

М.В. Лукин<sup>1</sup>, Е.А. Бруй<sup>2</sup>, А.Г. Левчук<sup>1</sup>, А.А. Боршевецкая<sup>1</sup>, В.А. Фокин<sup>1</sup>, В.М. Пучнин<sup>2</sup>,  
А.В. Щелокова<sup>2</sup>, Н.А. Анохина<sup>1</sup>, Л.Э. Галаятдинова<sup>1</sup>, В.С. Егорова<sup>1</sup>, К.С. Анпилогова<sup>1</sup>

## ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ КИСТИ

<sup>1</sup> Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Минздрава России, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, физико-технический мегафакультет, Санкт-Петербург

Контактное лицо: К.С. Анпилогова, e-mail: kristina-anp@mail.ru

### РЕФЕРАТ

**Цель исследования:** Определение диагностических возможностей специализированного метаустройства, предназначенного для выявления магнитно-резонансных признаков патологических изменений кистей рук (в том числе ранних), у больных ревматоидным артритом.

**Материал и методы:** В исследовании было рассмотрено магнитно-резонансное метаустройство для исследования кистей с магнитной индукцией 1,5 Тл. Обследовано 26 человек, 10 из которых было выполнено исследование с применением стандартной катушки для исследования коленного сустава и 16 – с помощью метаустройства, получены магнитно-резонансные изображения T<sub>1</sub>-ВИ, T<sub>2</sub>-ВИ, PD FS-ВИ. Изображения оценивались рентгенологами по 5-балльной шкале Likert.

**Результаты:** Изображения, полученные с использованием метаустройства, характеризовались приемлемыми и сопоставимыми абсолютными и относительными значениями соотношения сигнал/шум с изображениями, полученными с использованием стандартной катушки при одинаковом пространственном разрешении и при уменьшении входной мощности в среднем в 18 раз при магнитной индукции 1,5 Тл. По критериям качества изображения в отношении наличия/отсутствия артефактов средняя оценка для метаустройства (4,33) была несколько выше оценки для специализированной катушки (4,25). Меньшая оценка стандартной катушки, в том числе относительно артефактов, говорит о более низкой восприимчивости метаустройства к различным факторам, обуславливающим возникновение артефактов на МР-томограммах.

**Обсуждение:** Анализ собранных оценок независимых экспертов свидетельствует о том, что диагностические характеристики магнитно-резонансных изображений кисти, полученных с помощью метаустройства на основе проводов (для 1,5 Тл), – хорошего и среднего уровня, причем они сравнимы, а также превосходят по всем критериям стандартные подходы.

**Выводы/Заключение:** Проведенная оценка качества полученных изображений демонстрирует приемлемое качество визуализации и отражает возможность их применения в клинической практике, принимая во внимание проводящиеся доработки и оптимизацию всего набора импульсных последовательностей для МРТ кисти.

**Ключевые слова:** магнитно-резонансная томография, ревматоидный артрит, специализированное метаустройство, кисть руки

**Для цитирования:** Лукин М.В., Бруй Е.А., Левчук А.Г., Боршевецкая А.А., Фокин В.А., Пучнин В.М., Щелокова А.В., Анохина Н.А., Галаятдинова Л.Э., Егорова В.С., Анпилогова К.С. Инновационный подход к магнитно-резонансной томографии кисти // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 3. С. 46–51. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-3-46-51

M.V. Lukin<sup>1</sup>, E.A. Brui<sup>2</sup>, A.G. Levchuk<sup>1</sup>, A.A. Borshevetskaya<sup>1</sup>, V.A. Fokin<sup>1</sup>, V.M. Puchnin<sup>2</sup>,  
A.V. Shchelokova<sup>2</sup>, N.A. Anokhina<sup>1</sup>, L.E. Galyautdinova<sup>1</sup>, V.S. Egorova<sup>1</sup>, K.S. Anpilogova<sup>1</sup>

## An Innovative Approach to Magnetic Resonance Imaging of the Wrist

<sup>1</sup> V.A. Almazov National Medical Research Centre, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> National Research University IFMO, Faculty of Physics and Technology, St. Petersburg, Russia

Contact person: K.S. Anpilogova, e-mail: kristina-anp@mail.ru

### ABSTRACT

**Purpose:** Determination of the diagnostic capabilities of a specialized metadvice designed to detect magnetic resonance signs of pathological changes in the hands (including early ones) in patients with rheumatoid arthritis.

**Material and methods:** The study considered a metadvice for imaging of hands with magnetic induction 1.5 T. 26 people were examined, 10 of whom were studied using a standard coil for examining the knee joint and 16 using a metadvice, magnetic resonance images T<sub>1</sub>-VI, T<sub>2</sub>-VI, PD FS-VI were obtained. The images were evaluated by radiologists on a 5-point scale Likert.

