотока ($n = 25$)	p-value
Супратенториальный объем мозга, см^3	283,5 (245,9–292,2)	283,5 (245,9–292,2)	0,045*
Объем мозжечка, см^3	15,8 (14,2–18,4)	15,8 (14,2–18,4)	0,075

Примечание. Количественные данные представлены в виде медианы и интерквартильного размаха Ме [Q1; Q3]. * — статистически значимая разница между группами ($p < 0,05$). ЗРП — поздняя задержка роста плода.

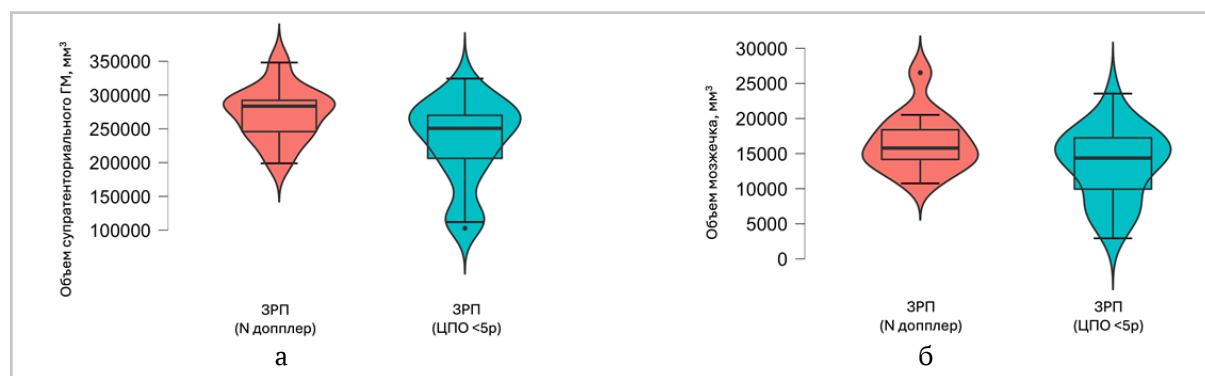


Рис. 3. Распределение объемов структур супратенториального мозга (а) и (б) мозжечка ЗРП в зависимости от наличия признаков централизации кровотока по данным доплерометрии. Комбинированная диаграмма: график плотности распределения (violin plot) отражает форму и плотность распределения значений; диаграмма размаха (box plot, «ящик с усами») показывает медиану, межквартильный диапазон (25–75-й перцентили); крайние значения («усы») соответствуют минимальным и максимальным значениям

Примечание. ЗРП — поздняя задержка роста плода.

[206–270] против 284 [246–292] см³ в подгруппе без признаков централизации ($p = 0,045$), что соответствует относительному снижению на 11,6 %. Объем мозжечка в подгруппе с патологическими значениями ЦПО имел тенденцию к снижению — 14,4 [9,9–17,2] против 15,8 [14,2–18,4] см³, однако различия не достигли статистической значимости ($p = 0,075$).

Поскольку срок беременности на момент проведения МРТ статистически различался между группами, был проведен дополнительный ковариационный анализ с поправкой на гестационный возраст. Установлено, что гестационный возраст оказывал значимое влияние на супратенториальный объем мозга плода ($F = 67,472$; $p < 0,001$). Однако после корректировки на срок беременности связь между патологическим ЦПО < р5-го и снижением супратенториального объема мозга сохраняла статистическую значимость ($F = 4,973$; $p = 0,032$).

Для оценки диагностической эффективности МР-волюметрических показателей в дифференцировке поздней ЗРП и МГВ были построены ROC-кривые с расчетом площади под ROC-кривой (AUC) (табл. 3, рис. 4).

Наибольшую прогностическую значимость продемонстрировали значения супратенториального объема головного

мозга: AUC = 0,738 (95% ДИ 0,62–0,85), чувствительность 64,9 % (95 % ДИ 48,4–78,8), специфичность 69,4 % (95 % ДИ 52,1–83,0). Объем мозжечка характеризовался несколько меньшей диагностической эффективностью: AUC = 0,687 (95 % ДИ 0,57–0,80), чувствительность 62,2 %, специфичность 69,4 %. Комбинированная модель (супратенториальный объем + объем мозжечка) не продемонстрировала прироста диагностической эффективности: AUC = 0,733 (95 % ДИ 0,61–0,85) при аналогичных значениях чувствительности и специфичности, что свидетельствует о достаточности одного параметра — супратенториального объема — для дифференциальной диагностики.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что поздняя ЗРП сопровождается генерализованным снижением объема головного мозга с преимущественным вовлечением супратенториальных структур.

