

К.С. Анпилогова<sup>1</sup>, В.М. Пучнин<sup>2</sup>, Г.Е. Труфанов<sup>1</sup>, А.Ю. Ефимцев<sup>1</sup>, В.А. Фокин<sup>1</sup>,  
А.В. Щелокова<sup>2</sup>, А.Е. Андрейченко<sup>2,3</sup>, Т.М. Бобровская<sup>3</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА МРТ МОЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗ С ПОМОЩЬЮ ИННОВАЦИОННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ КАТУШЕК

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

<sup>2</sup>Университет ИТМО, Физико-технический мегафакультет, Санкт-Петербург

<sup>3</sup>ГБУЗ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий  
Департамента здравоохранения города Москвы, Москва

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

### РЕФЕРАТ

**Цель:** Определение диагностических возможностей метаустройств, предназначенных для магнитно-резонансного исследования молочных желез у женщин.

**Материал и методы.** В исследовании было рассмотрено два типа метаустройств для исследования молочных желез – для визуализации в поле с магнитной катушкой 3 Тл и 1,5 Тл. Обследовано 11 здоровых женщин репродуктивного возраста, получены магнитно-резонансные изображения T<sub>1</sub>-ВИ (турбо спин-эхо) и T<sub>1</sub>-ВИ 3D градиентное эхо (GRE) на основе метода Диксона с подавлением сигнала от жировой ткани. Изображения оценивались рентгенологами по 5-бальной шкале Likert.

**Результаты.** Изображения, полученные с использованием метаустройств, 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 27 раз для 3,0 Тл. При этом для 1,5 Тл входная мощность была снижена в 15,6 раз, а соотношение сигнал/шум – увеличено в 2 раза. По критериям качества изображения в отношении наличия/отсутствия артефактов средняя оценка для метаустройства выше оценки для специализированной катушки на 3 Тл. Для 1,5 Тл данный параметр оказался одинаковым, что связано с более низким уровнем артефактов на 1,5 Тл, чем на 3 Тл в целом.

**Обсуждение.** Анализ собранных оценок независимых экспертов свидетельствует о том, что диагностические характеристики магнитно-резонансных изображений молочных желез, полученных с помощью метаустройств на основе керамики (для 3 Тл) и на основе проводов (для 1,5 Тл), – хорошего и среднего уровня, и сравнимы по всем критериям со стандартными подходами.

**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 молочных желез.

**Ключевые слова:** магнитно-резонансная томография, МР-маммография, метаустройство

**Для цитирования:** Анпилогова К.С., Пучнин В.М., Труфанов Г.Е., Ефимцев А.Ю., Фокин В.А., Щелокова А.В., Андрейченко А.Е., Бобровская Т.М. Исследование диагностического качества МРТ молочных желез с помощью инновационных беспроводных катушек // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 5. С. 69–74. DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-5-69-74

## Investigation of the Diagnostic Quality of Breast MRI Using Innovative Wireless Coils

K.S. Anpilogova<sup>1</sup>, V.M. Puchnin<sup>2</sup>, G.E. Trufanov<sup>1</sup>, A.Yu. Efimtsev<sup>1</sup>, V.A. Fokin<sup>1</sup>, A.V. Shchelokova<sup>2</sup>,  
A.E. Andreichenko<sup>2,3</sup>, T.M. Bobrovskaya<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies  
of the Department of Health of Moscow, Russia

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

### ABSTRACT

**Purpose** Determination of the diagnostic capabilities of metadevices for breast MR examination in women.

**Material and methods** In the study, two types of metadevices for examining the mammary glands were considered – for imaging in a field with magnetic induction of 3 T and 1.5 T. 11 healthy women of reproductive age were examined, magnetic resonance images of T<sub>1</sub> (turbo spin echo) and T<sub>1</sub> 3D gradient echo (GRE) were obtained based on the Dixon method with fat saturation. The images were evaluated by radiologists on a 5-point Likert scale.

**Results** The images obtained using the metadevices were characterized by acceptable and comparable absolute and relative signal-to-noise ratios comparing them to images obtained using a standard coil at the same spatial resolution and with a decrease in input power by an average of 27 times for 3.0 T. At the same time, for 1.5 T, the input power was reduced by a factor of 15.6, and the signal-to-noise ratio was increased by a factor of 2. For image quality criteria in terms of presence/absence of artifacts, the average score for the metadevice was higher than the score for the specialized coil by 3 T. For 1.5 T, this parameter turned out to be the same, which was probably associated with a lower level of artifacts by 1.5 T than by 3 T in general.

