



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Оригинальная статья
УДК 618.5-06:616-005:616-78
<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2026-1-107-120>

Возможности T2*-релаксометрии и диффузионно-взвешенной МРТ головного мозга плода и плаценты

А. М. Горностаева¹, В. Д. Абрамова², А. А. Савелов³,
К. А. Параскун⁴, А. М. Коростышевская⁵

¹⁻⁵ ФГБУН «Институт «Международный томографический центр»» СО РАН, Новосибирск, Россия

^{2,4} ФГБОУ ВПО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», Новосибирск, Россия

¹ <https://orcid.org/0000-0001-9384-1500>

² <https://orcid.org/0000-0002-3791-7950>

³ <https://orcid.org/0000-0002-5332-2607>

⁴ <https://orcid.org/0009-0007-7083-3840>

⁵ <https://orcid.org/0000-0002-0095-8994>

Автор, ответственный за переписку: Алёна Марковна Горностаева,
am.porkova@yandex.ru

Аннотация

Гипоксия — одна из ведущих причин нарушений внутриутробного развития и неблагоприятных перинатальных исходов. Метод T2*-релаксометрии, основанный на BOLD-эффекте, позволяет неинвазивно количественно оценить тканевую оксигенацию. Картирование измеряемого коэффициента диффузии (ИКД) используется для диагностики ишемии мозга и как количественный биомаркер пренатального созревания мозга.

Цель исследования: сравнить возможность T2*-релаксометрии и ИКД в оценке гестационных особенностей, а также гипоксических состояний головного мозга плода и плаценты.

Материалы и методы. Проведено ретроспективное поперечное исследование 200 пренатальных МРТ с 18–38-й недели гестации (НГ), выполненных в 2024–2025 гг. на 1,5 Тл и 3 Тл томографах Philips (в МТЦ СО РАН, г. Новосибирск). Для T2*-релаксометрии использована многоэховая эхо-планарная последовательность с однократным возбуждением (SS-EPI) с TE = 25–225 мс. Для ИКД – SSh DWI (b = 0,700). Данные T2*-времени релаксации (BP) и ИКД получены с помощью ROI-анализа вручную размеченных областей мозга

© Горностаева А. М., Абрамова В. Д., Савелов А. А., Параскун К. А., Коростышевская А. М., 2026

и плаценты. Статистический анализ включал критерии Шапиро — Уилка, корреляции Пирсона и Спирмена, парный t-тест, ANOVA и Kruskal — Wallis ($p < 0,05$).

Результаты. T2*-картирование головного мозга 110 плодов (66 — на 1,5 Тл; 44 — на 3 Тл томографах) и 50 плацент (30 — на 1,5 Тл; 20 — на 3 Тл томографах) показало снижение T2*-ВР с увеличением срока гестации ($p = 0,0018$ для мозга, $p = 0,05$ для плаценты). ИКД головного мозга 126 плодов также обратно коррелирует со сроком гестации ($p = 0,0135$), тогда как для плацент зависимость T2*-ВР и ИКД от срока гестации не выявлена ($p > 0,209$). При групповом анализе отмечено снижение T2*-ВР головного мозга у плодов после 29 НГ в сравнении с группой до 29 НГ ($p = 0,001$).

Выводы. Установлена зависимость T2*-ВР и ИКД головного мозга от гестационного срока, более выраженная в третьем триместре. T2*-релаксометрия и ИКД применимы для количественной оценки развития мозга плода и плаценты, имеют потенциал для раннего неинвазивного выявления гипоксических состояний.

Ключевые слова: пренатальная МРТ, T2*-релаксометрия, ИКД, гипоксия мозга плода, плацента

Для цитирования: Горностаева А. М., Абрамова В. Д., Савелов А. А. Параскун К. А., Коростышевская А. М. Возможности T2*-релаксометрии и диффузионно-взвешенной МРТ головного мозга плода и плаценты // Радиология — практика. 2026;1:107-120. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2026-1-107-120>

Источники финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-25-00023.

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

Possibilities of T2*-Relaxometry and Diffusion-Weighted MRI for Fetal Brain and Placental Assessment

Alyona M. Gornostaeva¹, Victoria D. Abramova², Andrey A. Savelov³, Kseniya A. Paraskun⁴, Alexandra M. Korostyshevskaya⁵

¹⁻⁵ International Tomography Center, SB RAS, Novosibirsk, Russia

^{2,4} Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

¹ <https://orcid.org/0000-0001-9384-1500>

² <https://orcid.org/0000-0002-3791-7950>

³ <https://orcid.org/0000-0002-5332-2607>

⁴ <https://orcid.org/0009-0007-7083-3840>

⁵ <https://orcid.org/0000-0002-0095-8994>

Corresponding author: Alyona M. Gornostaeva, am.popkova@yandex.ru

Abstract

Hypoxia is one of the leading causes of impaired intrauterine development and adverse perinatal outcomes. The T2*-relaxometry method, based on the BOLD effect, enables noninvasive quantitative assessment of tissue oxygenation. Apparent diffusion coefficient (ADC) mapping is employed in the diagnosis of cerebral ischemia and serves as a quantitative biomarker of prenatal brain maturation.

Objective. To compare the utility of T2*-relaxometry and ADC mapping in assessing gestational characteristics, as well as hypoxic conditions of the fetal brain and placenta.

Materials and Methods. A retrospective cross-sectional analysis was conducted on 200 prenatal MRI examinations performed between 18 and 38 weeks of gestation (WG) from 2024 to 2025, using 1.5 T and 3 T Philips scanners at the MTC SB RAS (Novosibirsk, Russia). T2*-relaxometry was performed using a multi-echo single-shot echo-planar imaging (SS-EPI) sequence with TE ranging from 25 to 225 ms. ADC mapping was conducted using single-shot diffusion-weighted imaging (SSh DWI) with b-values of 0 and 700 s/mm². T2*-relaxation times (RT) and ADC values were obtained through ROI analysis of manually segmented regions of the brain and placenta. Statistical analysis included the Shapiro – Wilk test, Pearson and Spearman correlations, paired t-test, ANOVA, and Kruskal – Wallis test, with significance set at $p < 0.05$.