**Results:** The images acquired using the metadvice had acceptable and peer-reviewed absolute and relative signal-to-noise ratios with images obtained using a standard pattern at the same resolution deviation and measuring input power at an average of 18 times for 1.5 T. In terms of image quality criteria for the presence/absence of arthritis, the average score for the metadvice (4.33) is slightly higher than the score for the specialized coil (4.25). The lower score of the standard coil, including on the issue of artifacts, indicates a lower susceptibility of the metadvice to various factors that give artifacts on MRI.

**Discussion:** The analysis of the collected assessments of independent experts indicates that the diagnostic characteristics of magnetic resonance images of the hand obtained using wire-based metadvice (for 1.5 T) are of good and average levels, and are comparable, and also surpass the standard approaches in all criteria.

**Conclusions/Conclusion:** The assessment of the quality of the obtained images demonstrates the acceptable quality of imaging and reflects the possibility of their application in clinical practice, taking into account ongoing improvements and optimization of the entire set of pulse sequences for MRI of the hand.

**Keywords:** *magnetic resonance imaging, rheumatoid arthritis, specialized metadvice, hands*

**For citation:** Lukin MV, Brui EA, Levchuk AG, Borshevetskaya AA, Fokin VA, Puchnin VM, Shchelokova AV, Anokhina NA, Galyautdinova LE, Egorova VS, Anpilogova KS. An Innovative Approach to Magnetic Resonance Imaging of the Wrist. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2023;68(3):46–51. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-3-46-51

### Введение.

По данным официальной статистики, приведенной в клинических рекомендациях «Ревматоидный артрит» (утв. Министерством здравоохранения РФ, 2021 г. 18.10.2021) [1], в 2017 г. в России зарегистрировано более 300 тыс. пациентов с ревматоидным артритом (РА), в то время как по данным Российского эпидемиологического исследования, РА страдает около 0,6 % от общей популяции. Соотношение женщин к мужчинам – 3:1. Заболевание встречается во всех возрастных группах, но пик заболеваемости приходится на наиболее трудоспособный возраст – 40–55 лет.

Характерным для РА считается симметричное полиартикулярное воспаление пястно-фаланговых и проксимальных межфаланговых суставов кистей, лучезапястных суставов. В ряде случаев на ранних стадиях преобладает поражение плюснефаланговых или крупных суставов.

Основным методом инструментальной диагностики РА является рентгенография суставов, однако наибольшей информативностью она обладает только при 3-ей и 4-ой стадиях поражения суставов (по Штейнброкеру), что затрудняет раннюю постановку диагноза и назначение лечения.

Ультразвуковая диагностика используется как дополнительный метод визуализации и динамического мониторинга активности заболевания.

Компьютерная томография в рутинной практике не используется для диагностики ревматоидного артрита. Однако разработаны и стандартизированы протоколы описания конусно-лучевой компьютерной томографии [2] для пациентов с развернутой и поздней стадиями РА.

Современным неинвазивным и безопасным методом диагностики на ранних стадиях заболевания является магнитно-резонансная томография (МРТ). Кроме того, данные МРТ используются для балльной оценки активности заболевания и его прогрессирования, помогая определить прогноз и дальнейшую тактику лечения.

Среди всех современных методов медицинской визуализации кистей МРТ характеризуется наиболее высокой чувствительностью в выявлении воспалительного и деструктивного процесса в суставах [3]. Основной импульсной последовательностью, позволяющей визуализировать патологические изменения, является  $T_1$ -ВИ, в т.ч., с внутривенным контрастным усилением, а PD FS (изображения протонной плотности с жироподавлением),  $T_1$ -FS-ВИ и  $T_2$ -ВИ и др. используются для получения дополнительной клинически значимой информации о характеристиках патологических изменений. Это позволяет проводить дифференциальную диагностику различных ревматических артропатий, включающих псориатический, подагрический артриты, системную красную волчанку, болезнь Крейна, болезнь Де Кервена и др., оценивать активность заболевания и определять дальнейший прогноз.

Однако, по мнению ряда экспертов, говорить о широком внедрении МРТ в качестве основного инструментального метода диагностики пока рано [4]. Главным препятствием к этому является сложность метода и ограниченная доступность к современным высокопольным МР-томографам, оснащенным специальными локальными катушками для кисти. Способ выполнения

исследования заключается в укладке пациента на живот и помещении кисти в специальную катушку, подключенную к МР-томографу. К сожалению, в настоящее время не во всех клиниках, проводящих МР-исследование, присутствуют такие катушки, и одной из причин является их высокая первоначальная стоимость и стоимость постоянного обслуживания из-за хрупкости ключевых элементов. Поэтому достаточно часто для получения МР-изображений кисти используют катушки для исследования коленных суставов или гибкие катушки. Главное условие качественно выполненного исследования – ровная ось положения дистального отдела верхней конечности. Однако помимо специфической укладки, кроме артефактов от движения, также могут возникать артефакты от неоптимального подавления сигналов от жира, артефакты от металла, радиочастотного шума, фазового кодирования и химического сдвига. Конечно, за счет усовершенствованных за последние годы технологий, в том числе параллельного сбора данных, обеспечивающих одновременно высокое пространственное разрешение и быстрое сканирование, вышеуказанные проблемы могут быть решены. Однако оснащенность таким современным оборудованием лечебно-профилактических учреждений страны остается крайне низкой, особенно в регионах. Таким образом, несмотря на очевидные преимущества МРТ в диагностике ревматологических заболеваний, включающих исследование кисти, есть множество направлений изучения и усовершенствования данной методики.

