

ISSN 2782-3806
ISSN 2782-3814 (Online)
УДК 616-073.756.8:618.2-07

ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДА МРТ И СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРЕНАТАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ АНОМАЛИЙ РАЗВИТИЯ ПЛОДА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Арасланова Л. В.^{1,2}, Скосарь В. Е.¹, Дайсудова А. Д.^{1,2},
Рябченко В. А.^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Ростов-на-Дону, Россия

² Государственное автономное учреждение Ростовской области «Областной консультативно-диагностический центр», Ростов-на-Дону, Россия

Контактная информация:

Скосарь Владимир Евгеньевич,
ФГБОУ ВО РостГМУ Минздрава России,
пер. Нахичеванский, 29, Ростов-на-Дону,
Россия, 344022.
E-mail: skosar.vova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 06.06.2024
и принята к печати 28.06.2024.

РЕЗЮМЕ

Статья представляет собой комплексный обзор эволюции методов магнитно-резонансной томографии (МРТ) для визуализации плода с начала XXI века по 2023 год. Основное внимание уделяется новым методам, протоколам и технологиям, включая применение МРТ на 1,5 Тл и 3 Тл. Рассматриваются тератогенные эффекты, сверхбыстрые последовательности, применение последовательностей T1- и T2-взвешенных изображений, а также передовые методы, такие как диффузно-взвешенная визуализация (DWI), технология SWI с управляемым волновым наложением в параллельной визуализации (CAPI).

Магнитно-резонансная томография плода становится ключевым методом в акушерской диагностике, существенно преодолевая ограничения ультразвукового исследования. Эволюция методов МРТ отражает постоянное стремление к повышению качества изображений, снижению рисков и расширению диагностических возможностей.

Ключевые слова: аномалии развития, МРТ плода, пренатальная диагностика, 3 Тл МРТ, DWI, IVIM.

Для цитирования: Арасланова Л.В., Скосарь В.Е., Дайсудова А.Д., Рябченко В.А. Эволюция метода МРТ и современные возможности использования в пренатальной диагностике аномалий развития плода (обзор литературы). Российский журнал персонализированной медицины. 2024;4(4):340-347. DOI: 10.18705/2782-3806-2024-4-4-340-347. EDN: AYJMFМ

EVOLUTION OF THE MRT METHOD AND CURRENT POSSIBILITIES OF ITS USE IN PRENATAL DIAGNOSIS OF FOETAL ANOMALIES (LITERATURE REVIEW)

Araslanova L. V.^{1,2}, Skosar V. E.¹, Daisudova A. D.^{1,2}, Ryabchenko V. A.^{1,2}

¹ Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russia

² State Autonomous Institution of the Rostov Region "Regional Consultative and Diagnostic Centre", Rostov-on-Don, Russia

Corresponding author:

Skosar Vladimir E.,
Rostov State Medical University,
Nakhichevansky Lane, 29, Rostov-on-Don,
Russia, 344022.
E-mail: skosar.vova@yandex.ru

Received 06 June 2024; accepted 28 June 2024.

ABSTRACT

This article is a comprehensive review of the evolution of magnetic resonance imaging (MRI) techniques for fetal imaging from the beginning of the 21st century to 2023. The focus is on new techniques, protocols, and technologies, including the use of 1.5 Tesla and 3 Tesla MRI. Teratogenic effects, ultrafast sequences, application of T1- and T2-weighted imaging sequences, and advanced techniques such as diffusion-weighted imaging (DWI), SWI technology with guided wave overlay in parallel imaging (CAIPI) are reviewed.

Fetal magnetic resonance imaging is becoming a key modality in obstetric diagnosis, significantly overcoming the limitations of ultrasound. The evolution of MRI techniques reflects a constant endeavour to improve image quality, reduce risks and expand diagnostic capabilities.

Key words: developmental anomalies, DWI, fetal MRI, IVIM, prenatal diagnosis, 3 Tesla MRI.