Results. T2*-mapping of the brain in 110 fetuses (66 scanned at 1.5 T; 44 at 3 T) and of the placenta in 50 cases (30 at 1.5 T; 20 at 3 T) demonstrated a decrease in T2*-RT with advancing gestational age ($p = 0.0018$ for the brain, $p = 0.05$ for the placenta). ADC values of the fetal brain ($n = 126$) were also inversely correlated with gestational age ($p = 0.0135$), whereas no significant gestational dependence was found for placental T2*-RT or ADC values ($p > 0.209$). Group analysis revealed a significant reduction in fetal brain T2*-RT after 29 WG compared to fetuses before 29 WG ($p = 0.001$).

Conclusions. Both T2*-RT and ADC values of the fetal brain are significantly influenced by gestational age, with more pronounced changes observed in the third trimester. T2*-relaxometry and ADC mapping are applicable for quantitative evaluation of fetal brain and placental development and hold potential for early, noninvasive detection of hypoxic conditions.

Keywords: Prenatal MRI, T2*-relaxometry, ADC-mapping, Fetal Brain Hypoxia, Placenta

For citation: Gornostaeva A. M., Abramova V. D., Savelov A. A., Paraskun K. A., Korostyshevskaya A. M. Possibilities of T2*-Relaxometry and Diffusion-Weighted MRI for Fetal Brain and Placental Assessment. *Radiology – Practice*. 2026;1:107-120. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2026-1-107-120>

Funding

The study was supported by the Russian Science Foundation, grant [No. 25-25-00023](#).

Conflicts of Interest

The authors declare that this work, its subject, and content do not involve any competing interests. The opinions expressed in the article are those of the manuscript authors. The authors confirm the compliance of their authorship with the ICMJE (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.

Актуальность

Одной из основных причин нарушений развития и неблагоприятных перинатальных исходов является гипоксия плода. Существующие методы диагностики предоставляют лишь косвенные показатели и факторы риска развития гипоксии с большим количеством ложноположительных результатов, что приводит к необоснованным инвазивным вмешательствам и не позволяет достаточно точно прогнозировать исходы для новорожденных [8, 11, 13, 18].

Магнитно-резонансная томография (МРТ) плода все чаще используется в рутинной практике для исключения внутриутробной патологии. С развитием технологий количественной и функциональной томографии появляются возможности поиска новых биомаркеров функциональных отклонений, которые связаны с метаболическими изменениями в тканях, в том числе возникающих при гипоксических состояниях. Преимущества этих методов в их безопасности, неинвазивности и скорости получения результатов особенно важны в пренатальной диагностике.

Метод T2*-релаксометрии позволяет провести прямую количественную оценку насыщения тканей кислородом *in vivo* благодаря эффекту снижения времени поперечной T2*-релаксации (BOLD-эффект) при накоплении дезоксигемоглобина в тканях, который обладает парамагнитными свойствами, что усиливает неоднородность магнитного поля, ускоряет поперечную релакса-

цию и снижает время T2* (T2*-BP) [12]. Значение T2*-BP также зависит от содержания воды, накопления липидов и отложения макромолекул в тканях [16]. Этот факт обуславливает гестационную зависимость нормативных показателей T2*-BP мозга плода.

Снижение T2*-BP в плаценте выявлено при состояниях, связанных с нарушением маточно-плацентарной перфузии: преэклампсия и гестационная гипертензия [7], задержка внутриутробного развития плода [6] врожденные пороки сердца плода [4, 15]. Установлена корреляция между низкими значениями T2*-BP плаценты и снижением T2*-BP мозга плода, что может отражать системные проявления внутриутробной гипоксии. Показано, что T2*-BP плаценты ассоциировано с объемом корковых и подкорковых структур мозга плода, что указывает на возможное прогностическое значение метода для оценки риска нарушений развития мозга плода [4].

С учетом клинического запроса идут разработки оригинальных быстрых протоколов получения и измерения времени релаксации T2* для пренатальной МРТ (multi-echo SS-EPI), пригодных для исследований на 1,5 Тл и 3 Тл томографах, которые до настоящего момента не стандартизированы и имеют разрозненный характер [4, 6, 7, 15].

Метод диффузионно-взвешенной МРТ описывает подвижность молекул воды и зависит от факторов, ограничивающих молекулярное движение, включая в первую очередь количество внеклеточной жидкости и клеточных

мембран в объеме ткани, концентрацию биологических макромолекул, которые изменяются при внутриклеточном отеке, свойственном гипоксии.

Диффузионно-взвешенная МРТ обладает высокой чувствительностью к изменениям головного мозга плода, широкой доступностью и быстротой получения данных [2, 3, 5, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 19, 20]. Многочисленные исследования продемонстрировали значительные корреляции ИКД с гестационным возрастом (ГВ) в различных анатомических структурах мозга [2, 4, 8–10, 13, 14, 17, 19, 20]. Известна также чувствительность ИКД к определенным патологическим состояниям плода, включающим ишемию [5], внутриутробную задержку роста [2], вентрикуломегалию [10], мальформацию Арнольда — Киари [19] и цитомегаловирусную инфекцию [19].

Была обнаружена значимая отрицательная корреляция между ИКД плаценты и ГВ (≥ 30 НГ), в то время как отсутствие зависимости наблюдалось при сроке беременности 19–29 НГ [1]. Это явление может быть объяснено увеличением фиброзного компонента и появлением отложений кальция в паренхиме плаценты, что приводит к снижению диффузии воды, соответственно, падению ИКД.

Таким образом, методы T2*-релаксометрии и картирования ИКД могут предоставлять количественную информацию о микроструктурных изменениях головного мозга плода и плаценты и рассматриваться как потенциальные источники биомаркеров нормального или патологического их состояния, повышая диагностическую точность пренатальной МРТ.

Цель исследования: сравнить возможности T2*-релаксометрии и ИКД в оценке гестационных особенностей, а также отдельных гипоксических состояний головного мозга плода и плаценты при проведении пренатальной МРТ.

Материалы и методы

Исследование проведено в ФГБУН «Институт «Международный томографический центр»» СО РАН с одобрения этического комитета и в соответствии рекомендациями ISUOG по показаниям и методике проведения и анализа МРТ плода. С февраля 2024 по октябрь 2025 года проводились МРТ-обследования плодов, и эти данные вошли в исследование. Все участники дали письменное добровольное согласие на использование анонимизированных данных обследования в научных целях.