**Discussion** Analysis of the collected assessments of independent experts indicates that the diagnostic characteristics of magnetic resonance images of the mammary glands obtained using ceramic-based (for 3 T) and wire-based (for 1.5 T) metadevices are of a good and average level, and are comparable in terms of all criteria with standard approaches.

**Conclusions** 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 mammary glands.

**Keywords:** magnetic resonance imaging, MR mammography, metadevice, image quality

**For citation:** Anpilogova KS, Puchnin VM, Trufanov GE, Efimtsev AY, Fokin VA, Shchelokova AV, Andreichenko AE, Bobrovskaya TM. Investigation of the Diagnostic Quality of Breast MRI Using Innovative Wireless Coils. Medical Radiology and Radiation Safety. 2022;67(5):69-74. DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-5-69-74

## Введение

По данным федеральной службы государственной статистики, в 2020 г. заболеваемость женщин раком молочной железы (РМЖ) составила 74,5 тыс. человек. Данный показатель вырос более чем в 1,5 раза с 2005 г. (почти 22%), когда заболевание было диагностировано у 49,5 тыс. пациенток [1]. РМЖ занимает первое место в структуре онкологических заболеваний у женщин и продолжает требовать от врачей особого внимания к этой проблеме.

Основным методом скрининга РМЖ является рентгеновская маммография [2], однако на фоне различных инфильтративных, рубцовых изменений, на фоне плотной ткани молочной железы с помощью данного метода не удается обнаружить до 40% пальпируемых злокачественных образований [3]. Ультразвуковая диагностика является в свою очередь оператор-зависимым методом и имеет определенные ограничения на фоне жировой инволюции, а также в выявлении мультицентричности, мультифокальности и билатеральности процесса, протоковой распространенности опухоли [3]. Современным неинвазивным и безопасным методом диагностики злокачественных новообразований молочных желез, представляющим наибольший интерес в настоящее время, является магнитно-резонансная томография (МРТ).

Среди всех современных методов медицинской визуализации молочных желез МРТ характеризуется наиболее высокой чувствительностью в выявлении РМЖ. Основной импульсной последовательностью, позволяющей визуализировать патологические изменения, является T<sub>1</sub>-ВИ [4] (в т.ч. с динамическим контрастным усилением), а T<sub>2</sub>-ВИ, быстрые импульсные последовательности, диффузионно-взвешенные изображения (ДВИ) и др. используются для получения дополнительной клинически значимой информации о характеристиках патологических изменений. Это позволяет дифференцировать доброкачественные и злокачественные патологические образования молочной железы. В современных публикациях говорится о том, что магнитно-резонансная (МР) маммография может внести значимый вклад в улучшение результатов хирургического лечения рака молочной железы [5]. Здесь важно отметить, что у пациенток, получавших неоадьювантную химиотерапию, МРТ используется для отслеживания динамики ответа.

Однако на сегодняшний день убедительные доказательства влияния МР-диагностики на отдаленные результаты лечения отсутствуют. Расширение показаний для скрининга также становится актуальным вопросом в свете того, что МРТ позволяет выявить РМЖ на более ранних стадиях, чем маммография, у всех женщин [6]. Поэтому непрерывно продолжается поиск технологий для снижения затрат на МР-скрининг [7]. Одним из эффективных подходов в этом вопросе является использование сокращенных протоколов, которые применяются в некоторых странах уже на протяжении последних лет [8]. Однако, по мнению ряда экспертов, говорить о широком внедрении МРТ в качестве метода скрининга пока рано [9]. Главным препятствием к этому является сложность метода и ограниченная доступность к современным высокопольным МР томографам, оснащенным специальными локальными катушками для молочных желез [10]. Способ выполнения исследования заключается в укладке пациентки на живот и помещении молочных желез по отдельности в углубления катушки, подключенной к МР-томографу [11].