For citation: Araslanova LV, Skosar VE, Daisudova AD, Ryabchenko VA. Evolution of the MRT method and current possibilities of its use in prenatal diagnosis of foetal anomalies (literature review). Russian Journal for Personalized Medicine. 2024;4(4):340-347. (In Russ.) DOI: 10.18705/2782-3806-2024-4-4-340-347. EDN: AYJMFM

РАЗВИТИЕ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

МРТ развивается стремительно и непрерывно, однако можно выделить несколько основных этапов. В 2002 году произошло введение сверхбыстрых методов. В этот период были внедрены сверхбыстрые T2-взвешенные последовательности МРТ, такие как одномоментное быстрое спин-эхо (SSFSE) и турбо-спин-эхо с полу-Фурье-приобретением (HASTE). Эти методы способствовали существенному прогрессу в визуализации плода, уменьшив риски для младенца, связанные с использованием опасных методов седации [1–4]. Уже к 2007 году УЗИ широко применялся в акушерской практике, однако протоколы для МРТ еще не были установлены. За основу приняли быстрые однократные T2-взвешенные изображения, что позволило визуализировать аномалии ЦНС в третьем триместре беременности [5]. Благодаря развитию технологий с 2014 года однократные быстрые спин-эхо (SSFSE) T2-взвешенного изображения стали стандартом, а также началось использование последовательностей двумерного градиента эха (2D GRE) и более быстрых версий последовательности GRE (FLASH) для получения T1-взвешенных изображений. Появилась возможность более точной визуализации мозга плода с использованием последовательностей SSFSE и балансированных устойчивых последовательностей свободной прецессии (SSFP). В связи с быстрым развитием технологий МРТ, многие ученые начали задаваться вопросом о его тератогенном действии на плод. Было установлено, что на ранних сроках беременности МРТ не оказывала тератогенные эффекты на плод, а также исследования показали, что многослойная структура головного мозга становится заметной после 16 недель беременности на 1,5 Тл МРТ [6–9].

Применение сверхбыстрых последовательностей T2W существенно снижает артефакты, связанные с движением плода [10, 11]. Исследование дало стремительное начало развитию новых протоколов магнитно-резонансной томографии. В 2017 году начались первые шаги к рутинному использованию МРТ плода на 3 Тл томографах, что позволило получать последовательности T2W со средней толщиной среза 2–3 мм (по сравнению с 3–5 мм при 1,5 Тл) и применять диффузно-тензорную визуализацию (DTI) для лучшей визуализации трактов, несмотря на оставшиеся ограничения, связанные с длительным временем сбора данных и артефактами движения. Также на сегодняшний день установлено, что использование 3 Тл повышает чувствительность и улучшает визуализацию дезоксигемоглобина, гемосидерина и кальцификаций, обеспечивает луч-

шую идентификацию сосудов, дает более четкое изображение костных структур на различных последовательностях (T2W и SSFP), облегчает определение окостеневших структур, подсчет состояния костной структуры позвонков и оценку дефектов лицевого черепа.

Однако, несмотря на преимущества, существуют технические и методологические сложности, которые требуют дополнительных исследований и оптимизации [12, 13]. Все это дало начало новой технологии в 2020 году. Разные импульсные последовательности (ИП) в МРТ применяются в целях диагностики множества патологий плода. На данный момент для визуализации аномалий развития в рутинной практике используются: SS-FSE (одномоментное быстрое спин-эхо) — для визуализации исследуемых структур плода; B-SSFP (сбалансированное градиентное эхо) — для определения положения органов ЖКТ, визуализации мекония в кишечнике при врожденных диафрагмальных грыжах; эхо-планарная ИП (EPI) — для оценки опорно-двигательного аппарата плода, но имеет ограниченную диагностическую ценность из-за артефактов и низкого разрешения изображений; диффузно-взвешенная МРТ (DWI) — для дифференциальной диагностики различных патологических состояний, таких как нарушения кровообращения и воспалительные изменения; SSFP — для оценки глотания, движения головы и туловища, движений нижних конечностей и сердца плода; МР-гидрография — высококонтрастные T2-взвешенные изображения с акцентом на патологическое изменение количества жидкости. Отдельного упоминания заслуживает оценка эффективности SWI (истинно быстрая визуализация с устойчивой прецессией). SWI оказалась надежным методом, позволяющим достаточно точно оценить структуры и рост позвонков плода, что может значительно улучшить диагностику аномалий позвонков, так как показывает высокую диагностическую точность (89,0 %), превосходя HASTE/TrueFISP (48,0 %) [14–17].