В исследуемую популяцию вошли 200 беременных женщин, направленных на МРТ плода или плаценты по клиническим показаниям.

Критерии включения в группу исследования: беременность II–III триместра, отсутствие признаков гипоксии плода по данным акушерского анамнеза (отсутствие факторов риска преэклампсии/эклампсии у матери, нарушений углеводного обмена, признаков анемии, задержки внутриутробного развития плода (ЗВУР), врожденных пороков сердца у плода), отсутствие артефактов на изображениях, значение относительной ошибки при определении T2*-ВР и ИКД, а также различие значений T2*-ВР и ИКД в правом и левом полушариях менее 10 %.

Сканирование выполнялось на магнитно-резонансных томографах Ingenia (Philips, Нидерланды) с индукцией магнитного поля 1,5 Тл и 3 Тл с использованием клинических протоколов MR FETAL или MR PLACENTA, используемых в отделении «МРТ ТЕХНОЛОГИИ» МТЦ СО РАН (включающих T2-ВИ, T1-ВИ, MUSELO CINE, EPI). Общее время сканирования не превышало 40 мин. Получение T2*-ВИ и/или DWI головного мозга и/или плаценты осуществлялось в дополнение к основному протоколу и не превышало 20 и 60 с соответственно.

Измерения проводились в Центре коллективного пользования «Масс-спектрометрические исследования» СО

РАН с использованием МР-томографа Ingenia 3.0 Тл (Philips).

В качестве базовой импульсной последовательности для T2*-релаксометрии и картирования использовалась последовательность фирмы производителя с эхо-планарной визуализацией с однократным возбуждением (SS-EPI) с параметрами сканирования: TE 25, 75, 125, 175 и 225 мс (для головного мозга плода, рис. 1) и TE 16, 48, 80, 112 и 144 (для плаценты, рис. 2) с шагом 50/32 мс, толщина среза 3 мм, размер матрицы — 100 × 100, угол поворота — FA 90°, поле зрения — FOV от 25 × 25 до 35 × 35 см² в зависимости от размера тела матери и возраста плода. Направление фазового кодирования выбиралось таким образом, чтобы минимизировать артефакты в области интереса. Для подавления сигнала жировой ткани использовалась селективная инверсия методом SPIR.

Для построения ИКД-карт использовалась 2D single-shot spin echo diffusi-

on-weighted echo-planar imaging (EPI) со следующими параметрами: TR/TE = 2433/177 мс; b-факторы — 0,700 с/мм²; поле обзора 30 × 30 см²; матрица 232 × 199; разрешение в плоскости 1,29 × 1,5 мм²; 9 срезов толщиной 4 мм с промежутком 0,4 мм; два усреднения сигнала; время сканирования — 37 с. Карты ИКД были автоматически реконструированы с помощью программного обеспечения производителя сканера, выполняющего линейную регрессию по логарифмам сигнала DWI на основе моноэкспоненциальной модели.

Анализ данных

Сбор количественных данных T2*-ВР и ИКД проводился на аналогичных аксиальных срезах на исходных T2*-изображениях и ИКД-картах путем ручного размещения ROI (region of interest) в симметричных зонах белого вещества полушарий над боковыми желудочками (рис. 1) и на максимальной площади в плаценте (рис. 2), исключая рядом рас-

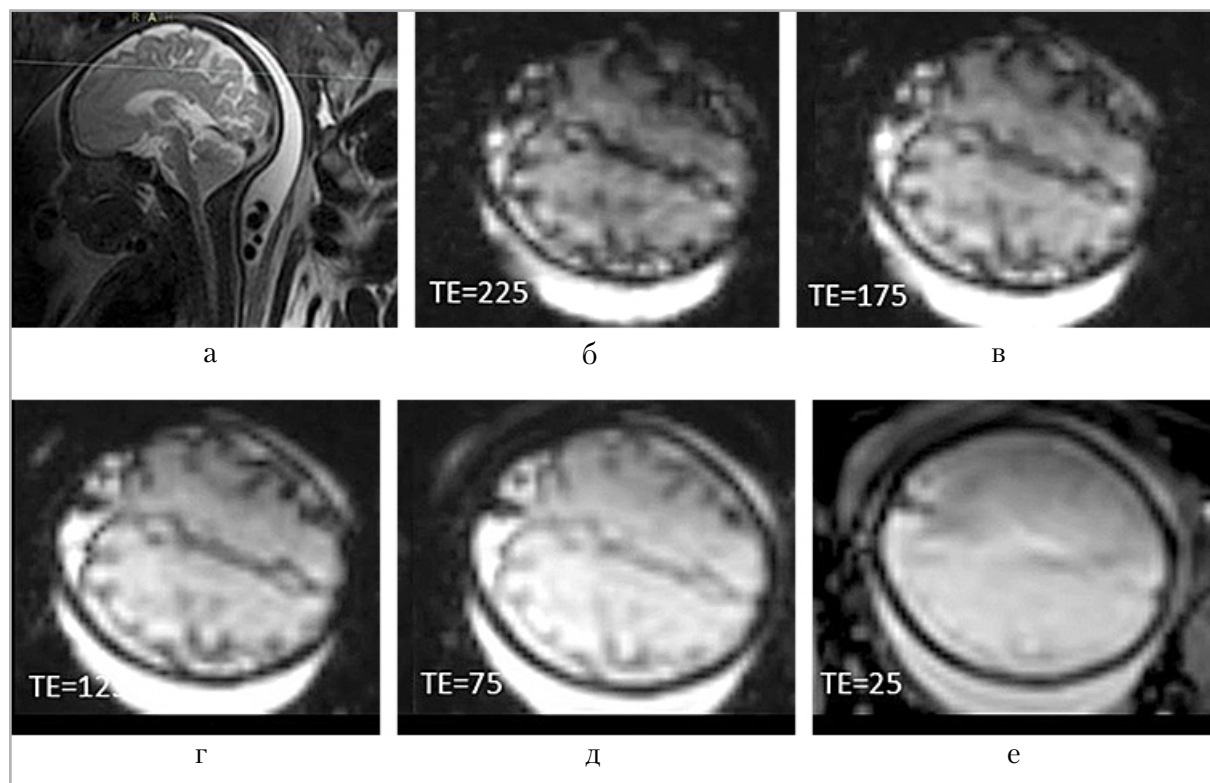


Рис. 1. МРТ 3 Тл, ориентация среза для размещения ROI на сагиттальной T2-ВИ головного мозга плода (а). T2*-взвешенные изображения выбранного среза полушарий головного мозга плода (б — е) с различными значениями TE (Echo Time), мс