В последние годы активно исследуется возможность применения ряда новых радиочастотных (РЧ) устройств, основанных на материалах с высокой диэлектрической проницаемостью [5–7], либо на метаматериалах на основе проводов [4, 8, 9], для улучшения качества МРТ изображений. Такие устройства используются для повышения отношения сигнал/шум от области интереса за счет фокусировки в ней радиочастотного магнитного поля встроенной в корпус томографа приемно-передающей РЧ-катушки типа «птичья клетка». Как правило, подобные устройства не содержат электронных компонентов, недороги в производстве и могут быть использованы с большинством клинических МР-томографов. Поскольку такие устройства не требуют подключения к РЧ-блоку томографа, не возникает необходимости в изменении программного обеспечения, а отсутствие кабеля снимает ряд ограничений на их расположение относительно пациента.

Применительно к визуализации лучезапястного сустава было предложено использовать подкладки под кисть, выполненные в виде диэлектрических блоков [10] либо двумерных структур из проводов [4, 9], а также объемный резонатор, представляющий собой массив разомкнутых кольцевых резонаторов [11, 12]. Объемный резонатор был всесторонне исследован для полей 1,5 и 3,0 Тл как численно, так и экспериментально, и на текущий момент обладает наилучшими характеристиками среди предложенных альтернативных РЧ-устройств для сканирования кистей и лучезапястных суставов. Кроме того, было показано, что в поле 1,5 Тл это устройство помогает получить до 40 % более высокое отношение сигнал-шум при использовании клинических последовательностей для визуализации лучезапястного сустава

[13] по сравнению со стандартной приемо-передающей катушкой для конечностей. При этом способность устройства фокусировать РЧ-электромагнитное поле в своем внутреннем объеме позволяет значительно снизить радиочастотную нагрузку на тело пациента, что дает возможность применения оптимизированных высокоселективных импульсных последовательностей [14]. Эти свойства делают данное устройство привлекательной альтернативой существующим приемо-передающим катушкам для конечностей, которые ввиду своей универсальности часто используются в многопрофильных клиниках для визуализации различных суставов конечностей. Однако перед переходом к клиническому использованию нового РЧ-устройства, помимо оценки технических характеристик изображений, необходимо провести оценку диагностического их качества.

Таким образом метаустройство и возможное с их помощью прицельное исследование кисти и кистевого сустава потенциально могут повысить диагностическую точность исследования, в особенности для последовательностей с толщиной среза 1,0–1,5 мм. Однако вначале необходимо провести клиническую апробацию non-inferiority study для определения диагностической точности процедуры для базовой последовательности при проведении МРТ кисти с использованием метаустройства.

**Цель исследования**

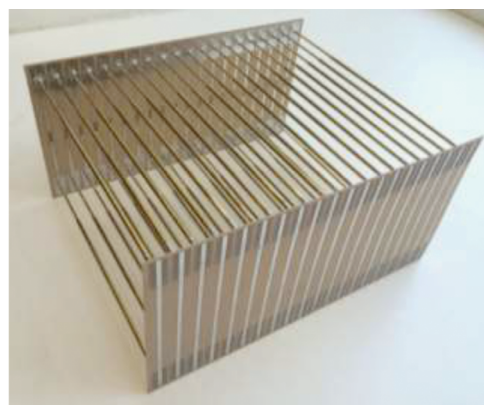
Определение диагностических возможностей метаустройства, предназначенного для выявления МР-признаков воспалительных и дегенеративных заболеваний кисти.

Нулевая гипотеза: диагностическое качество МР-изображений, полученных стандартным методом и с помощью метаустройства, сохраняется.

**Материал и методы**

В данной работе было использовано объемное метаустройство (рис. 1), состоящее из 20 разомкнутых кольцевых резонаторов. Каждый из резонаторов состоит из двух параллельных латунных проводов (длина  $L = 262$  мм), находящихся на расстоянии  $b = 100$  мм друг от друга. Концы проводов соединены в цепь через плоскопараллельные конденсаторы (медные полоски, напечатанные на обеих сторонах диэлектрической подложки Arlon 25N). Разомкнутые кольцевые резонаторы располагаются с шагом 12 мм и формируют массив (рис. 1 а). Настройка резонансной частоты устройства на ларморову частоту прецессии протонов молекул воды в поле 1,5 Тл (63,8 МГц) производилась при помощи подбора площади перекрытия полосков ( $2,65 \times 55,33$  мм<sup>2</sup>), то есть за счет изменения емкости конденсаторов. Такая конструкция позволяет создавать равномерное радиочастотное магнитное поле во всем внутреннем объеме устройства ( $100 \times 262 \times 244$  мм<sup>3</sup>), направленное вдоль оси структуры. При сканировании пациента метаустройство располагалось таким образом, чтобы создаваемое им РЧ магнитное поле было направлено перпендикулярно оси магнита. По этой причине сканирование пациентов проводилось в позиции лежа на животе с рукой, вытянутой вперед и полусогнутой в локте, что позволяло поместить кисть в центр метаустройства (рис. 1 б).