В настоящее время диагностические технологии идут по пути все большего усовершенствования получаемого изображения. На конец 2023 года можно говорить об активном внедрении усовершенствованного метода DWI и IVIM; использование DWI, включая внутривоксельное некогерентное движение (IVIM), позволяет получать количественные значения для оценки микроструктур и перфузии плода. Параметры перфузии IVIM (f_p и D^*) могут быть полезными для различения паттернов микроваскуляризации и обнаружения микрососудистых нарушений, даже у плодов без признаков нарушений на УЗИ-доплере; примене-

ние последовательностей SS-FSE (в T2-взвешенном режиме, в настоящее время является методом выбора для визуализации плода) и bSSFP (Balanced steady-state free-precession) обеспечивает высокое соотношение сигнал/шум и контраст изображения T2/T1; технология SWI с управляемым волновым наложением в параллельной визуализации (CAPI) — сокращает время сканирования мозга и обеспечивает улучшенную устойчивость к высоким факторам ускорения, снижая артефакты недостаточной выборки и шут g-факторы. В 2023 году Рабочая группа по визуализации плода Европейского общества детской радиологии опубликовала рекомендации по выбору магнитного поля:

1. Предпочтительно использовать 3 Тл МРТ для неврологических показаний и оценки состояния тела плода;
2. МРТ 3 Тл предпочтительнее для определения аномалий, таких как диафрагмальная грыжа, а также для оценки хрящевой ткани;
3. МРТ 1,5 Тл предпочтительнее в случаях многоводия из-за экранирующего эффекта и артефактов на 3 Тл;

4. Гестационный возраст не влияет на выбор мощности магнитного поля [17–21].

С появлением новых технологий МРТ расширились и возможности диагностики различных аномалий развития плода, в том числе на ранних сроках гестации. Последние достижения в области магнитно-резонансной томографии позволили выявить больше случаев мальформации Денди-Уокера и их сосуществующих церебральных аномалий пренатально [22]. Мальформация Денди-Уокера (ДУМ) представляет собой врожденную аномалию развития мозжечка и задней черепной ямки, диагностирующуюся на основании нескольких характерных особенностей визуализации, включая кистозную дилатацию четвертого желудочка, ротацию гипопластического червя вверх и увеличение задней черепной ямки с приподнятыми завитковыми герофилами и наметом, гидроцефалию, возникающую в 90 % случаев. Терапия заболевания направлена на контроль внутричерепного давления посредством хирургического вмешательства, включающего вентрикулоперитонеальное или цистоперитонеальное шунтирование [23, 24]. Прогноз во многом