К сожалению, в настоящее время не во всех клиниках, проводящих МР-исследования, присутствуют данные катушки, и одной из причин является их высокая первоначальная стоимость и стоимость постоянного обслужива-

ния из-за хрупкости ключевых элементов. Другим ограничением метода является длительность процедуры, из-за чего у пациенток возникает дискомфорт, сопровождающийся произвольными движениями, и увеличивается вероятность получения артефактов от движения на МР-изображениях [12]. Кроме так называемых «двигательных» артефактов, которые появляются на МР изображениях от сердечной деятельности и дыхания, также могут возникать артефакты от неоптимального подавления 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 РМЖ, есть множество направлений изучения и усовершенствования данной методики.

Инновационным подходом к МРТ молочных желез является предложенная недавно концепция беспроводного приема-передачи МР-сигнала с помощью метаустройств [13–15]. Метаустройства предлагают решение многих изложенных выше проблем, имеющих место при использовании современных коммерческих катушек. Принцип работы таких устройств основан на индуктивной (беспроводной) связи с внешней катушкой-источником, в качестве таковой предложено использовать катушку для всего тела, встроенную в любой аппарат МРТ. Было экспериментально продемонстрировано, что метаустройства эффективно фокусируют возбуждение и прием МР-сигнала внутри своей рабочей области в двух самых диагностически-ценных типах МР-томографов (1,5 и 3 Тесла). При этом обычно подверженные возбуждению МР сигнала ткани вне рабочей области катушек почти не дают вклад в общий собираемый МР сигнал, и соответственно, нивелируют вклад артефактов от физиологических движений пациенток.

Таким образом, беспроводной принцип работы метаустройств облегчает их использование при укладке пациентки перед проведением исследования. Данные устройства не содержат в себе чувствительную электронику и, следовательно, они значительно дешевле и доступнее по сравнению со специализированными локальными коммерческими катушками. Кроме того, с использованием метаустройств повышается радиочастотная безопасность исследования (более чем в 4 раза), что не только отражается положительно на безопасности для пациенток, но и позволяет ускорять и/или повышать диагностическую ценность собираемых МР-сигналов в особенности у последовательностей, обладающих потенциалом дифференциальной диагностики [16–19].

Таким образом, метаустройства и возможная с их помощью целевая МР-маммография потенциально могут повысить диагностическую точность исследования, в особенности для последовательностей дифференциальной диагностики. Однако, вначале необходимо провести клиническую апробацию (non-inferiority study) для определения диагностической точности процедуры для базовой последовательности при проведении МР-маммографии с использованием метаустройств.

Цель исследования – определение диагностических возможностей метаустройств, предназначенных для магнитно-резонансного исследования молочных желез у женщин.

### Материал и методы

Метаустройства (или устройства на основе метаматериалов) представляют собой резонансные структуры с субволновой периодичностью, состоящие из элементарных ячеек с заданной геометрией, за счет чего является возможным управлять распределением ближнего электромагнитного поля в пространстве, в том числе внутри аппарата МРТ. Принцип работы данных устройств основан на индуктивной связи с радиочастотной приемо-передающей катушкой для тела, которая является частью большинства клинических МР томографов, что позволяет улучшить эффективность, радиочастотную безопасность и чувствительность приема последней.

В данном исследовании были рассмотрены метаустройства двух типов для унилатерального и билатерального исследования молочных желез. Первое метаустройство для МР-визуализации в поле с магнитной индукцией 3 Тл состояло из керамических колец с высоким значением диэлектрической проницаемости. В частности, для унилатерального исследования использовалась беспроводная катушка, состоящая из пяти керамических колец с диэлектрической проницаемостью порядка 1000 и низкой проводимостью, со следующими размерами: внутренний диаметр 101,5 мм, внешний 124,4 мм и высота 20 мм [13]. Вес метаустройства был равен 2,45 кг. Для билатерального исследования использовалась пара метаустройств, каждое из которых состояло из четырех керамических колец с диэлектрической проницаемостью 870 и размерами: внутренний диаметр 126 мм, внешний диаметр 149 мм и высота 28,5 мм [14]. Расстояние между центрами резонаторов составляло 160 мм, данное расстояние считается анатомически подходящим для большинства женщин. Метаустройства помещались внутри корпуса, разработанного с учетом распределения нагрузок женского тела.