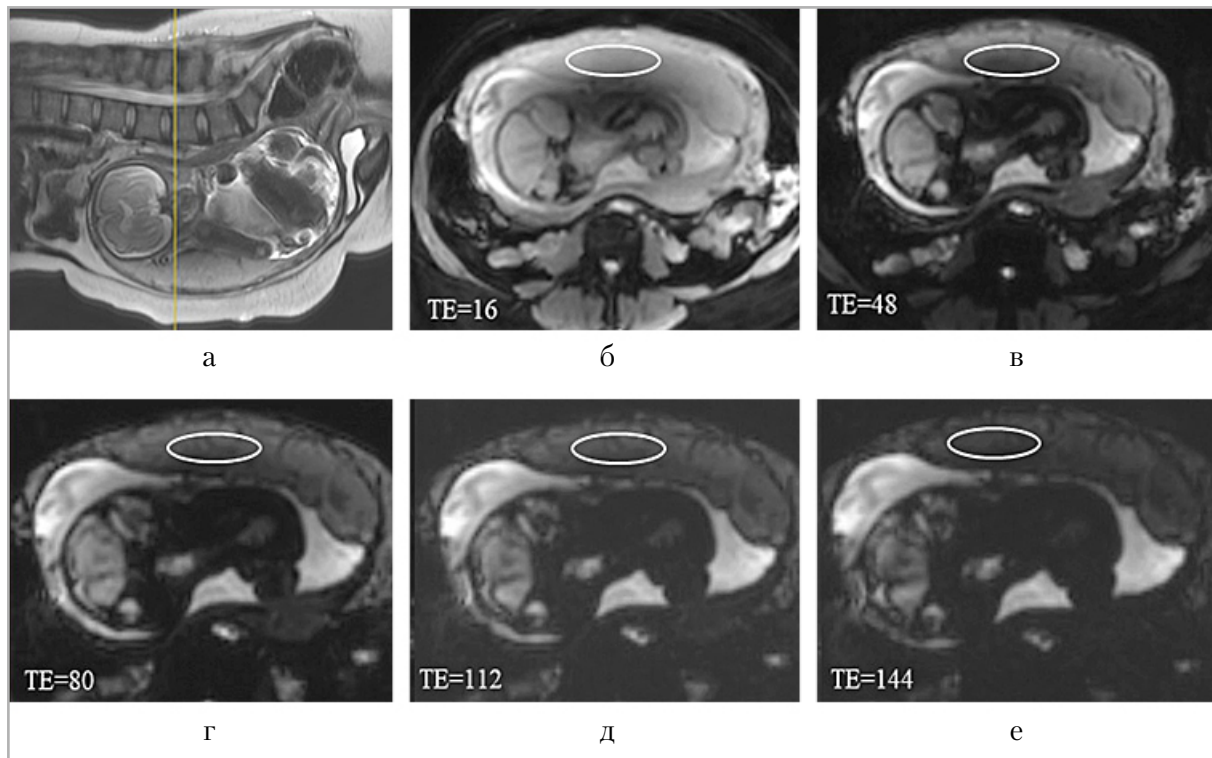


Рис. 2. МРТ 3 Тл, ориентация среза для размещения ROI на сагиттальной T2-ВИ плаценты (а). T2*-взвешенные изображения плаценты (а – е) с различными значениями TE (Echo Time), мс

положенные сосудистые и жидкостные структуры.

Количественные данные T2*-ВР были получены методом ROI-based fitting, который заключается в усреднении интенсивности МР-сигнала в пределах ROI для каждого значения времени эха (TE) с последующей аппроксимацией полученной зависимости экспоненциальной функцией $A \cdot \exp(-TE/T2^*)$, где TE – время эха; А – коэффициент интенсивности сигнала; T2* – время релаксации. Вычисления выполнялись средствами Google sheet.

Значения T2*-ВР и ИКД головного мозга рассчитывались отдельно для правого и левого полушарий. Ввиду отсутствия статистически значимых различий между полушариями значения были усреднены ($p = 0,314$, парный t-критерий), далее в анализе использовались средние арифметические значения между правым и левым полушариями. Перед объединением данные

проверялись на нормальность (Шapiro – Уилка, $p = 0,816$ для левого и $p = 0,226$ для правого полушария).

Для оценки взаимосвязи между T2*-ВР/ИКД и гестационным возрастом использовались коэффициенты корреляции Пирсона или Спирмена в зависимости от нормальности распределения данных.

Для межгруппового сравнения значений T2*-ВР и ИКД все наблюдения были условно разделены на два периода гестации:

- для данных, полученных на томографе 1,5 Тл: ранний период ≤ 21 НГ, поздний > 21 НГ;
- для данных, полученных на томографе 3 Тл: ранний период ≤ 29 НГ, поздний > 29 НГ.

Сравнение групп проводилось с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA или Kruskal – Wallis). Статистически значимыми считались значения $p < 0,05$.

Результаты

В результате анализа всей базы количественных данных (200 исследований) на сроке гестации от 18 до 38 недель внутриутробного развития в соответствии с критериями включения в итоговую выборку не вошло 45 случаев в связи с выраженными артефактами от движений плода (преимущественно на сроках до 25 НГ, обследованных на 1,5 Тл томографе) или диэлектрическими артефактами при обследовании на 3 Тл томографе при избыточном весе беременной или многоводии.

Остальные 155 случаев, включенных в исследование, были разделены на те, которые были обследованы на 1,5 Тл и 3 Тл томографах.

На томографе 1,5 Тл средний ГВ обследованных плодов — 22,4 нед, получены данные 6 T2*-релаксометрий (PM) и 65 — ИКД головного мозга, 30 T2* релаксометрий и 1 ИКД плаценты.

На томографе 3 Тл средний ГВ обследованных плодов — 29,6 нед, получены данные 44 T2*-PM и 61 ИКД головного мозга плода, 20 T2*-PM и 58 ИКД плаценты.