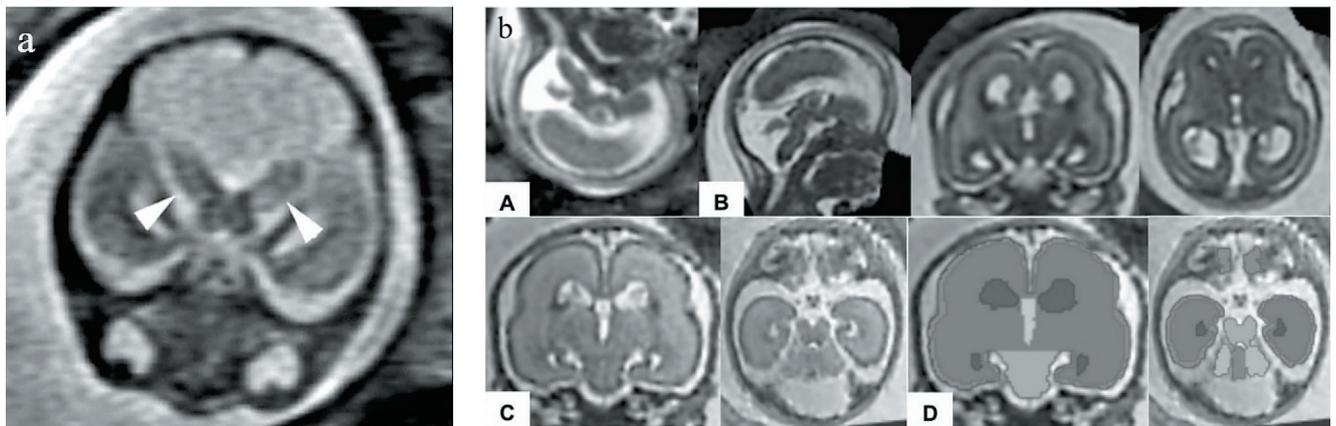


Рис. 1. Мальформация Денди-Уокера

Аксиальная проекция демонстрирует широкое расширение полушарий мозжечка (стрелки) (2004 г.) (a); необработанные МР-изображения плода (A) были обработаны с коррекцией движения и объемной реконструкцией сверхвысокого разрешения. Затем визуализированные изображения были выровнены в одном направлении вдоль передней и задней спаек (B). В корональных и аксиальных проекциях реконструированных объемных изображений (C) региональные структуры мозга (т. е. корковая пластинка, подкорковая паренхима, полушария мозжечка, червь, ствол мозга, а также боковые, третий и четвертый желудочки) были вручную сегментированы на каждом из них (D) (b) [22].

Figure 1. Dandy-Walker malformation

Axial projection demonstrates wide expansion of the cerebellar hemispheres (arrows) (2004) (a); Raw fetal MR images (A) were processed with motion correction and super-resolution volume reconstruction. The rendered images were then aligned in the same direction along the anterior and posterior commissures (B). In coronal and axial views of the reconstructed volume images (C), regional structures of the brain (i.e., the cortical plate, subcortical parenchyma, cerebellar hemispheres, vermis, brainstem, and lateral, third, and fourth ventricles) were manually segmented on each slice (D) (b) [22].

связан со степенью гипоплазии червя и наличием сопутствующих пороков развития, и в тяжелых случаях может быть рассмотрена возможность прерывания беременности. МРТ позволяет поставить диагноз на ранних сроках и в случае принятия решения о прерывании беременности позволит избежать возможных осложнений, риск которых становится больше с увеличением срока: избыточной кровопотери, возникающей вследствие травмирования матки или шейки, неполного завершения процедуры или недостаточного сокращения матки после удаления плода, перфорации стенки матки, ее разрыва, инфекционных осложнений, неполного аборта и смерти роженицы [25–28].

Перспективным направлением в современной магнитно-резонансной томографии и пренатальной диагностике является исследование морфофункционального состояния плаценты, которая обеспечивает обмен питательными веществами и «отходами» между физически разделенными кровообращениями матери и плода. Хотя ультразвуковая доплерография предлагает удобный способ диагностики,

она не способна непосредственно исследовать кровообращение внутри столь важного органа. IVIM поднимает диагностику на новый уровень перфузионной визуализации, не требуя при этом внутривенного введения контрастного вещества [25].

Развитие магнитно-резонансной томографии еще в 2014 году позволило высказать предположение, что anomальное ремоделирование спиральных артерий способно увеличить внутрисосудистое сопротивление, что в свою очередь приводит к высокоскоростному кровотоку в межворсинчатых пространствах. Это anomальное межворсинчатое кровообращение вызывает повреждение архитектоники ворсин, влияя на материнско-плодовый перенос питательных веществ [25]. А уже в 2022 году скорость баллистического микроциркуляторного потока показала превосходную эффективность в диагностике гестационного сахарного диабета и задержки роста плода [26, 27].

Большинство инфарктов плаценты трудно диагностировать с помощью УЗИ, за исключением случаев геморрагического характера. Развитие