В ходе исследования возможностей метаустройств для выполнения исследований кисти и кистевого сустава на МР-томографах с индукцией магнитного поля 1,5 Тл, двумя опытными врачами-рентгенологами отделения МРТ НМИЦ им. В.А. Алмазова МЗ РФ со стажем работы не менее 12 лет была проведена оценка качества



а



б

Рис. 1. Общий вид метаустройства на основе кольцевых резонаторов (а). Демонстрация метаустройства в сборке (в пластиковом корпусе) с укладкой пациента для исследования кисти и кистевого сустава (б). Кисть позиционирована внутри метаустройства ладонью вниз  
 Fig. 1. General view of the meta-device based on ring resonators (a). Demonstration of the assembled meta-device (in a plastic case) with patient positioning for examination of the hand and wrist joint (b). The hand is positioned inside the meta-device, palm down

и клинической ценности получаемых с помощью них МР-изображений.

Проведение настоящего исследования было одобрено локальным этическим комитетом НМИЦ им. В.А. Алмазова (выписка № 300614 от 10.02.2021).

Основной задачей было сравнить диагностическое качество МР-изображений кистей и кистевых суставов, полученных с помощью стандартного оборудования и с помощью метаустройства. Всего было обследовано 16 пациентов с диагнозом ревматоидного артрита и 10 здоровых добровольцев (возраст от 23 до 65 лет). Были получены T<sub>1</sub>-ВИ и T<sub>2</sub>-ВИ (турбо спин-эхо), PD-fs-ВИ (изображения «протонной плотности») с подавлением сигнала от жировой ткани в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Параметры использованных импульсных последовательностей представлены в табл. 1.

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 набор парных исследований (полученных с помощью стандартного оборудования и метаустройства) для исследуемых 1–26, 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?



Таблица 1

Параметры использованных импульсных последовательностей  
Parameters of the used pulse sequences

ИП \ Показатель	TR	TE	FoV	FA	Матрица, мм	Воксел, мм
T <sub>1</sub> -Vibe	18,6	7,31	97×120	10	320×218	0,38×0,38×0,5
PD_tse_fs_cor	3000	41	148×220	150	320×173	0,68×0,68×2,5
PD_tse_fs_tra	7000	34	96×129	150	256×192	0,25×0,25×4
PD_tse_fs_sag	5120	33	163×180	150	256×174	0,35×0,35×3
T <sub>1</sub> -tse_cor	718	15	200×220	150	320×234	0,68×0,68×3

- Б. Оцените качество изображений в отношении наличия/отсутствия артефактов?
- В. Оцените качество детализации структур костной ткани кисти на изображениях?
- Г. Оцените качество детализации структур хрящевой ткани суставов кисти на изображениях?

Всего было исследовано 26 чел., 10 из которых было выполнено исследование с применением стандартной катушки для исследования коленного сустава и 16 – с помощью метаустройства с использованием 4 критериев (вопросы А, Б, В и Г). Баллы, полученные по результатам оценки двумя экспертами, были усреднены. Дополнительно был введен критерий S – суммарный усредненный балл.

Данные были распределены непараметрически, поэтому представлены в виде медианы (интерквартильный размах). Данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Медиана и квартили  
Median and quartiles

	A1	B1	B1	Г1	A2	B2	B2	Г2	S1	S2
0,25	1,33	1,33	1,33	1,67	3,00	3,33	3,00	3,33	1,58	3,17
медиана	4,33	4,00	4,67	4,00	4,67	4,33	4,33	4,33	4,25	4,33
0,75	4,67	4,17	4,67	4,33	4,67	4,42	4,42	4,67	4,42	4,60

Распределение исследований по группам включало буквенные и числовые обозначения, где 1-ая группа – это данные, полученные с помощью стандартной катушки, 2-ая группа – данные, полученные с помощью метаустройства, буквы А, Б, В и Г – соответствующие вопросы для оценки изображений. Сравнительный статистический анализ проведен между группами А1-А2, Б1-Б2, В1-В2, Г1-Г2, S1-S2 с помощью критерия Вилкоксона для парных сравнений. Уровень значимости  $\alpha=0,05$ . Значение *p* скорректировано с помощью поправки на множественность Холма (*p-values*cor). Проверяться нулевая гипотеза ( $H_0$ ) об отсутствии различий в группах против альтернативной ( $H_1$ ) о существовании различий в группах. Характеристика групп представлена в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика сравниваемых групп  
Characteristics of the compared groups

Группы сравнения	<i>p</i> -value	Гипотеза
A1-A2	0,059	$H_0$
B1-B2	0,176	$H_0$
B1-B2	0,071	$H_0$
Г1-Г2	0,037	$H_0$
S1-S2	0,047	$H_0$

При уровне значимости  $\alpha=0,05$  принимается нулевая гипотеза об отсутствии различий в группах.