В группе плодов на томографе 1,5 Тл (ГВ преимущественно до 25 НГ) не было

выявлено значимой корреляции T2*-BP с ГВ в головном мозге (коэффициент Спирмена, $p = 0,253$) и плаценте (коэффициент Пирсона, $p = 0,582$), а также не наблюдалась строгая зависимость значений ИКД от ГВ для головного мозга плода (коэффициент Спирмена, $p = 0,358$) и для плаценты (коэффициент Спирмена, $p = 0,85$).

В группе обследованных на томографе 3 Тл, с 19 и до 38 НГ, было выявлено статистически значимое снижение T2*-BP в головном мозге плода с увеличением ГВ (коэффициент Пирсона, $p = 0,0018$, рис. 3). Также была выявлена значимая корреляция ИКД с гестационным возрастом в головном мозге плода (коэффициент Спирмена, $p = 0,0135$). Не было выявлено снижения значений T2*-BP и ИКД в плаценте с увеличением срока беременности (коэффициент Пирсона, $p = 0,0506$ и $p = 0,209$ соответственно).

При проведении проспективного индивидуального анализа двух случаев пренатальной МРТ с анамнестически и катаннестически подтвержденным гипоксическим состоянием плода при задержке внутриутробного развития (ЗВУР) отмечается снижение показателя

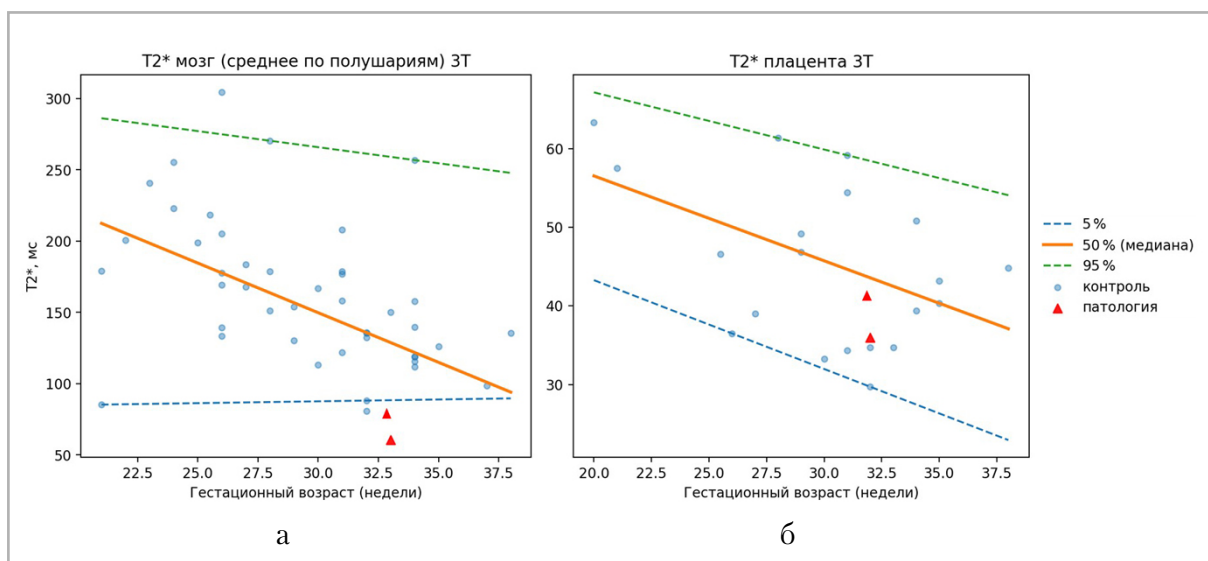


Рис. 3. Центильный график T2-ВР* (мс) в полушариях головного мозга (а), в плаценте (б) в зависимости от ГВ (НГ) на томографе 3 Тл в контрольной группе и отдельных случаях при патологии

телей T2*-BP головного мозга на 56 %, плаценты — на 44 %. При верифицированной отслойке и дегенеративных изменениях плаценты, вторичном тяжелом гипоксическом состоянии ребенка

при рождении показатели T2*-BP головного мозга плода на 32 НГ были снижены на 50 %, плаценты на 23,8 %, показатели ИКД плаценты были снижены на 63 % (см. табл.). При этом структурных

Сравнительная таблица показателей T2*-BP (мс) и ИКД (мм²/с) головного мозга и плаценты в контрольной группе и в двух случаях верифицированных гипоксических состояний плода (ЗВУР и отслойка плаценты)

Показатели	Контроль	ЗВУР	Отслойка плаценты
ГВ (нед)	32	32	32
T2*-BP (мс) головной мозг	135,46	72,6	67,64
T2*-BP (мс) плацента	65,25	35,95	49,74
ИКД (мм ² /с) головной мозг	1,65 ± 0,08	1,55 ± 0,19	1,4 ± 0,16
ИКД (мм ² /с) плацента	1,3 ± 0,17	1,6 ± 0,43	0,48 ± 0,4

изменений головного мозга на МРТ в обоих случаях выявлено не было, МРТ плаценты при ее отслойке оказалась более эффективной в определении ее структурных изменений и ретроплацентарной гематомы, чем УЗИ.

Значения T2*-BP в головном мозге плода в позднем гестационном периоде (> 29 НГ) были статистически значимо ниже по сравнению с ранним (≤ 29 НГ), что подтверждено результатами однофакторного дисперсионного анализа ANOVA (p = 0,001). Между группами раннего (≤ 29 НГ) и позднего (> 29 НГ) гестационного срока не было выявлено статически значимых различий для T2*-BP при исследовании плаценты (p = 0,0664), а также для ИКД в головном мозге (p = 0,0597) и плаценте (p = 0,285) (рис. 4).

Обсуждение

Проведенное исследование на большой выборке плодов без признаков и факторов риска внутриутробной гипоксии было направлено на изучение нормативных гестационных показателей T2*-релаксометрии и ИКД головного мозга плода и плаценты во 2-м и 3-м триместрах внутриутробного развития. Эти референсные данные необходимы

для учета гестационных особенностей нормативных показателей при использовании диффузионного и релаксометрических методов в количественной диагностике гипоксических состояний.