Эти данные согласуются с результатами Polat et al. (2017), показавшими снижение супратенториального объема мозга при ЗРП в сроке 30–34 нед (162 против 197 см³ в контрольной группе) с замедлением скорости роста всех церебральных структур [15]. Несколько более высокие абсолютные значения объемов в нашем

Таблица 3

Сравнительная диагностическая эффективность показателей МРТ в прогнозировании поздней ЗРП (ROC-анализ)

Показатель	AUC (95% ДИ)	Чувствительность, % (95 % ДИ)	Специфичность, % (95 % ДИ)
Объем супратенториального мозга	0,738 (0,62–0,85)	64,9 (48,4–78,8)	69,4 (52,1–83,0)
Объем мозжечка	0,687 (0,57–0,80)	62,2 (45,1–76,6)	69,4 (52,1–83,0)
Объем супратенториального мозга + мозжечка	0,733 (0,61–0,85)	64,9 (48,4–78,8)	69,4 (52,1–83,0)

Примечание. Чувствительность и специфичность рассчитаны для оптимального порогового значения, определенного на основании ROC-анализа. AUC — площадь под ROC-кривой; ДИ — доверительный интервал.

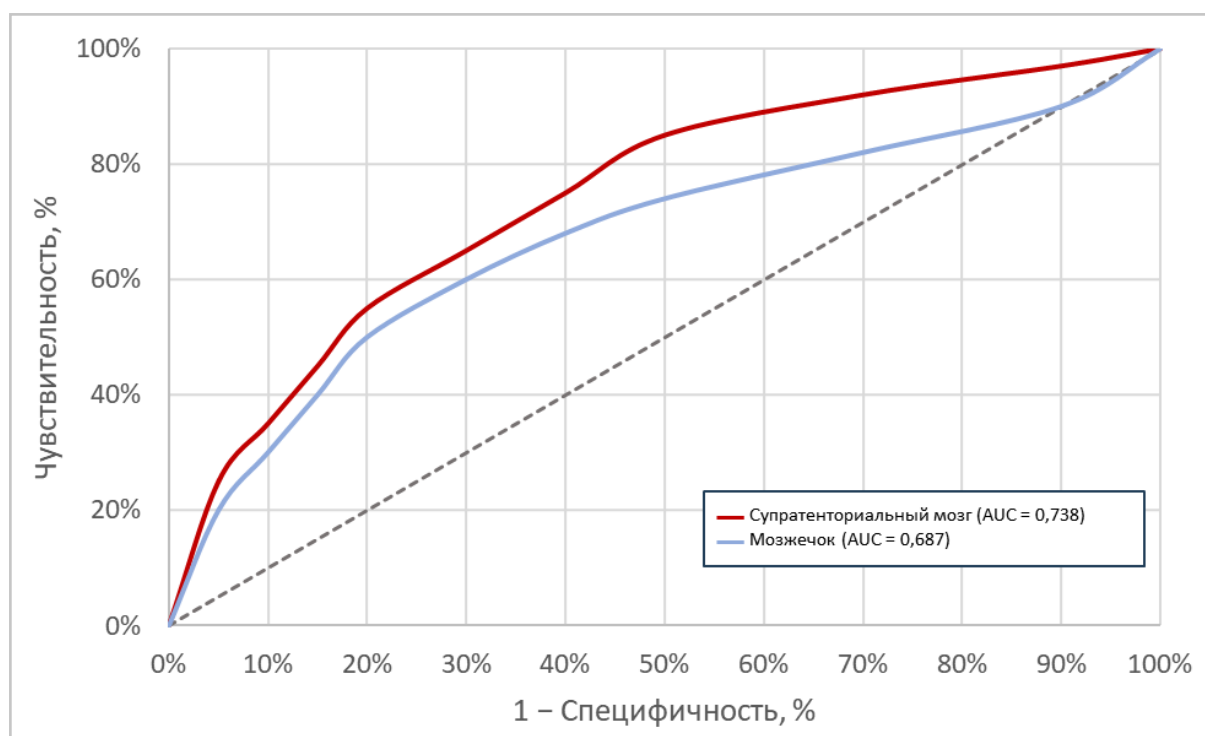


Рис. 4. Сравнительный ROC-анализ диагностической эффективности показателей МРТ в прогнозировании поздней ЗРП. Представлены ROC-кривые, отражающие диагностическую эффективность исследуемых показателей. По оси Y — чувствительность, по оси X — специфичность. Площадь под ROC-кривой (AUC) характеризует качество модели. Диагональная линия соответствует уровню случайной классификации

исследовании обусловлены большим гестационным сроком на момент выполнения МРТ.

