

ВОЗМОЖНОСТИ ВЫСОКОПОЛЬНОЙ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ (3 ТЕСЛА) В ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЛОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТАУСТРОЙСТВА

Боршевецкая А. А.¹, Егорова В. С.¹, Галяутдинова Л. Э.¹,
Пучнин В. М.², Корешин Е. А.², Калугина А. В.²,
Мащенко И. А.¹, Ефимцев А. Ю.¹, Щелокова А. В.², Труфанов Г. Е.¹

Контактная информация:

Боршевецкая Анастасия Александровна,
ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова»
Минздрава России,
ул. Аккуратова, д. 2, Санкт-Петербург,
Россия, 197341.
E-mail: borshevetskaya@gmail.com

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 29.12.2022
и принята к печати 23.03.2023.

Резюме

Актуальность. Использование МР-томографов с индукцией магнитного поля в 3 Тесла для диагностики плода и экстрафетальных структур особенно актуально в сроки с конца второго и в течение третьего триместра беременности, когда плод достигает достаточных размеров и его движения не так активны. Методика позволяет получить МР-изображения с лучшими характеристиками, чем при исследовании на 1,5 Т аппаратах, однако возникает риск нагрева пациента во время сканирования, что особенно опасно для беременных. **Цель.** Оценить улучшение визуализации плода и экстрафетальных структур при использовании метаустройства. **Материалы и методы.** В исследовании использовалось метаустройство для улучшения визуализации плода и экстрафетальных структур на МР-томографе с индукцией магнитного поля 3 Тесла. Обследовано 12 беременных на сроке гестации от 29 до 39 недель, для исследования использовали стандартную последовательность T2-взвешенного турбо-спинового эха (Single Shot Turbo (SST)/Fast Spin Echo (FSE)). Для приема данных использовали поверхностную абдоминальную приемную РЧ катушку. Метаустройство и радиочастотная катушка располагались строго по центру зоны исследования. Изображения оценивались рентгенологами по 5-балльной шкале Likert. **Результаты.** Тестирование МР-подкладки на основе метаповерхности показало улучшение диагностического качества изображений, повышение однородности радиочастотного магнитного поля, снижение удельного коэффициента поглощения электромагнитной энергии телом человека (УКП, SARwb), уменьшение нагрева тканей беременных во время сканирования. **Заключение.** Таким образом, использование разработанного метаустройства в пренатальной диагностике может способствовать снижению рисков термогенеза, уменьшению диэлектрических артефактов и повышению качества получаемых МР-изображений плода и экстрафетальных структур.

Ключевые слова: 3Т, метаустройство, пассивный шимминг, пренатальная диагностика.

Для цитирования: Боршевецкая А.А., Егорова В.С., Галяутдинова Л.Э., Пучнин В.М., Корешин Е.А., Калугина А.В., Мащенко И.А., Ефимцев А.Ю., Щелокова А.В., Труфанов Г.Е. Возможности высокопольной магнитно-резонансной томографии (3 Тесла) в визуализации плода с применением метаустройства. Трансляционная медицина. 2023;10(2):123-129. DOI: 10.18705/2311-4495-2023-10-2-123-129.

POSSIBILITIES OF HIGH-FIELD MAGNETIC RESONANCE IMAGING (3 T) IN FETAL VISUALIZATION USING META DEVICE

Anastasia A. Borshevetskaya¹, Veronika S. Egorova¹,
Lina E. Galyautdinova¹, Viktor M. Puchnin², Evgeniy A. Koreshin²,
Anna V. Kalugina², Irina A. Mashchenko¹, Alexander Yu. Efimtsev¹,
Alena V. Shchelokova², Gennady E. Trufanov¹

Corresponding author:

Anastasia A. Borshevetskaya,
Almazov National Medical Research Centre,
Akkuratova str., 2, Saint Petersburg, Russia,
197341.
E-mail: borshevetskaya@gmail.com

¹ Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia

² ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Received 29 December 2022; accepted
23 March 2023.