Полученные результаты демонстрируют динамическое снижение T2*-BP и ИКД при исследовании головного мозга плодов с увеличением срока гестации, преимущественно в группе позднего гестационного периода (> 29 НГ), выполненных на 3 Тл томографе, что коррелирует с данными, полученными при других исследованиях внутриутробной гипоксии этими методами [7, 19, 20].

Выявленные нами наиболее выраженные изменения T2*-BP и ИКД головного мозга происходят в третьем триместре, обусловлены ускоренными процессами тканевого созревания в этот период [7, 18]. Именно с этим фактором мы связываем отсутствие статистически значимых гестационных различий T2*-BP и ИКД в группе, обследованных на 1,5 Тл, куда попадает выборка плодов преимущественно 2-го триместра. Такое распределение обусловлено международной практикой обследования беременных до 25 НГ на 1,5 Тл сканере, после 25 НГ — на 3 Тл (при наличии обоих томографов в кли-

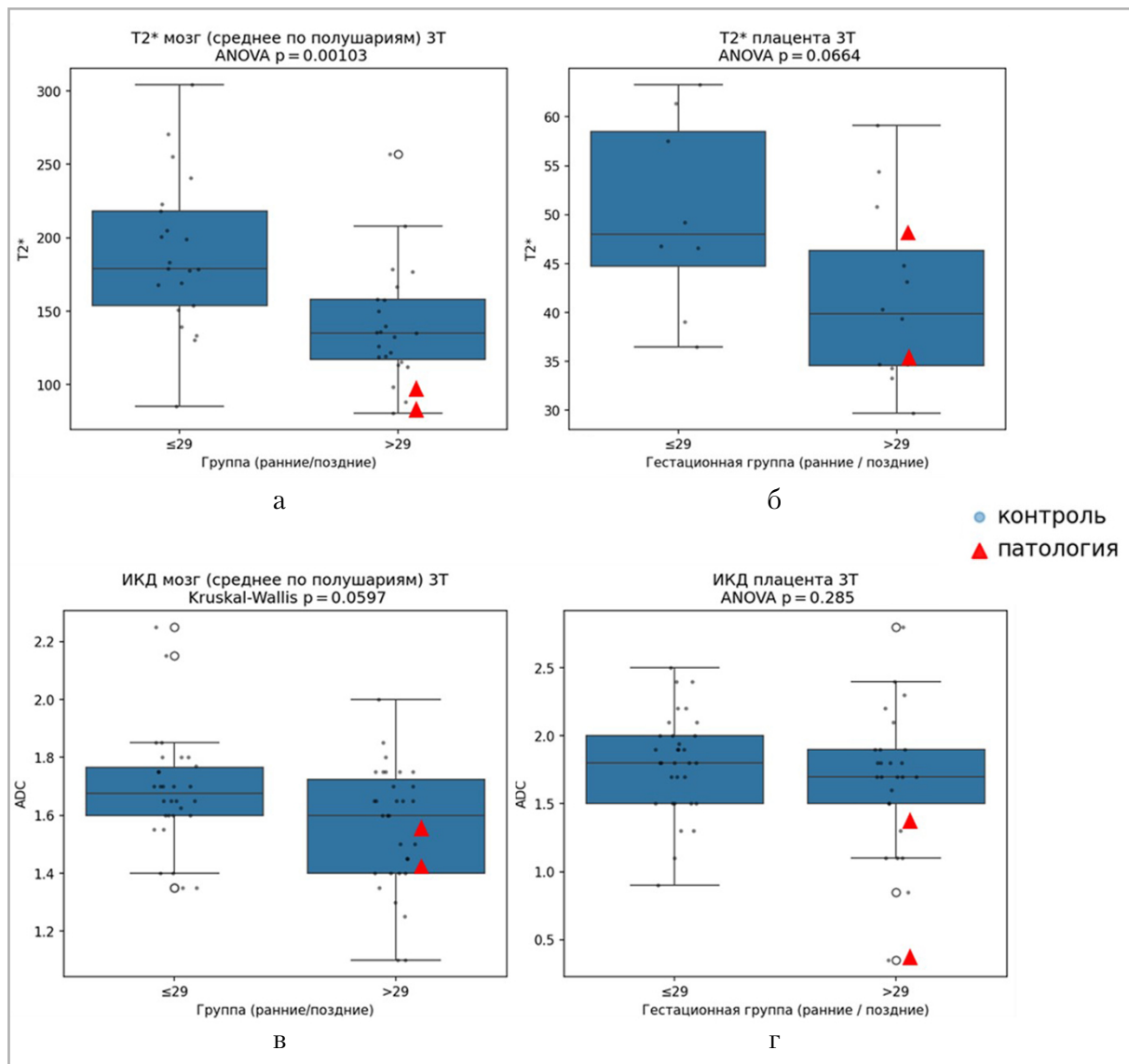


Рис. 4. Результаты статистического сравнения T2*-BP (мс) в полушариях головного мозга (а), в плаценте (б), ИКД ($\text{мм}^2/\text{с}$) в полушариях головного мозга (в), в плаценте (г) в разных гестационных группах (до < 29 НГ и > 29 НГ) на томографе 3 Тл (ANOVA и Kruskal – Wallis)

нике). Это привело к неравномерному распределению выборки по гестационному возрасту в двух группах с преимущественным преобладанием плодов третьего триместра на 3 Тл томографе, где нами и были выявлены основные статистические гестационные различия T2*-BP и ИКД головного мозга. Соответственно отсутствие статистически значимых гестационных различий T2*-BP и ИКД на 1,5 Тл томографе обусловлено также не особенностью сканера, а фактором распределения выборки по гестационному возрасту.

Лимитирующим фактором нашего исследования является отсутствие равномерного сквозного распределения всех возрастных групп на каждом сканере (1,5 Тл и 3 Тл), которое позволило бы более точно определить абсолютные значения и их разброс для каждой возрастной группы на томографах с различной напряженностью магнитного поля. Однако в клинической практике в каждом конкретном случае можно соотнести полученные количественные данные T2*-BP и ИКД с референсными значениями, полученными на соот-

ветствующем томографе для данного гестационного срока. Пример такого пилотного сравнения в двух случаях верифицированных гипоксических состояний представлен в нашей работе и демонстрирует существенное снижение исследуемых показателей относительно референсных значений T2*-BP головного мозга на 56 % (135,46 мс против 72,6 мс) и плаценты на 44 % (35,98 мс против 65,25 мс).