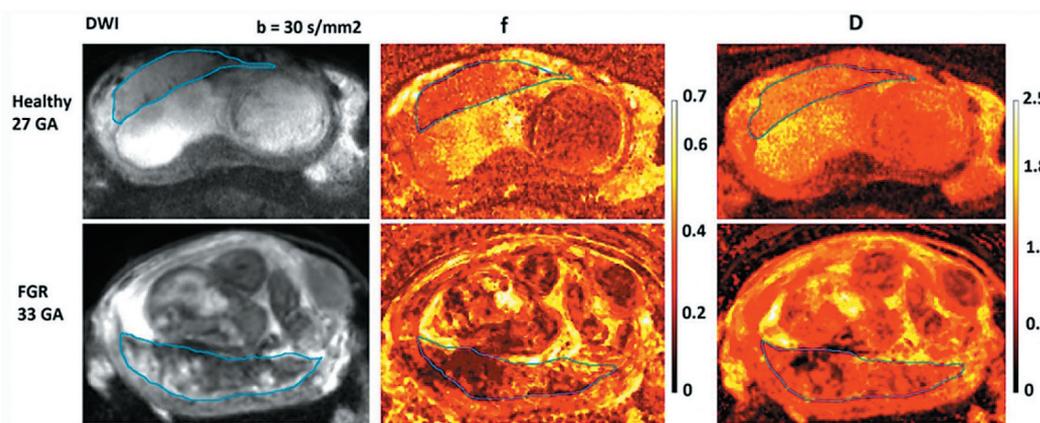


Рис. 2. Диффузионно-взвешенная визуализация (ДВИ), полученная при $b = 30 \text{ с/мм}^2$, и внутривоксельные карты некогерентного движения f и D плаценты, окаймленной тонкой синей линией

Верхний ряд: плацента женщины с нормальной здоровой беременностью сроком 27 недель. Нижний ряд: плацента женщины с задержкой роста плода в возрасте 33 недель. Цветные столбцы указывают процент перфузионной фракции f и значение коэффициента диффузии D в $0,001 \text{ мм}^2/\text{с}$. Плацента нормальной беременности отображается однородными цветами на картах f и D . Напротив, плацента с ограничением роста плода выглядит гетерогенной и характеризуется более низкими значениями f по сравнению со здоровой плацентой [17].

Figure 2. Diffusion-weighted imaging (DWI), obtained with $b = 30 \text{ s/мм}^2$, and intravoxel incoherent motion f and D maps of the placenta which is bordered by a thin blue line

Upper row: placenta from a woman with a normal 27-week healthy pregnancy. Bottom row: placenta from a female with fetal growth restriction fetus 33 weeks old. The colored bars indicate the percentage of perfusion fraction f and the value of the diffusion coefficient D in $0,001 \text{ мм}^2/\text{с}$. The normal pregnancy placenta appears with homogeneous colors in the f and D maps. In contrast, the fetal growth restriction placenta appears heterogeneous characterized by lower f -values compared to the healthy placenta [17].

DWI позволило с высокой точностью определять инфаркты с геморрагическим компонентом или без него, субхориональные/межворсинчатые тромбы/кровоизлияния, ретроплацентарные гематомы [28].

Основываясь на существующих теориях относительно различий в патофизиологии между ранней и поздней преэклампсией, исследование 2014 года позволило предположить, что плацентарная перфузия будет снижена при ранней преэклампсии по сравнению с ранней нормальной беременностью, но не будет затронута при поздней преэклампсии по сравнению с поздней нормальной беременностью [29].

Остается в значительной степени не изученным вопрос плацентарной кальцификации. Активация путей запрограммированной гибели клеток и наличие некротической ткани позволяют предположить, что дистрофическая кальцификация, вероятно, способствует кальцификации плаценты. Передача сигналов аденозина обеспечивает механическое пересечение путей кальцификации и преэклампсии. Нарушение передачи сигналов аденозина способствует кальцификации сосудов за счет дисбаланса про- и антикальцинирующих молекул. Важную роль играют гормоны с известными про- или антикальцинирующими функциями, действующие на границе между матерью и плодом, где они влияют на минералы, необходимые для роста и развития эмбриона, включая витамин D, паратиреоидный гормон, белок, связанный с паратиреоидным гормоном, кальцитонин и Fgf23. Гиповитаминоз D во время беременности коррелирует с преэклампсией и гестационным сахарным диабетом [30–32]. Существует четкая связь между преэклампсией и риском сердечно-сосудистых заболеваний в более позднем возрасте, но причины и последствия кальцификации плаценты при плацентарной дисфункции и преэклампсии на момент 2018 года оставались неизвестными [33–36].