**Результаты и обсуждение**

Изображения, полученные с использованием метаустройства, характеризовались приемлемыми и сопоставимыми абсолютными и относительными значениями соотношения сигнал/шум с изображениями, полученными с использованием стандартной катушки при одинаковом пространственном разрешении и при уменьшении входной мощности в среднем в 18 раз для 1,5 Тл. Визуальные сходство и отличия представлены на рис. 3 и 4.

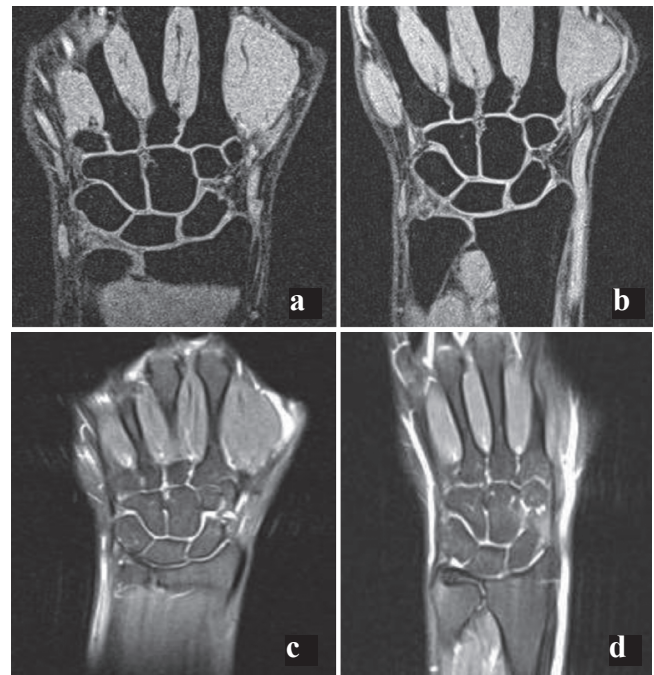


Рис. 3. МР-изображения кистей двух здоровых добровольцев, полученные на томографе 1,5 Тл со специализированной 4-канальной катушкой для коленного сустава (а, с) и разработанным метаустройством (b, d) – T<sub>1</sub>-градиентное эхо (T<sub>1</sub>-Vibe) (а, b) и T<sub>2</sub>-ВИ (с, d)

Fig. 3. MR images of the hands of two healthy volunteers obtained on a 1.5T MR scanner with a special 4-channel coil for the knee joint (a, c) and the developed metadvice (b, d) – T<sub>1</sub>-gradient echo pulse sequences (T<sub>1</sub>-Vibe) (a, b) and T<sub>2</sub>-WI (c, d)

Анализ собранных оценок независимых экспертов позволяет сделать общий вывод о том, что диагностические характеристики МР-изображений кистей, полученных с помощью метаустройства на основе проводов (для 1,5 Тл), – хорошего и среднего уровня, и сравнимы по всем критериям с изображениями, получаемыми с помощью стандартных импульсных последовательностей (рис. 3 и 4 МР-изображения кистей). В частности, работа метаустройства для выборки из 10 здоровых добровольцев и 16 пациентов с ревматоидным артритом по диагностике качества изображений (вопросы А, Б, Г) получила средние оценки от 4,33 до 4,67, а специализированная 4-канальная катушка для коленных суставов – от 4,00 до 4,67. Среднее значение баллов для коленной катушки было выше, чем для метаустройства только для вопроса В (4,67), остальные были ниже. При этом по суммарной оценке – 4,33 (диапазон оценок 1–5) для метаустройства, 4,25 (диапазон оценок 4–5) – для специализированной 4-канальной катушки для коленных суставов.

Метаустройство на основе проводов получило по всем вопросам более высокую оценку, чем традицион-