Возможности измерения ИКД и T2*-ВИ плаценты для оценки микроструктурных и функциональных изменений остаются недостаточно изученными. В отличие от головного мозга индивидуальные морфофункциональные особенности плаценты зависят от множества факторов (особенностей фетоплацентарного кровотока, локализации, вариантов строения и прикрепления и др.), что и определяет большой разброс полученных нами значений, а также отсутствие значимой гестационной динамики, несмотря на известные данные о процессах ее структурного созревания и старения. Таким образом, наше исследование показало, что ИКД и T2*-ВИ плаценты не могут пока рассматриваться как референсные значения в диагностике ее доорганических изменений или как предиктор гипоксического поражения плода без учета ее морфологических характеристик при УЗИ и МРТ. Однако при нашем одиночном исследовании T2*-BP и ИКД плаценты в условиях ее отслойки и выраженных структурных изменениях на T2-VI и EPI (с диффузным неравномерным снижением интенсивности сигнала) на сроке гестации 32 недели было выявлено значимое снижение T2*-BP (мс) относительно полученных нами референсных значений до 23,8 % (49,74 мс против 65,25 мс), ИКД до 63 % ($0,48 \pm 0,4 \text{ мм}^2/\text{с}$ против $1,3 \pm 0,17 \text{ мм}^2/\text{с}$).

Таким образом, T2*-релаксометрию и ИКД головного мозга плода можно рекомендовать при подозрении на

гипоксию головного мозга при отсутствии структурных изменений на УЗИ и традиционной МРТ или при наличии структурных изменений плаценты, являющихся факторами риска гипоксии плода. Необходимо учитывать гестационную динамику референсных значений T2*-BP и ИКД головного мозга, особенно в третьем триместре гестационного развития.

С учетом быстроты сканирования T2*-релаксометрия может быть использована в качестве дополнительной импульсной последовательности для беременных на сроке 24–36 НГ в случаях подозрения на хроническую гипоксию, задержку внутриутробного развития, врожденных пороков сердца, фетоплацентарной недостаточности, а также при наличии других факторов риска развития внутриутробных гипоксических состояний.

Для установления диагностических порогов и оценки клинической эффективности методов необходимо провести анализ, связывающий результаты T2*-релаксометрии и ИКД с перинатальными исходами и постнатальной верификацией гипоксических расстройств.

Выводы

На 1,5 Тл и 3 Тл томографах получены референсные значения T2*-BP и ИКД головного мозга плода и плаценты для различных гестационных сроков.

В 3-м триместре выявлено значимое снижение показателей T2*-BP и ИКД головного мозга плода с увеличением срока гестации ($p = 0,0018$ и $p = 0,0135$).

Первые клинические испытания методов демонстрируют снижение показателей T2*-BP и ИКД в структуре головного мозга при верифицированном гипоксическом состоянии, а также в структуре плаценты и головного мозга плода при массивной отслойке плаценты — указывают на перспективы дальнейших исследований методов T2* и

ИКД в диагностике внутриутробных гипоксических расстройств.

Список источников / References

1. Макогон А. В., Андрияшина И. В. Диагностика и лечение гемолитической болезни плода // Акушерство и гинекология. 2018. Т. 17, № 3. С. 45–52. Makogon A. V., Andryushina I. V. Haemolytic disease of the fetus: monitoring, treatment of the fetus and delivery. *Vopr. ginekol. akus. perinatol. (Gynecology, Obstetrics and Perinatology)*. 2018;17(3):45-52. (In Russ). [DOI](#)
2. Arthurs O. J., Rega A., Guimiot F., Belarbi N., Rosenblatt J., Biran V., Elmaleh M., Sebag G., Alison M. Diffusion-weighted magnetic resonance imaging of the fetal brain in intrauterine growth restriction. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2017; 50(1):79-87. [DOI](#)
3. Capuani S., Guerreri M., Antonelli A., Bernardo S., Porpora M. G., Giancotti A., Catalano C., Manganaro L. Diffusion and perfusion quantified by Magnetic Resonance Imaging are markers of human placenta development in normal pregnancy. *Placenta.* 2017;58:33-39. [DOI](#)
4. Cromb D., Steinweg J., Aviles Verdera J., van Poppel M. P. M., Bonthrone A. F., Lloyd D. F. A., Pushparajah K., Simpson J., Razavi R., Rutherford M., Counsell S. J., Hutter J. T2*-Relaxometry MRI to Assess Third Trimester Placental and Fetal Brain Oxygenation and Placental Characteristics in Healthy Fetuses and Fetuses With Congenital Heart Disease. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2025;61(3):1246-1255. [DOI](#)
5. Han R., Huang L., Sun Z., Zhang D., Chen X., Yang X., Cao Z. Assessment of apparent diffusion coefficient of normal fetal brain development from gestational age week 24 up to term age: a preliminary study. *Fetal. Diagn. Ther.* 2015;37(2):102-7. [DOI](#)
6. Hansen D. N., Sinding M., Petersen A., Christiansen O. B., Ulbjerg N., Peters D. A., Frøkjær J. B., Sørensen A. T2*-weighted placental magnetic resonance imaging: a biomarker of placental dysfunction in small-for-gestational-age pregnancies. *Am. J. Obstet. Gynecol. MFM.* 2022;4(3):100578. [DOI](#)
7. Ho A. E. P., Hutter J., Jackson L. H., Seed P. T., McCabe L., Al-Adnani M., Marnerides A., George S., Story L., Hajnal J. V., Rutherford M. A., Chappell L. C. T2* Placental Magnetic Resonance Imaging in Preterm Preeclampsia: An Observational Cohort Study. *Hypertension.* 2020;75(6):1523-1531. [DOI](#)
8. Korostyshevskaya A. M., Prihod'ko I. Yu., Savelov A. A., Yarnykh V. L. Direct comparison between apparent diffusion coefficient and macromolecular proton fraction as quantitative biomarkers of the human fetal brain maturation. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2019;50(1):52-61. [DOI](#)
9. Kotovich D., Guedalia J. S. B., Hoffmann C., Sze G., Eisenkraft A., Yaniv G. Apparent Diffusion Coefficient Value Changes and Clinical Correlation in 90 Cases of Cytomegalovirus-Infected Fetuses with Unremarkable Fetal MRI Results. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2017;38(7):1443-1448. [DOI](#)
10. Kutuk M. S., Sahin M., Gorkem S. B., Doganay S., Ozturk A. Relationship between Doppler findings and fetal brain apparent diffusion coefficient in early-onset intra-uterine growth restriction. *J. Matern. Fetal. Neonatal. Med.* 2018; 31(23):3201-3208. [DOI](#)
11. Lauridsen M. H., Ulbjerg N., Henriksen T. B., Petersen O. B., Stausbøl-Grøn B., Matthiesen N. B., Peters D. A., Ringgaard S., Hjortdal V. E. Cerebral Oxygenation Measurements by Magnetic Resonance Imaging in Fetuses With and Without Heart Defects. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2017;10(11):e006459. [DOI](#)
12. O'Connor J. P. B., Robinson S. P., Waterton J. C. Imaging tumour hypoxia with oxygen-enhanced MRI and BOLD MRI. *Br. J. Radiol.* 2019;92(1096):20180642. [DOI](#)
13. Schneider J. F., Confort-Gouny S., Le Fur Y., Viout P., Bennathan M., Chapon