Abstract

Background. Fetal and extra fetal diagnostics is currently performed using 3 Tesla magnetic-resonance imaging scanners. Examination is more informative during the third trimester of pregnancy, when fetal movements are less significant. 3 Tesla MR-images demonstrate better characteristics than 1,5 Tesla ones, however, there is a risk of heating the patient during scanning, which is especially dangerous for pregnant women. **Objective.** The aim of the study is to improve fetal and extrafetal structures visualization by means of developed metamaterial pad (metadevice). **Design and methods.** In the study, a metadevice was considered to improve fetal and extrafetal imaging in a field with magnetic induction of 3 T. 12 pregnant women between 29 and 39 weeks gestation ($33,4 \pm 4,8$ weeks) were examined, standart magnetic resonance images of Single Shot Turbo (SST)/Fast Spin Echo(FSE)) were obtained. Standart abdomen coil was used to receive examination data. Metadevice and the coil were placed on the center of the examined area. The images were evaluated by radiologists on a 5-point Likert scale. **Results** of metadevice testing showed diagnostic quality improvement, increase in radio-frequency magnetic field homogeneity, decreased SAR value and reduction in body heating effect during MR-scanning. **Conclusion.** Metadevice-assisted MRI can lower heating risks, reduce dielectric artifacts and improve imaging quality of the fetus and extrafetal structures.

Key words: 3T, metadevice, passive shimming, prenatal imaging.

For citation: Borshevetskaya AA, Egorova VS, Galyautdinova LE, Puchnin VM, Koreshin EA, Kalugina AV, Mashchenko IA, Efimtsev AY, Shchelokova AV, Trufanov GE. Possibilities of high-field magnetic resonance imaging (3 T) in fetal visualization using meta device. Translyatsionnaya meditsina=Translational Medicine. 2023;10(2):123-129. (In Russ.) DOI: 10.18705/2311-4495-2023-10-2-123-129.

Введение

В настоящее время в клинической практике для пренатальной диагностики все чаще используются МР-томографы с силой индукции магнитного поля 3Тл [1, 2]. Это связывают с более высокой скоростью сбора данных, высоким отношением сигнал-шум и разрешением, а, следовательно, с лучшей тканевой контрастностью анатомических структур плода, по сравнению с МР-изображениями, получаемыми на томографах с индукцией магнитного поля 1,5 Тл.

Однако многие исследования показывают [3–5], что сканирование в сверхвысоком поле имеет ряд существенных недостатков. Среди них диэлектрический артефакт вследствие неоднородности В1 поля, который может значительно затруднять диагностическую визуализацию и высокий УКП (SAR), который потенциально увеличивает риск эффекта нагревания (термогенез) от радиочастотного импульса для пациентов.

Одним из существующих решений проблемы диэлектрических артефактов в настоящее время является

применение подкладок на основе суспензии керамических порошков (так называемый природный диэлектрик) в тяжеловодородной воде [6]. Токи смещения, возникающие в материале с высоким значением диэлектрической проницаемости, создают вторичное магнитное поле, которое позволяет скорректировать пространственные неоднородности основного радиочастотного магнитного поля, что улучшает качество получаемых МР изображений. Это перспективный способ улучшения сверхвысокопольной МР диагностики, в частности диагностики плода. Применение подобных подкладок описано в работе van Gemert и коллег [7]. В ней авторы исследовали влияние на РЧ поле МРТ подкладок из материала с высокой диэлектрической проницаемостью с помощью электромагнитного моделирования вблизи трех воксельных моделей беременных женщин.

Моделирование показало, что оптимизированные подкладки с высокой диэлектрической проницаемостью могут снизить уровень SAR у беременных на 3, 7 и 9 месяцах беременности, одновременно улучшая однородность поля передачи у плода. Однако описываемые в этой работе подкладки в реальности будут иметь довольно большой вес (3–4 кг), который может вызвать дискомфорт у беременных пациенток. Также подобные МР совместимые смеси с высокой диэлектрической проницаемостью, которые входят в состав подобных МРТ подкладок, могут быстро деградировать со временем и терять свои электромагнитные свойства.

Альтернативным и современным способом решения указанных проблем стала замена композитной смеси на керамической основе искусственным материалом нового поколения [8,9]. Такие метаустройства имеют маленький вес (вместе с чехлом — не более 100 г), неограниченный срок эксплуатации и низкую стоимость изготовления.

Цель

Цель исследования — улучшение визуализации плода и экстрафетальных структур на основе применения метаустройства.

Материалы и методы

Обследовано 12 беременных на сроке гестации от 29 до 39 недель ($33,4 \pm 4,8$ недель), которые подписали информированное согласие на участие в исследовании с прототипом МР-подкладки из искусственного диэлектрического метаматериала (метаустройства) для уменьшения диэлектрического артефакта по типу «стоячей волны» вследствие неоднородности В1 поля и коррекции эффекта нагрева от радиочастотного импульса.

Показаниями для МР-исследования были: пороки развития плода ($n = 4$), приращение плаценты ($n = 6$), объемные образования яичников ($n = 2$).