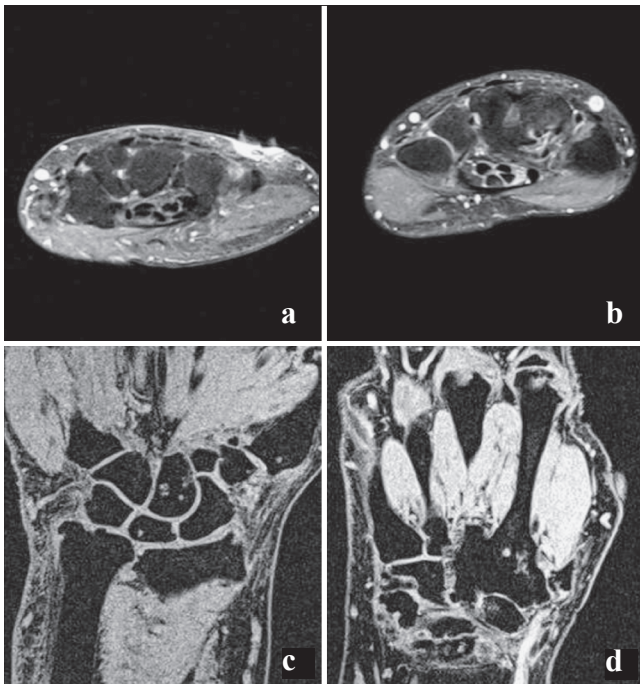


Рис. 4. МР изображения (T<sub>1</sub>-ВИ) двух пациентов с диагнозом ревматоидного артрита, полученные на томографе 1,5 Тл со специализированной 4-канальной катушкой для коленного сустава (а, с) и разработанным метаустройством (b, d) – PD-fs (а, b) и T<sub>1</sub>-градиентное эхо (Vibe) (с, d)

Fig. 4. MR images (T<sub>1</sub>-WI) of two patients diagnosed with rheumatoid arthritis obtained on a 1.5T MR scanner with a special 4-channel coil for the knee joint (a, c) and a metadvice (b, d) – PD-fs (a, b) and T<sub>1</sub>-gradient echo pulse sequences (T<sub>1</sub>-Vibe) (c, d)

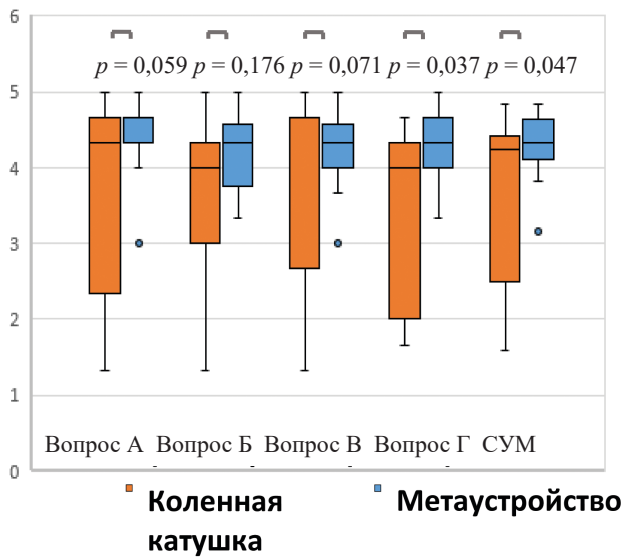


Рис. 5. Оценки качества МР-изображений по вопросам А, Б, В, Г (оранж. – МР-томограф, синий – метаустройство)

Fig. 5. Quality stores of MR images on the issues А, Б, В, Г (orang – MR scanner, blue – metadvice)

ный подход. Прежде всего, это касается вопроса об использовании изображений в клинической практике, который характеризовал общее диагностическое качество изображений – в случае с метаустройством средняя оценка была больше, чем 0,1 балла. При этом поле обзора изображений, полученных с метаустройством, было больше, чем для специализированной катушки, что связано с т.н. краевыми артефактами (потеря сигнала по краям приемо-передающей катушки), которые отсутствовали при использовании метаустройства. Учитывая данный

факт, за одинаковое время сканирования можно получить больше информации, что особенно актуально при исследовании такой небольшой области тела как кисть.

По критериям качества изображения в отношении наличия/отсутствия артефактов средняя оценка для метаустройства (4,33) несколько выше оценки для специализированной катушки для исследования коленного сустава (4,25). Меньшая оценка стандартной катушки по вопросу Б об артефактах говорит о более низкой восприимчивости метаустройства к различным факторам, обуславливающим артефакты на МР-томограммах. Однако следует учесть, что на некоторых изображениях со стандартной катушкой присутствовали артефакты от движения, что могло незначительно повлиять на решение независимых экспертов.

Отдельно следует остановиться на качестве визуализации костной и хрящевой ткани кисти. Меньшая чувствительность метаустройства к артефактам позволила получить более высокое соотношение сигнал/шум на T<sub>1</sub>-ВИ (GRE – градиентное эхо) и, как следствие, более высокое разрешение, что в свою очередь дало возможность более точно оценить структуру хрящевой ткани. При этом значимой разницы на PD-fs (изображения протонной плотности с жироподавлением) между специализированной катушкой и метаустройством выявлено не было.

Явным преимуществом метаустройства можно считать визуализацию структур исследуемой области в пределах всего поля обзора, в то время как при использовании стандартной катушки для коленного сустава имеет место потеря сигнала по краям поля обзора.

К недостаткам метаустройства можно отнести пространственную неоднородность РЧ-поля в области интереса. Однако эту проблему можно решить использованием специализированных РЧ-импульсов с варьируемой несущей частотой и амплитудой, корректирующей неоднородность РЧ-поля. Такие импульсы с успехом применяются в сверхвысокопольной МРТ, которой изначально присуща неоднородность возбуждающего РЧ-поля.