В систематическом обзоре Meijerink et al. (2025) также показано достоверное снижение общего объема мозга (средняя разница – 30,84 см³) и объема мозжечка при ЗРП относительно СГВ, причем уменьшение супратенториальных структур являлось повторяющейся находкой в нескольких независимых исследованиях [11]. Peretz et al. (2022) продемонстрировали аналогичные изменения в сроке 33–34 нед с достоверным уменьшением объемов обоих полушарий и мозжечка ($p < 0,015$) [14], а Egana-Ugrinovic et al. (2013) — снижение внутречерепного (441,25 против 515,8 см³; $p < 0,01$) и общего объема мозга (276,47 против 312,07 см³; $p < 0,01$) преимущественно при поздней форме ЗРП [5].

Принципиально важным результатом настоящего исследования является дополнительное снижение супратенториального

объема мозга в подгруппе с доплерометрическими признаками централизации кровотока: медиана составила 250,7 против 283,5 см³ при отсутствии brain-sparing-эффекта ($p = 0,045$), тогда как значимых различий по объему мозжечка между подгруппами выявлено не было.

Сопоставимые данные получены в работе Andescavage et al. (2017), где у плодов с ЗРП и аномальными доплеровскими показателями объемы плаценты, общего мозга и полушарий были ниже не только по сравнению с контролем, но и с ЗРП без доплеровских нарушений [2]. В совокупности с данными литературы, демонстрирующими ассоциацию brain-sparing с более выраженными изменениями мозга и худшими нейрокогнитивными исходами, избирательное снижение супратенториального объема при централизации кровотока можно интерпретировать как переход от стадии относительной компенсации к декомпенсации, когда перераспределение

кровотока утрачивает способность к обеспечению сохранности высших отделов мозга [4, 18].

Практическая целесообразность внедрения предложенного подхода заключается в преодолении диагностических ограничений изолированной доплерометрии при ведении беременных с поздней ЗРП. Обнаружение brain-sparing-эффекта (ЦПО < 5-го перцентиля) традиционно трактуется клиницистами как компенсированное состояние, позволяющее пролонгировать беременность. Однако продемонстрированное в нашей работе сопутствующее снижение супратенториального объема мозга плода на 11,6 % ($p = 0,045$) доказывает, что централизация кровотока является сигналом уже начавшейся декомпенсации.

Для практического здравоохранения это меняет саму парадигму мониторинга: МР-волуметрия отражает влияние хронической гипоксии, а в совокупности с функциональными методиками потенциально может определять критический порог церебрального резерва. Выявление изолированного снижения супратенториального объема (AUC = 0,738) может служить независимым диагностическим критерием для пересмотра акушерской тактики в пользу досрочного родоразрешения. Такой подход позволяет клиницисту принять превентивное решение до манифестации тяжелых осложнений, существенно снижая риск инвалидизирующих нейрокогнитивных исходов у ребенка.

Заключение

Проведенное исследование доказывает, что гемодинамический эффект централизации кровообращения при поздней ЗРП не обеспечивает полную нейропротекцию, а является маркером истощения компенсаторных механизмов. Переход от функциональной адаптации к структурной декомпенсации подтверждается с помощью МР-волуметрии и проявляется критическим уменьшением супратенториального объема мозга плода на 11,6 %.

Супратенториальный объем является самостоятельным и наиболее значимым диагностическим критерием (AUC = 0,738) для дифференциации поздней ЗРП и МГВ. Внедрение МР-волуметрии в клиническую практику потенциально позволит оптимизировать сроки родоразрешения до развития необратимых неврологических нарушений.