В 2023 году начал применяться метод виртуальной эластографии на основе DWI и биэкспоненциальных и растянутых экспоненциальных параметров на основе IVIM для оценки вероятности неонатальных неблагоприятных исходов у детей с SGA («маленький для гестационного возраста» — термин, используемый для описания ребенка, размер которого меньше обычного для количества недель беременности), что позволяет нивелировать недостатки и ограничения пренатального ультразвукового исследования. В исследованиях установлено, что значение μ_{diff} (значение жесткости) было значительно выше, а значения f (фракция перфузии), DDC (коэффициент распределения диффузии) и ADC (кажущийся коэффициент диффузии) были

значительно ниже у детей с SGA с неблагоприятными исходами по сравнению с детьми без неблагоприятных исходов. Многомерный логистический регрессионный анализ показал, что значения μ_{diff} и f являются прогностическими факторами риска. Плацентарная диффузия и перфузия на основе параметров DWI IVIM и vMRE потенциально предоставляют новый инструмент для выявления неблагоприятных исходов у детей с SGA [37–39].

ВЫВОДЫ

За 21 год МРТ-диагностика плода сделала огромный прорыв. Появляются все новые и новые техники рендеринга, которые в итоге позволят поднять способность визуализации различных аномалий развития и патологий плода на новый уровень. Одной из перспективных ИП на сегодня является DWI. Внедрение аппаратов 3 Тл улучшило контрастность и пространственное разрешение МРТ плода несмотря на то, что артефакты движения могут снизить качество изображений, особенно у плодов в раннем периоде беременности. Другой многообещающей ИП является внутривоксельное некогерентное движение (IVIM), однако необходимо преодолеть некоторые ограничения, чтобы адаптировать его для широкого применения в рутинной практике.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. / The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Girard N, Raybaud Ch, Gambarelli D. MCU-PH Pediatric Neuroimaging: Fetal MR Imaging Recent Advances in Diagnostic. *Neuroradiology*. 2002;373–398. DOI:10.1007/978-3-642-56662-2_23.
2. Hubbard AM, Adzick NS, Crombleholme TM, et al. Left-sided congenital diaphragmatic hernia: value of prenatal MR imaging in preparation for fetal surgery. *Radiology*. 1997;203(3):636–640.
3. Glastonbury CM, Kennedy AM. Ultrafast MRI of the fetus. *Australasian Radiology*. 2002;46:22–32.
4. Yamashita Y, Namimoto T, Abe Y, et al. Imaging of the fetus by a HASTE sequence. *AJR Am J Roentgenol*. 1997;168:513–519.
5. Robinson AJ, Blaser S, Toi A, et al. The fetal cerebellar vermis: assessment for abnormal development by ultrasonography and magnetic resonance imaging. *Ultrasound Q*. 2007;23(3):211–23. DOI:10.1097/RUQ.0b013e31814b162c.