Исследование проводили на МР-томографе MAGNETOM Trio Siemens с индукцией магнитного поля 3Тл с метаустройством с количеством элементарных ячеек 15×15 , емкостью конденсаторов 30 пФ и общими размерами 30×30 см², разработанным специалистами ИТМО [9]. Метаустройство состоит из немагнитных материалов. При предварительном электродинамическом моделировании метаустройства было показано, что удельный коэффициент поглощения энергии электрического поля (SAR) не превышает допустимый нормативами СанПиН уровень, что подтвердило его безопасность для применения во время МР-исследований.

Для исследования использовали стандартную последовательность T2-взвешенного турбо-спинового эха (Single Shot Turbo (SST)/Fast Spin Echo(FSE)). Для приема данных использовали поверхностную абдоминальную приемную РЧ катушку. Метаустройство и радиочастотная катушка располагались строго по центру зоны исследования.

МР-исследование беременных проводилось с соблюдением всех правил безопасности и состояло из двух последовательных этапов:

1. Получение сравнимых МР-изображений:

а) последовательное получение T2 single shot/turbo spin echo ВИ в трех ортогональных плоскостях с применением сочетания метаустройства и абдоминальной РЧ катушки;

б) стандартизированное исследование зоны интереса с абдоминальной РЧ катушкой по показаниям.

Оценку и сравнение полученных T2 single shot/turbo spin echo ВИ в трех ортогональных плоскостях МР-изображений с применением и без использования метаустройства проверяли независимые специалисты в области лучевой диагностики с опытом работы до 5 лет (эксперт 1), от 5 до 10 лет (эксперт 2) и более 10 лет (эксперт 3).

Первая группа сопоставляемых МР-томограмм — это данные, полученные с помощью абдоминальной катушки, вторая группа — данные, полученные с помощью комбинации абдоминальной катушки и метаустройства, буквы «А», «Б», и «В» — соответствующие вопросы для оценки изображений.

Баллы, полученные по результатам оценки тремя экспертами, были усреднены, представлены в таблице 1.

Расчет количественных показателей SARwb для импульсных последовательностей выполняли специалисты ИТМО, совместно с врачами отделения лучевой диагностики, для каждого исследования.

Изображения оценивались рентгенологами по 5-балльной шкале Likert, где 1 — недостаточное качество; 2 — плохое качество; 3 — среднее качество; 4 — хорошее качество; 5 — отличное качество.

Каждый из респондентов оценивал по этой системе набор сравниваемых МР-изображений (полученных с помощью стандартного оборудования и метаустройства) для 12 беременных, и им были заданы следующие вопросы с вариантами ответов согласно шкале Likert:

А. Оцените общее диагностическое качество изображений: возможно ли использование данных изображений в клинической практике?

Б. Оцените качество изображений в отношении наличия/отсутствия диэлектрического артефакта.

В. Оцените качество детализации экстрафетальных структур и плода на изображениях.

Результаты

На полученных T2 single shot/turbo spin echo взвешенных изображениях в трех ортогональных плоскостях с использованием только абдоминальной РЧ катушки в зоне сканирования наблюдается диэлектрический артефакт в виде «стоячей волны» — зона снижения сигнала, которая ухудшает визуализацию органов плода и экстрафетальных структур. При сканировании с помощью комбинации абдоминальной катушки и метаустройства артефакт «стоячей волны» выражен меньше, и визуализация дифференцировки тканей плода и экстрафетальных структур более отчетливая (рис. 1–2).

По результатам оценки общего диагностического качества изображений от респондентов получены следующие данные (табл. 1).

Оценки независимых экспертов позволяют сделать общий вывод о том, что МР-томограммы, полученные с помощью метаустройства, представляют больше диагностической информации, чем

изображения, полученные стандартным (с использованием только абдоминальной катушки) методом — средняя оценка больше на 0,5 балла.

Что касается наличия/отсутствия диэлектрического артефакта, метаустройство также показало лучший результат. Диапазон оценок изображений, полученных с помощью только абдоминальной катушки, составил от 3 до 4 баллов, в случае с использованием метаустройства — от 4 до 5 баллов. Таким образом, применение метаустройства позволяет повысить однородность радиочастотного магнитного поля, за счет перераспределения электромагнитного поля в пространстве.

Таким образом, качество визуализации плода и экстрафетальных структур значительно выше на МР-томограммах с применением метаустройства.