Список источников / References

1. Andescavage N., Bullen T., Liggett M., Barnett S. D., Kapse A., Kapse K., Ahmadzia H., Vezina G., Quistorff J., Lopez C., duPlessis A., Limperopoulos C. Impaired in vivo fetoplacental development is associated with neonatal neurobehavioral outcomes. *Pediatr Res.* 2023;93(5):1276-84. [DOI](#)
2. Andescavage N., duPlessis A., Metzler M., Bulas D., Vezina G., Jacobs M., Iqbal S. N., Baschat A., Limperopoulos C. In vivo assessment of placental and brain volumes in growth-restricted fetuses with and without fetal Doppler changes using quantitative 3D MRI. *J. Perinatol.* 2017;37(12):1278-84. [DOI](#)
3. Baschat A. A. Neurodevelopment following fetal growth restriction and its relationship with antepartum parameters of placental dysfunction. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2011;37(5):501-14. [DOI](#)
4. Benítez-Marín M. J., Marín-Clavijo J., Blanco-Elena J. A., Jiménez-López J., González-Mesa E. Brain sparing effect on neurodevelopment in children with intrauterine growth restriction: a systematic review. *Children (Basel).* 2021;8(9):745. [DOI](#)
5. Egaña-Ugrinovic G., Sanz-Cortes M., Figueras F., Bargalló N., Gratacós E. Differences in cortical development assessed by fetal MRI in late-onset intrauterine growth restriction. *Am. J. Obstet. Gynecol.* 2013;209(2):126.e1-8. [DOI](#)
6. Figueras F., Caradeux J., Crispi F., Eixarch E., Peguero A., Gratacos E. Diagnosis and surveillance of late-onset fetal growth restriction. *Am. J. Obstet. Gynecol.* 2018;218(2S):S790-S802.e1. [DOI](#)

7. Figueras F., Gratacós E. Update on the diagnosis and classification of fetal growth restriction and proposal of a stage-based management protocol. *Fetal. Diagn. Ther.* 2014;36(2):86-98. [DOI](#)
8. Giussani D. A. The fetal brain sparing response to hypoxia: physiological mechanisms. *J. Physiol.* 2016;594(5):1215-30. [DOI](#)
9. Gordijn S. J., Beune I. M., Thilaganathan B., Papageorgiou A., Baschat A. A., Baker P. N., Silver R. M., Wynia K., Ganzevoort W. Consensus definition of fetal growth restriction: a Delphi procedure. *Ultrasound Obstet. Gynecol.* 2016;48(3):333-9. [DOI](#)
10. Lees C. C., Stampalija T., Baschat A., da Silva Costa F., Ferrazzi E., Figueras F., Hecher K., Kingdom J., Poon L. C., Salomon L. J., Unterscheider J. ISUOG Practice Guidelines: diagnosis and management of small-for-gestational-age fetus and fetal growth restriction. *Ultrasound Obstet. Gynecol.* 2020;56(2):298-312. [DOI](#)
11. Meijerink L., van Ooijen I. M., Alderliesten T., Terstappen F., Benders M. J. N. L., Bekker M. N. Fetal brain development in fetal growth restriction using MRI: a systematic review. *BMC Pregnancy Childbirth.* 2025; 25(1):208. [DOI](#)
12. Mylrea-Foley B., Lees C. Clinical monitoring of late fetal growth restriction. *Minerva Obstet. Gynecol.* 2021;73(4):462-70. [DOI](#)
13. Nardoza L. M., Caetano A. C., Zamarian A. C., Mazzola J. B., Silva C. P., Marçal V. M., Lobo T. F., Peixoto A. B., Araujo Júnior E. Fetal growth restriction: current knowledge. *Arch Gynecol Obstet.* 2017;295(5):1061-77. [DOI](#)
14. Peretz R., Halevy T., Gafner M., Fried S., Revesz Y., Mayer A., Katorza E. Volumetric brain MRI study in fetuses with intrauterine growth restriction using a semiautomated method. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2022; 43(11):1674-9. [DOI](#)
15. Polat A., Barlow S., Ber R., Achiron R., Katorza E. Volumetric MRI study of the intrauterine growth restriction fetal brain. *Eur. Radiol.* 2017;27(5):2110-8. [DOI](#)
16. Prayer D., Malinge G., Brugger P. C., Cassady C., De Cate L., De Keersmaecker B., Fernandes G. L., Glanc P., Gonçalves L. F., Gruber G. M., Laifer-Narin S., Lee W., Millischer A. E., Molho M., Neelavalli J., Platt L., Pugash D., Ramaekers P., Salomon L. J., Sanz M., Timor-Tritsch I. E., Tutschek B., Twickler D., Weber M., Ximenes R., Raine-Fenning N. ISUOG Practice Guidelines: performance of fetal magnetic resonance imaging. *Ultrasound Obstet. Gynecol.* 2017 May;49(5):671-680. [DOI](#)
17. Roza S. J., Steegers E. A. P., Verburg B. O., Jaddoe V. W., Moll H. A., Hofman A., Verhulst F. C., Tiemeier H. What is spared by fetal brain-sparing? Fetal circulatory redistribution and behavioral problems in the general population. *Am. J. Epidemiol.* 2008;168(10):1145-52. [DOI](#)
18. Shah D. K., Pereira S., Lodygensky G. A. Long-term neurologic consequences following fetal growth restriction: the impact on brain reserve. *Dev Neurosci.* 2024;47(2): 139-46. [DOI](#)
19. Sovio U., White I. R., Dacey A., Pasupathy D., Smith G. C. S. Screening for fetal growth restriction with universal third trimester ultrasonography in nulliparous women in the Pregnancy Outcome Prediction (POP) study: a prospective cohort study. *Lancet.* 2015;386(10008):2089-97. [DOI](#)
20. Unterscheider J., Daly S., Geary M. P., Kennelly M. M., McAuliffe F. M., O'Donoghue K., Hunter A., Morrison J. J., Burke G., Dicker P., Tully E. C., Malone F. D. Optimizing the definition of intrauterine growth restriction: the multicenter prospective PORTO Study. *Am. J. Obstet. Gynecol.* 2013;208(4):290.e1-6. [DOI](#)