6. Saleem SN. Fetal MRI: An approach to practice: A review. *J Adv Res.* 2014; 5(5):507–523.
7. Miller E, Ben-Sira L, Constantini S, et al. Impact of prenatal magnetic resonance imaging on postnatal neurosurgical treatment. *J Neurosurg.* 2006;105:203–9. DOI: 10.3171/ped.2006.105.3.203. PMID: 16970233.
8. Glenn OA, Barkovich AJ. Magnetic resonance imaging of the fetal brain and spine: an increasingly important tool in prenatal diagnosis, part 1. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2006;27(8):1604–11.
9. Victoria T, Johnson AM, Edgar JC, et al. Comparison Between 1.5-T and 3-T MRI for Fetal Imaging: Is There an Advantage to Imaging With a Higher Field Strength? *American Journal of Roentgenology.* 2015;206:195–201. DOI:10.2214/AJR.14.14205.
10. Sapna R, Priscilla J, Abhimanyu K, et al. Fetal MRI: A pictorial essay. *Indian J Radiol Imaging.* 2016;26(01): 52–62.
11. Kazi AZ, Joshi PC, Kelkar AB, et al. MRI evaluation of pathologies affecting the corpus callosum: A pictorial essay. *Indian J Radiol Imaging.* 2013;23:321–32.
12. Chartier AL, Bouvier MJ, McPherson DR, et al. The Safety of Maternal and Fetal MRI at 3 T. *AJR Am J Roentgenol.* 2019;213(5):1170–1173. DOI:10.2214/AJR.19.21400.
13. Weisstanner C, Gruber GM, Brugger PC, et al. Fetal MRI at 3T-ready for routine use? *British Journal of Radiology.* 2017;90(1069):20160362. DOI:10.1259/bjr.20160362.
14. Pugash D, Krssak M, Kulemann V, et al. Magnetic resonance spectroscopy of the fetal brain. *Prenat Diagn.* 2009;29:434–41. DOI: <https://doi.org/10.1002/pd.2248>.
15. Barrera CA, Francavilla ML, Serai SD, et al. Specific Absorption Rate and Specific Energy Dose: Comparison of 1.5-T versus 3.0-T Fetal MRI. *Radiology.* 2020;295(3):664–674. DOI: 10.1148/radiol.2020191550.
16. Rudenko NN, Fokin AV, Mashchenko IA, et al. Methodological basis of magnetic resonance tomography in pregnant women. *Modern problems of science and education.* 2020;3. In Russian [Руденко Н.Н., Фокин А.В., Машченко И.А. и др. Методические основы магнитно-резонансной томографии у беременных. *Современные проблемы науки и образования.* 2020;3]. DOI:10.17513/spno.29911.
17. Manganaro L, Capuani S, Gennarini M, et al. Fetal MRI: is it new? A short review. *Eur Radiol.* 2023;7:41. DOI:10.1186/s41747-023-00358-5.
18. Powers AM, White C, Neuberger I, et al. Fetal MRI Neuroradiology: Indications. *Clin Perinatol.* 2022;49(3):573–586. DOI: 10.1016/j.clp.2022.05.001.
19. Dawood Y, Buijendijk MFJ, Shah H, et al. Imaging fetal anatomy. *Semin Cell Dev Biol.* 2022;131:78–92. DOI: 10.1016/j.semcdb.2022.02.023.
20. Capuani S, Guerreri M, Antonelli A, et al. Diffusion and perfusion quantified by Magnetic Resonance Imaging are markers of human placenta development in normal pregnancy. *Placenta.* 2017;58:33–39. DOI: 10.1016/j.placenta.2017.08.003.
21. Colleran GC, Kyncl M, Garel C, et al. Fetal magnetic resonance imaging at 3 Tesla - the European experience. *Pediatr Radiol.* 2022;52(5):959–970. DOI: 10.1007/s00247-021-05267-6.
22. Akiyama S, Madan N, Graham G, et al. Regional brain development in fetuses with Dandy-Walker malformation: A volumetric fetal brain magnetic resonance imaging study. *PLoS One.* 2022;17(2):e0263535. DOI:10.1371/journal.pone.0263535.
23. Kravchenko EN, Kolombet EV, Kuklina LV. Modern aspects of late termination of pregnancy. *MiD.* 2016;No 1. In Russian [Кравченко Е.Н., Коломбет Е.В., Куклина Л.В. Современные аспекты прерывания беременности в поздние сроки. *МиД.* 2016; № 1].
24. Shatalov AE, Kupina AD, Petrov YuA. Sterility of women as a consequence of inflammatory diseases of the genitals. *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2020;74–77. In Russian [Шаталов А.Е., Купина А.Д., Петров Ю.А. Стерильность женщин как следствие воспалительных заболеваний гениталий. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2020;74–77].
25. Anblagan D, Deshpande R, Jones NW, et al. The Effect of Maternal Diabetes on Placental Blood Flow Assessed Using IVIM. Abstract from The International Society for Magnetic Resonance in Medicine, Montreal, United Kingdom. 2011;19:151.
26. Liao Y, Sun T, Jiang L, et al. Detecting abnormal placental microvascular flow in maternal and fetal diseases based on flow-compensated and non-compensated intravoxel incoherent motion imaging. *Placenta.* 2022;119:17–23. DOI:10.1016/j.placenta.2022.01.010.
27. Masselli G, Cozzi D, Ceccanti S, et al. Fetal body MRI for fetal and perinatal management. *Clin Radiol.* 2021;76:708.e1–708.e8.
28. Linduska N, Dekan S, Messerschmidt A, et al. Placental pathologies in fetal MRI with pathohistological correlation. *Placenta.* 2009;6:555–9. DOI:10.1016/j.placenta.2009.03.010.
29. Sohlberg S, Mulic-Lutvica A, Lindgren P, et al. Placental perfusion in normal pregnancy and early and late preeclampsia: a magnetic resonance imaging study. *Placenta.* 2014;35(3):202–206. DOI: 10.1016/j.placenta.2014.01.008.
30. Petrov YA, Kupina AD. Fetal programming is a way to prevent diseases in adulthood (literature review). *Medical Council.* 2020;13:50–56. In Russian [Петров Ю.А., Купина А.Д. Фетальное программирование — способ предупреждения заболеваний во взрослом возрасте. *Медицинский Совет.* 2020; 13: 50–56]. DOI:10.21518/2079-701X-2020-13-50-56.