Кроме того, по результатам расчета специалистами ИТМО параметра SARwb получены следующие данные: у беременных на сроке 29–30 недель с помощью метаустройства не произошло увеличения SARwb (параметр не превысил допустимые для исследования беременных 1,75 Вт/кг). При этом у беременных на сроке 38–39 недель с использованием абдоминальной катушки и метаустройства параметр SARwb был равен 1,625 Вт/кг, что соответствует безопасному для исследования беременных значению и нагреву тканей пациента менее чем на 2 °С. С помощью метаустройства зафиксировано уменьшение параметра SARwb на 7 % по данным исследований беременных.

Обсуждение

С увеличением силы индукции магнитного поля МРТ уменьшается длина волны радиочастотного излучения, измеренная в теле человека (для поля 3 Тл — порядка 26 см), которая становится сопоставима с размерами брюшной полости,

Таблица 1. Итоговые значения оценки сравниваемых изображений респондентами

Table 1. The final values of the assessment of the compared images by the respondents

Эксперт	Абдоминальная катушка			Абдоминальная катушка + метаустройство		
	А	Б	В	А	Б	В
Эксперт 1	4,25	3,83	3,75	4,75	4,83	4,91
Эксперт 2	4,16	3,75	3,66	4,66	4,75	4,91
Эксперт 3	4,41	3,91	3,66	4,91	4,83	4,91
Среднее	4,27	3,83	3,69	4,77	4,8	4,91

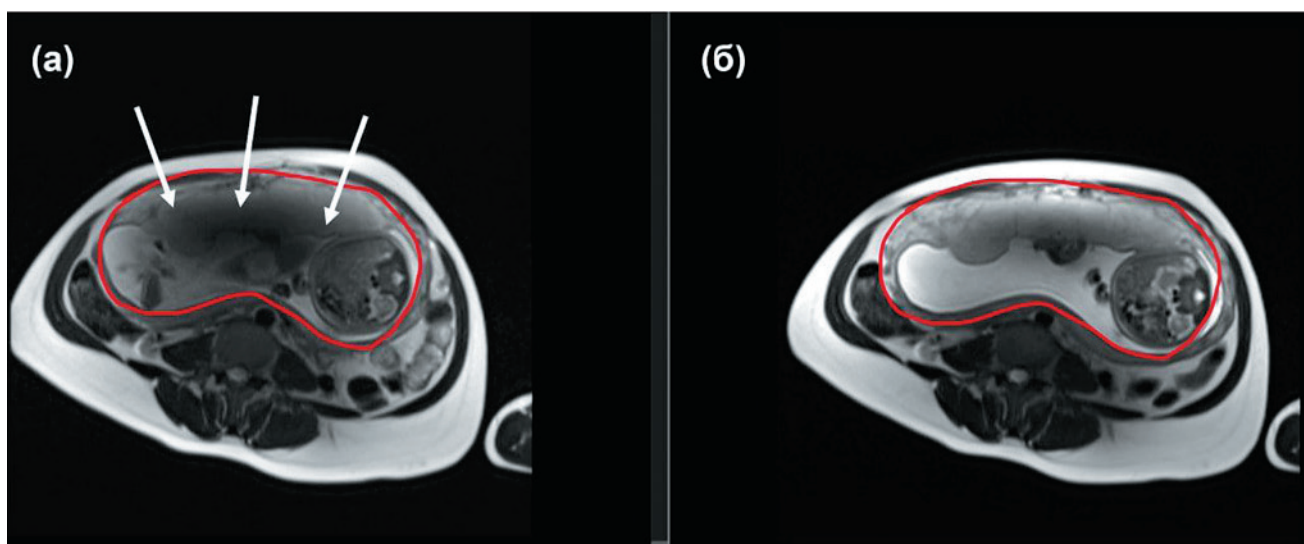


Рис. 1. МРТ беременной со сроком 29–30 недель:

а) с абдоминальной радиочастотной катушкой; б) с применением абдоминальной радиочастотной катушки и метаустройства, в аксиальной плоскости. Белыми стрелками показан артефакт «стоячей волны». Диэлектрический артефакт затрудняет визуализацию контуров плодовой поверхности плаценты, распределения амниотической жидкости, дифференцировки тканей плода.

Figure 1. MRI of a pregnant woman aged 29–30 weeks

(a) with an abdominal radiofrequency coil, (b) with an abdominal radiofrequency coil and a metadvice, in the axial plane. The white arrows show the “standing wave” artifact. The dielectric artifact makes it difficult to visualize the contours of the fetal surface of the placenta, the distribution of amniotic fluid, and the differentiation of fetal tissues.