Сведения об авторах / Information about the authors

Столярова Елизавета Валерьевна, врач акушер-гинеколог, 1-е акушерское отделение патологии беременности, аспирант, ФГБУ «НМИЦ АГП им. В. И. Кулакова» Минздрава России, Москва, Россия.

Вклад автора: проведение исследования, обработка результатов, написание текста.

Stolyarova Elizaveta Valerievna, M.D, clinical resident, V. I. Kulakov National Medical Research Center for Obstetrics, Gynecology & Perinatology of Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

Author contributions: conducting the study, data processing, manuscript writing.

Сыркашев Егор Михайлович, кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, отделение лучевой диагностики, ФГБУ «НМИЦ АГП им. В. И. Кулакова» Минздрава России, Москва, Россия.

Вклад автора: проведение исследования, обработка результатов, редактирование текста.

Syrkashev Egor Mihaylovich, PhD, Senior Researcher, Department of Diagnostic Radiology, V. I. Kulakov National Medical Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

Author contributions: conducting the study, data processing and analysis, manuscript editing.

Зорина Виктория Антоновна, ординатор, ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И. М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский университет), Москва, Россия.

Вклад автора: обработка результатов, написание текста.

Zorina Victoria Antonovna, Clinical Resident, I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

Author contributions: data processing, manuscript writing.

Холин Алексей Михайлович, кандидат медицинских наук, заведующий отделом телемедицины и инновационного развития, ФГБУ «НМИЦ АГП им. В. И. Кулакова» Минздрава России, Москва, Россия.

Вклад автора: разработка концепции, редактирование текста.

Kholin Alexey Mihaylovich, Head, Department of Telemedicine, M.D., PhD, V. I. Kulakov National Medical Research Center for Obstetrics, Gynecology & Perinatology of Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

Author contributions: concept development, manuscript review and editing.

Ходжаева Зульфия Сагдуллаевна, доктор медицинских наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Институт акушерства, ФГБУ «НМИЦ АГП им. В. И. Кулакова» Минздрава России, Москва, Россия.

Вклад автора: руководство исследованием, редактирование текста.

Khodzhaeva Zulfiya Sagdullaevna, Deputy Director, Ph.D., Professor, Institute of Obstetrics, V.I. Kulakov National Medical Research Center for Obstetrics, Gynecology & Perinatology of Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

Author contributions: study supervision, manuscript review and editing.

Гус Александр Иосифович, доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, отделение ультразвуковой и функциональной диагностики, отдел визуальной диагностики, ФГБУ «НМИЦ АГП им. В. И. Кулакова» Минздрава России, Москва, Россия.

Вклад автора: разработка концепции, проведение исследования.

Gus Alexander Iosifovich, Chief Researcher, M.D., Ph.D., Ultrasound Department, V. I. Kulakov National Medical Research Center for Obstetrics, Gynecology & Perinatology of Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

Author contributions: conceptualization, conducting the study.

Статья поступила в редакцию 13.05.2026;
одобрена после рецензирования 26.05.2026;
принята к публикации 26.05.2026.

The article was submitted 13.05.2026;
approved after reviewing 26.05.2026;
accepted for publication 26.05.2026.