31. Petrov YA, Kupina AD. Preeclampsia and eclampsia: promising opportunities for diagnosis and prevention. *Mother and Child in Kuzbass*. 2020; No 2(81):54–60. In Russian [Петров Ю.А., Купина А.Д. Преэклампсия и эклампсия: перспективные возможности диагностики и профилактики. *Мать и Дитя в Кузбассе*. 2020; № 2(81):54–60].

32. Kwon EJ, Kim YJ. What is fetal programming?: a lifetime health is under the control of in utero health. *Obstet Gynecol Sci*. 2017;60(6):506–519. DOI: 10.5468/ogs.2017.60.6.506.

33. Wallingford MC, Benson C, Chavkin NW, et al. Placental Vascular Calcification and Cardiovascular Health: It Is Time to Determine How Much of Maternal and Offspring Health Is Written in Stone. *Front Physiol*. 2018;9:1044. DOI:10.3389/fphys.2018.01044.

34. Fields JA, Garovic VD, Mielke MM, et al. Preeclampsia and cognitive impairment later in life. *Am J Obstet Gynecol*. 2017;217(1):74.e1–74.e11. DOI:10.1016/j.ajog.2017.03.008.

35. Mongraw-Chaffin ML, Cirillo PM, Cohn BA. Preeclampsia and cardiovascular disease death: prospective evidence from the child health and development studies cohort. *Hypertension*. 2010;56(1):166–71. DOI:10.1161/HYPERTENSIONAHA.110.150078.

36. Pauli JM, Repke JT. Preeclampsia: Short-term and Long-term Implications. *Obstet Gynecol Clin North Am*. 2015;42(2):299–313. DOI:10.1016/j.ogc.2015.01.007.

37. Deng J, Cao Y, Lu Y, et al. Value of placental virtual magnetic resonance elastography and intravoxel incoherent motion-based diffusion and perfusion in predicting adverse outcomes of small-for-gestational-age infants. *Insights Imaging*. 2023; 14: 153. DOI: org/10.1186/s13244-023-01503-9.

38. Le Bihan D. What can we see with IVIM MRI? *Neuroimage*. 2017;187:56–67. DOI.org/10.1016/j.neuroimage.2017.12.062.

39. Yin Z, Magin RL, Klatt D. Simultaneous MR elastography and diffusion acquisitions: diffusion-MRE (dMRE). *Magn Reson Med*. 2014; 71: 1682–1688. DOI: 10.1002/mrm.25180.

Информация об авторах:

Арасланова Лариса Вакильевна, к.м.н., заведующая отделением лучевой диагностики Областного консультативно-диагностического центра, доцент кафедры персонализированной и трансляционной медицины РостГМУ;

Скосарь Владимир Евгеньевич, ординатор РостГМУ;

Рябченко Виктория Александровна, к.м.н., ассистент кафедры персонализированной и трансляционной медицины РостГМУ;

Дайсудова Анастасия Дмитриевна, ассистент кафедры персонализированной и трансляционной медицины РостГМУ.

Authors information:

Araslanova Larisa V., Candidate of medical sciences, Head of Radiation Diagnostics Department, Regional Consultative and Diagnostic Centre, Associate Professor, Department of Personalised and Translational Medicine, Rostov State Medical University;

Skosar Vladimir E., resident, Rostov State Medical University;

Ryabchenko Victoria A., Candidate of Medical Sciences, Assistant of the Department of Personalised and Translational Medicine, Rostov State Medical University;

Daisudova Anastasia D., Assistant of the Department of Personalised and Translational Medicine, Rostov State Medical University.