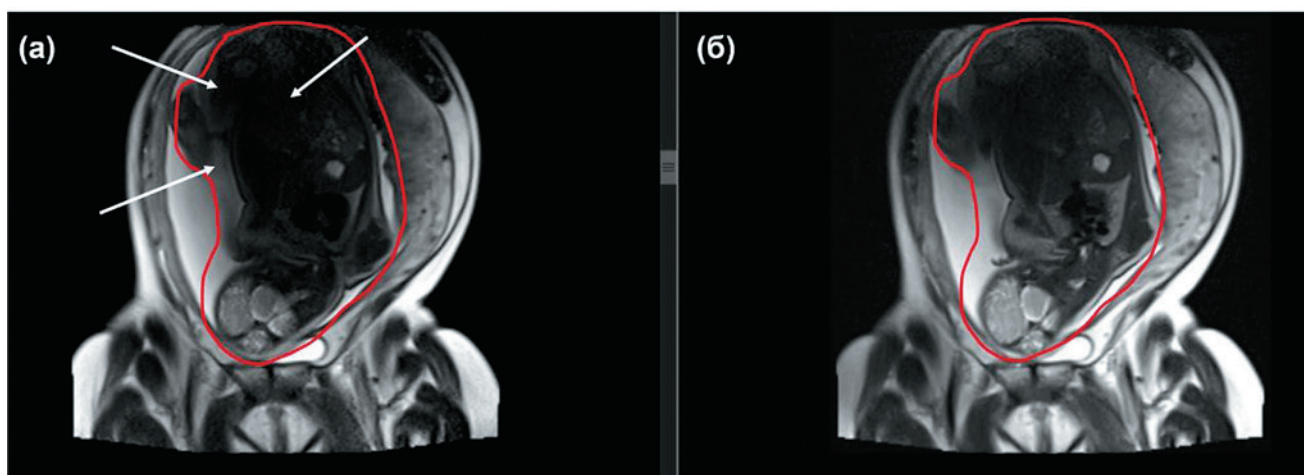


Рис. 2. МРТ беременной со сроком 38–39 недель:

а) с абдоминальной радиочастотной катушкой; б) с применением абдоминальной радиочастотной катушки и метаустройства, во фронтальной плоскости. Красным цветом обозначена область исследования — плод. Белыми стрелками показан артефакт «стоячей волны». Диэлектрический артефакт затрудняет визуализацию структур плода.

Figure 2. MRI of a pregnant woman aged 38–39 weeks

(a) with an abdominal radiofrequency coil, (b) with an abdominal radiofrequency coil and a metadvice, in the frontal plane. The red color indicates the area of study — the fetus. The white arrows show the standing wave artifact. The dielectric artifact makes it difficult to visualize fetal structures.

а именно: с областью расположения плода. Из-за этого возникает деструктивная интерференция радиочастотных волн, которая дает неоднородности в магнитном поле непосредственно в области исследования. Как следствие, возникают широкие темные полосы в области исследования на МР-изображениях, которые значительно снижают качество изображения и затрудняют интерпретацию полученных данных.

В рамках данного исследования применяли альтернативный подход к разработке подкладки для сверхвысокопольной МРТ для улучшения качества визуализации плода и экстрафетальных структур. Используемое метаустройство представляло из себя матрицу, содержащую металлические крестообразные элементы, соединенные между собой конденсаторами. Принцип работы заключался в перераспределении РЧ поля вблизи пациента, что позволило бороться с проблемой появления артефактов на МР-изображениях у людей с большим индексом массы тела (ИМТ), в том числе у пациентов во время беременности. С помощью такого подхода можно избавиться от проблемы диэлектрических артефактов, ухудшающей диагностическую визуализацию у пациентов с большим весом, и недолговечности существующих МРТ подкладок из материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. Подкладка на основе метаповерхности (метаустройство) вместе с чехлом весила не более 100 граммов, и ее срок годности намного дольше, чем у диэлектрических подкладок.

Заключение

Полученные данные оценки сравниваемых МР-томограмм позволяют сделать вывод о том, что использование разработанного метаустройства в пренатальной диагностике может способствовать повышению качества визуализации плода и экстрафетальных структур за счет уменьшения диэлектрических артефактов, с применением стандартных для исследования беременных импульсных последовательностей. Кроме того, исследование с использованием метаустройства остается безопасным для беременной и плода, так как допустимое значение удельного коэффициента поглощения электромагнитной энергии телом человека (УКП, SAR_{wb}) для беременных соответствует допустимым значениям и способствует снижению риска термогенеза.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии потенциально-го конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и Высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-592). / This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 075-15-2021-592).