- F., Fogliarini C., Cozzone P., Girard N. Diffusion-weighted imaging in normal fetal brain maturation. *Eur. Radiol.* 2007; 17(9):2422-9. [DOI](#)
14. Schönberg N., Weisstanner C., Wiest R., Bonél H. M., Piechowiak E. I., Cullmann J. L., Raio L., Pastore-Wapp M., Slavova N. The influence of various cerebral and extracerebral pathologies on apparent diffusion coefficient values in the fetal brain. *J. Neuroimaging.* 2020;30(4):477-485. [DOI](#)
15. Steinweg J. K., Hui G. T. Y., Pietsch M., Ho A., van Poppel M. P., Lloyd D., Colford K., Simpson J. M., Razavi R., Pushparajah K., Rutherford M., Hutter J. T2* placental MRI in pregnancies complicated with fetal congenital heart disease. *Placenta.* 2021;108:23-31. [DOI](#)
16. Vasylechko S., Malamateniou C., Nunes R. G., Fox M., Allsop J., Rutherford M., Rueckert D., Hajnal J. V. T2* relaxometry of fetal brain at 1.5 Tesla using a motion tolerant method. *Magn. Reson. Med.* 2015;73(5):1795-802. [DOI](#)
17. Vu C., Chai Y., Coloigner J., Nederveen A. J., Borzage M., Bush A., Wood J. C. Quantitative perfusion mapping with induced transient hypoxia using BOLD MRI. *Magn. Reson. Med.* 2021;85(1):168-181. [DOI](#)
18. Yaniv G., Hoffmann C., Weisz B., Lipitz S., Katorza E., Kidron D., Bergman D., Biegon A. Region-specific reductions in brain apparent diffusion coefficient in cytomegalovirus-infected fetuses. *Ultrasound Obstet. Gynecol.* 2016;47(5):600-7. [DOI](#)
19. Yaniv G., Katorza E., Bercovitz R., Bergman D., Greenberg G., Biegon A., Hoffmann C. Region-specific changes in brain diffusivity in fetal isolated mild ventriculomegaly. *Eur. Radiol.* 2016;26(3):840-8. [DOI](#)
20. Zheng W., Yan G., Jiang Y., Bao Z., Li K., Deng M., Li B., Zou Y. Diffusion-Weighted MRI of the Fetal Brain in Fetal Growth Restriction With Maternal Preeclampsia or Gestational Hypertension. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2024;59(4):1384-1393. [DOI](#)

Сведения об авторах / Information about the authors

Горностаева Алёна Марковна, младший научный сотрудник ФГБУН «Институт “Международный томографический центр”» Сибирского отделения Российской академии наук; врач-рентгенолог АО «Медицинский центр “Авиценна”» группы компаний «Мать и дитя», Новосибирск, Россия.

Вклад автора: анализ литературы, анализ и обобщение результатов исследования, написание текста статьи.

Gornostaeva Alyona Markovna, Junior Researcher, International Tomography Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; Radiologist at the Avicenna Medical Center of the Mother and Child Group of Companies, Novosibirsk, Russia.

Author's contribution: literature review, analysis and summary of results, research, writing the article text.

Абрамова Виктория Дмитриевна, младший научный сотрудник ФГБУН «Институт “Международный томографический центр”» Сибирского отделения Российской академии наук; аспирант ФГБОУ ВПО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», Новосибирск, Россия.

Вклад автора: анализ данных исследования.

Abramova Victoria Dmitrievna, Junior Researcher, International Tomography Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; Postgraduate Student, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia.

Author's contribution: analysis of the research data.

Савелов Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт “Международный томографический центр”» Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия.

Вклад автора: формирование концепции, дизайн исследования, разработка методологии исследования.

Savelov Andrey Aleksandrovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, International Tomography Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.
Author's contribution: formation of the concept of research design, development of research methodology.

Параскун Ксения Алексеевна, младший научный сотрудник ФГБУН «Институт "Международный томографический центр"» Сибирского отделения Российской академии наук; аспирант ФГБОУ ВПО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», Новосибирск, Россия.
Вклад автора: анализ данных, разработка методологии исследования.

Paraskun Kseniia Alekseevna, Junior Researcher, International Tomography Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; Postgraduate Student, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia.
Author's contribution: analysis of the research data, development of research methodology.

Коростышевская Александра Михайловна, доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт "Международный томографический центр"» Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия.
Вклад автора: формирование концепции, дизайн исследования, разработка методологии исследования, проведение исследований, анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Korostyshevskaya Aleksandra Mikhailovna, Doctor of Medical Sciences, Leading Researcher, International Tomography Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.
Author's contribution: formation of the concept of research design, development of research methodology, conducting research, analysis of research results, writing the text of the article.

Статья поступила в редакцию 29.11.2025;
одобрена после рецензирования 28.01.2026;
принята к публикации 28.01.2026.

The article was submitted 29.11.2025;
approved after reviewing 28.01.2026;
accepted for publication 28.01.2026.