Ограничения работы: субоптимальная настройка последовательности для метаустройства из-за отсутствия исследовательского доступа к МР-оборудованию для оптимизации настроек импульсных последовательностей при использовании метаустройства. Отсутствие многоканальных приемных элементов для разработанной конфигурации метаустройства. Сравнение диагностического качества изображений было проведено только на группах здоровых добровольцев и пациентов с ревматоидным артритом.

**Заключение**

Проведенная оценка качества полученных изображений демонстрирует сравнимое качество визуализации и отражает возможность их применения в клинической практике, принимая во внимание проводящиеся доработки и оптимизацию всего набора импульсных последовательностей для МРТ кисти. Метаустройство позволяет существенно снизить РЧ-нагрузку, что открывает возможности в перспективном расширении допустимых показаний к проведению исследования МРТ, особенно для детей, и сокращению продолжительности сканирования. Кроме этого, учитывая низкую оснащенность специализированными катушками для исследования кистей большей части МРТ-диагностических подразделений РФ, метаустройства могут стать хорошей альтернативой как для исследований по показаниям, так и для скрининговых исследований, с учетом высокой информативности МРТ в выявлении патологий мягкотканых и хрящевых структур мелких суставов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ревматоидный артрит: Клинические рекомендации. М.: Министерство здравоохранения РФ, 2021.
2. Макарова Д.В., Кушнир К.В. Стандартизированный протокол описания результатов конусно-лучевой компьютерной томографии кисти при ревматоидном артрите // Клиническая медицина. 2015. Т.7, № 4. С. 135-140. doi: 10.17691/stm2015.7.4.18.
3. Østergaard M., Boesen M. Imaging in Rheumatoid Arthritis: the Role of Magnetic Resonance Imaging and Computed Tomography // La Radiologia Medica. 2019. No. 124. P. 1128–1141. <https://doi.org/10.1007/s11547-019-01014-y>.
4. Webb A.G. Dielectric Materials in Magnetic Resonance // Concepts in Magnetic Resonance. Part A. 2011. V.38A. No. 4. P. 148–184.
5. Shchelokova A., Ivanov V., Mikhailovskaya A., et al. Ceramic Resonators for Targeted Clinical Magnetic Resonance Imaging of the Breast // Nature Communications. 2020. V.11, No. 1. P. 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17598-3>.
6. Rupprecht S., Sica C.T., Chen W., et al. Improvements of Transmit Efficiency and Receive Sensitivity with Ultrahigh Dielectric Constant (uHDC) Ceramics at 1.5 T and 3 T // Magnetic Resonance in Medicine. 2018. V.79, No. 5. P. 2842–2851. <https://doi.org/10.1002/mrm.26943>.
7. Radu X., Dardenne X., Craeye C. Experimental Results and Discussion of Imaging with a Wire Medium for MRI Imaging Applications // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2007. P. 5499-5502.
8. Motovilova E., Sandeep S., Hashimoto M., et al. Watertunable Highly Sub-Wavelength Spiral Resonator for Magnetic Field Enhancement of MRI Coils at 1.5 T // IEEE Access. 2019. No. 7. P. 90304–90315.
9. Schmidt R., Slobozhanyuk A., Belov P., et al. Flexible and Compact Hybrid Metasurfaces for Enhanced Ultra High Field in Vivo Magnetic Resonance Imaging // Scientific Reports. 2017. V.7, No. 1. P. 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01932-9>.
10. Zivkovic I., Teeuwisse W., Slobozhanyuk A., et al. High Permittivity Ceramics Improve the Transmit Field and Receive Efficiency of a Commercial Extremity Coil at 1.5 Tesla // Journal of Magnetic Resonance. 2019. No. 299. P. 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2018.12.013>.
11. Shchelokova A.V., Slobozhanyuk A.P., Bruinc P., et al. Experimental Investigation of a Metasurface Resonator for in Vivo Imaging at 1.5 T // Journal of Magnetic Resonance. 2018. No. 286. P. 78-81.
12. Brui E.A., Shchelokova A.V., Zubkov M., et al. Adjustable Subwavelength Metasurface-Inspired Resonator for Magnetic Resonance Imaging // Physica Status Solidi (a). 2018. V.215, No. 5. P. 1700788.
13. Shchelokova A.V., van den Berg C.A., Dobrykh D.A., et al. Volumetric Wireless Coil Based on Periodically Coupled Split-Loop Resonators for Clinical Wrist Imaging // Magnetic Resonance in Medicine. 2018. V.80, No. 4. P. 1726–1737.
14. Nasonov A., Tikhonov P., Shchelokova A. et al. Assessing Safety and Transceive Performance of a Body Coil Combined with a Volumetric Wireless Coil for Wrist MRI at 3 T // Applied Magnetic Resonance. 2022. V.53, No. 12. P. 1597-1607. <https://doi.org/10.1007/s00723-022-01502-x>.
15. Brui E., Mikhailovskaya A., Solomakha G., et al. Volumetric Wireless Coil for Wrist MRI at 1.5 T as a Practical Alternative to Tx/Rx Extremity Coil: a Comparative Study // Journal of Magnetic Resonance. 2022. No. 339. P. 107209.
16. Brui E.A., Rapacchi S., Bendahan D., et al. Comparative Analysis of SINC-Shaped and SLR Pulses Performance for Contiguous Multi-Slice Fast Spin-Echo Imaging Using Metamaterial-Based MRI // Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine. 2021. V.34, No. 6. P. 929–938. <https://doi.org/10.1007/s10334-021-00937-w>.