Список литературы / References

1. Moltoni G, Talenti G, Righini A. Brain fetal neuroradiology: a beginner's guide. *Transl Pediatr.* 2021; 10(4):1065–1077. DOI: 10.21037/tp-20-293.
2. 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.
3. Cai X, Chen X, Sun C, et al. Fetal MR Imaging: An Overview. *MAGNETOM Flash.* 2018; 2(71):87–98.
4. Machado-Rivas F, Jaimes C, Kirsch JE, et al. Image-quality optimization and artifact reduction in fetal magnetic resonance imaging. *Pediatr Radiol.* 2020; 50(13):1830–1838. DOI: 10.1007/s00247-020-04672-7.
5. Lum M, Tsiouris AJ. MRI safety considerations during pregnancy. *Clin Imaging.* 2020; 62:69–75. DOI: 10.1016/j.clinimag.2020.02.007.
6. de Heer P, Brink WM, Kooij BJ, et al. Increasing signal homogeneity and image quality in abdominal imaging at 3 T with very high permittivity materials. *Magn Reson Med.* 2012; 68(4):1317–1324. DOI: 10.1002/mrm.24438.
7. van Gemert J, Brink W, Remis R, et al. A simulation study on the effect of optimized high permittivity materials on fetal imaging at 3T. *Magn Reson Med.* 2019; 82(5):1822–1831. DOI: 10.1002/mrm.27849.
8. Vorobyev V, Shchelokova A, Efimtcev A, et al. Improving B1+ homogeneity in abdominal imaging at 3 T with light, flexible, and compact metasurface. *Magn Reson Med.* 2022; 87(1):496–508. DOI: 10.1002/mrm.28946.
9. Kalugina, A., Puchnin, V., Koreshin, E., Efimtcev, A., Mashchenko, I., Brink, W., & Shchelokova, A. (2022). Improving fetal MRI at 3T with compact metasurface-based pad. In *Magnetic Resonance and its Applications. Spinus-2022* (pp. 86-88).

Информация об авторах:

Боршевецкая Анастасия Александровна, ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования, ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Егорова Вероника Сергеевна, ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования, ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Галаяутдинова Лина Эриковна, ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования, ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Пучнин Виктор Михайлович, аспирант физического факультета, инженер, Университет ИТМО;

Корешин Евгений Алексеевич, аспирант физического факультета, инженер, Университет ИТМО;

Калугина Анна Владимировна, магистрант факультета технологического менеджмента и инноваций, Университет ИТМО;

Машченко Ирина Александровна, к.м.н., доцент кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской группы лучевых методов исследования в перинатологии и педиатрии, ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Ефимцев Александр Юрьевич, д.м.н., доцент кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования, ведущий научный сотрудник НИЛ лучевой визуализации, ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Щелокова Алена Вадимовна, к.ф.-м.н., научный сотрудник физико-технического мегафакультета, Университет ИТМО;

Труфанов Геннадий Евгеньевич, д.м.н., профессор, главный научный сотрудник НИО лучевой диагностики, заведующий кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования, ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России.

Author information:

Anastasia A. Borshevetskaya, Resident, Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with Clinic, Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Centre;

Veronika S. Egorova, Resident, Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with Clinic, Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Centre;

Lina E. Galyautdinova, Resident, Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with Clinic, Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Centre;

Viktor M. Puchnin, PhD student, Faculty of Physics, engineer, ITMO University;

Evgeniy A. Koreshin, PhD student, Faculty of Physics, engineer, ITMO University;

Anna V. Kalugina, Master student, Faculty of Technology Management and Innovation, ITMO University;

Irina A. Mashchenko, MD, Associate Professor, Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with a clinic, Institute of Medical Education, Leading Researcher, Research Group of Radiation Methods in Perinatology and Pediatrics, Almazov National Medical Research Centre;

Aleksandr Yu. Efimtsev, D.M.Sc., Associate Professor, Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with Clinic, Institute of Medical Education, Leading Researcher, Research Laboratory of Radiation Imaging, Almazov National Medical Research Centre;

Alena V. Shchelokova, PhD, Assistant Professor, Faculty of Physics, ITMO University;

Gennady E. Trufanov, D.M.Sc., Professor, Chief Researcher of the Research Institute of Radiation Diagnostics, Head of the Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with Clinic, Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Centre.