## REFERENCE

1. *Ревматоидный артрит* = Rheumatoid Arthritis. Clinical Recommendations. Moscow Publ., 2021. (In Russ.).
2. Makarova D.V., Kushnir K.V. Standardized Protocol for Describing the Results of Cone-Beam Computed Tomography of the Hand in Rheumatoid Arthritis. *Клиническая Медицина* = Clinical Medicine. 2015;7;4:135-140. doi: 10.17691/stm2015.7.4.18 (In Russ.).
3. Østergaard M., Boesen M. Imaging in Rheumatoid Arthritis: the Role of Magnetic Resonance Imaging and Computed Tomography. *La Radiologia Medica*. 2019;124:1128–1141. <https://doi.org/10.1007/s11547-019-01014-y>.
4. Webb A.G. Dielectric Materials in Magnetic Resonance. *Concepts in Magnetic Resonance. Part A*. 2011;38A;4:148–184.
5. Shchelokova A., Ivanov V., Mikhailovskaya A., et al. Ceramic Resonators for Targeted Clinical Magnetic Resonance Imaging of the Breast. *Nature Communications*. 2020;11;1:1-7. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17598-3>.
6. Rupprecht S., Sica C.T., Chen W., et al. Improvements of Transmit Efficiency and Receive Sensitivity with Ultrahigh Dielectric Constant (uHDC) Ceramics at 1.5 T and 3 T. *Magnetic Resonance in Medicine*. 2018;79;5:2842–2851. <https://doi.org/10.1002/mrm.26943>.
7. Radu X., Dardenne X., Craeye C. Experimental Results and Discussion of Imaging with a Wire Medium for MRI Imaging Applications. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. 2007. P. 5499-5502.
8. Motovilova E., Sandeep S., Hashimoto M., et al. Watertunable Highly Sub-Wavelength Spiral Resonator for Magnetic Field Enhancement of MRI Coils at 1.5 T. *IEEE Access*. 2019;7:90304–90315.
9. Schmidt R., Slobozhanyuk A., Belov P., et al. Flexible and Compact Hybrid Metasurfaces for Enhanced Ultra High Field in Vivo Magnetic Resonance Imaging. *Scientific Reports*. 2017;7;1:1-7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01932-9>.
10. Zivkovic I., Teeuwisse W., Slobozhanyuk A., et al. High Permittivity Ceramics Improve the Transmit Field and Receive Efficiency of a Commercial Extremity Coil at 1.5 Tesla. *Journal of Magnetic Resonance*. 2019;299:59-65. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2018.12.013>.
11. Shchelokova A.V., Slobozhanyuk A.P., Bruinc P., et al. Experimental Investigation of a Metasurface Resonator for in Vivo Imaging at 1.5 T. *Journal of Magnetic Resonance*. 2018;286:78-81.
12. Brui E.A., Shchelokova A.V., Zubkov M., et al. Adjustable Subwavelength Metasurface-Inspired Resonator for Magnetic Resonance Imaging. *Physica Status Solidi (a)*. 2018;215;5:1700788.
13. Shchelokova A.V., van den Berg C.A., Dobrykh D.A., et al. Volumetric Wireless Coil Based on Periodically Coupled Split-Loop Resonators for Clinical Wrist Imaging. *Magnetic Resonance in Medicine*. 2018;80;4:1726–1737.
14. Nasonov A., Tikhonov P., Shchelokova A. et al. Assessing Safety and Transceive Performance of a Body Coil Combined with a Volumetric Wireless Coil for Wrist MRI at 3 T. *Applied Magnetic Resonance*. 2022;53;12:1597-1607. <https://doi.org/10.1007/s00723-022-01502-x>.
15. Brui E., Mikhailovskaya A., Solomakha G., et al. Volumetric Wireless Coil for Wrist MRI at 1.5 T as a Practical Alternative to Tx/Rx Extremity Coil: a Comparative Study. *Journal of Magnetic Resonance*. 2022;339:107209.
16. Brui E.A., Rapacchi S., Bendahan D., et al. Comparative Analysis of SINC-Shaped and SLR Pulses Performance for Contiguous Multi-Slice Fast Spin-Echo Imaging Using Metamaterial-Based MRI. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*. 2021;34;6:929–938. <https://doi.org/10.1007/s10334-021-00937-w>.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и Высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-592).

**Участие авторов.** Статья подготовлена с равным участием авторов.

**Поступила:** 20.01.2022. **Принята к публикации:** 25.02.2023.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Financing.** The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-15-2021-592).

**Contribution.** Article was prepared with equal participation of the authors.

**Article received:** 20.01.2022. **Accepted for publication:** 25.02.2023.