Для сохранения эффективности работы метаустройства вблизи тела человека был добавлен металлический экран из алюминиевой фольги толщиной 14 мкм, такая толщина позволяет избежать искажения градиентных магнитных полей. Алюминиевая фольга закреплялась на прямоугольной пластине из оргстекла с двумя круглыми отверстиями (с диаметром, равным внешнему диаметру керамических колец). Пластина из оргстекла с покрытием из фольги закреплялась на верхней поверхности корпуса так, чтобы не было зазора между ней и верхними керамическими кольцами. Общий вид конструкции беспроводной катушки представлен на рис. 1.

Метаустройство для визуализации в поле 1,5 Тл состояло из 10 разомкнутых кольцевых тонкопроволочных резонаторов прямоугольной формы. Каждый такой резонатор представ-

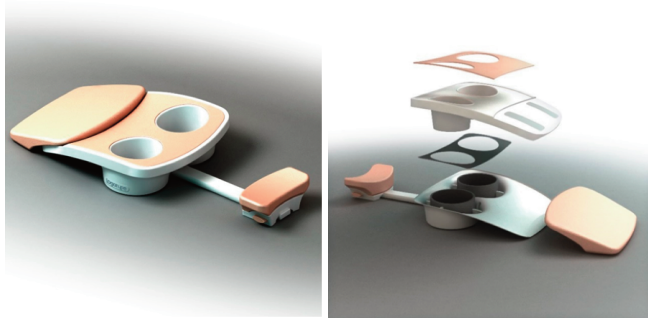


Рис. 1. Общий вид корпуса для метаустройства на основе керамических колец (слева) в сборке, и (справа) демонстрация его отдельных составных элементов (сверху вниз): подушка для грудной клетки, пластиковый каркас, металлический экран, керамические кольца, пластиковая основа  
Fig. 1. General view of the housing for a metadvice based on ceramic rings (left) in the assembly, and (right) demonstration of its individual components (top to bottom): chest pillow, plastic frame, metal screen, ceramic rings, plastic base

ляет собой две параллельные телескопические латунные трубки радиусом 3 мм, на концах которых находятся плоско-параллельные конденсаторы, представляющие собой параллельные металлические медные полоски, напечатанные с двух сторон печатных плат (размерами 9×69 мм для унилатерального устройства и 9×64 мм для билатерального), размещенные на внутренней стороне двух печатных плат из диэлектрика (размерами 164×114×1 мм для унилатерального устройства и 135×114×0,76 мм для билатерального). Метаустройство было размещено внутри пластикового корпуса для изоляции металлических полосок от тела человека и обеспечения жесткости конструкции при эксплуатации. Беспроводная катушка для билатерального исследования молочных желез в поле 1,5 Тл (без корпуса) представлена на рис. 2.



Рис. 2. Фотография метаустройства для исследования молочных желез на МР-томографе с индукцией магнитного поля 1,5 Тл.  
Fig. 2. Photograph of a metadvice for examining the mammary glands on an MR scanner with 1.5 T magnetic field strength.

В ходе исследования возможностей метаустройств для выполнения исследований молочных желез на МР-томографах с силой индукции магнитного поля 1,5 Тл и 3,0 Тл, опытными рентгенологами отделения МРТ НМИЦ имени В.А. Алмазова МЗ РФ со стажем работы не менее 12 лет была проведена оценка качества и клинической ценности получаемых с помощью них МР-изображений.

Проведение настоящего исследования было одобрено локальным этическим комитетом ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» (выписка № 300720 от 07.20.2020г).

Основной задачей было сравнить диагностическое качество МР изображений молочных желез, полученных с помощью стандартного оборудования и с помощью метаустройств. Всего было обследовано 10 здоровых женщин репродуктивного возраста (от 20 до 40 лет). Были получены T<sub>1</sub>-ВИ (турбо спин-эхо) и T<sub>1</sub>-ВИ 3D градиентное эхо (GRE) на основе метода Диксона (Dixon) с подавлением сигнала от жировой ткани в коронарной плоскости. Параметры для 3,0 Тл: FA=15°, TR/TE<sub>1</sub>/TE<sub>2</sub>= 7,8/2,4/3,7 мс, размер матрицы=640×380×208, размеры воксела=0.7×0.7×0.6 мм. Параметры для 1,5 Тл: FA=12, TR/TE=10.5/4.8 мс, размер воксела= 1×1×1 мм, размер матрицы=352×282, размер визуализируемой области=359×288 мм.

Изображения оценивались рентгенологами по 5-бальной 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 добровольцев 1–10, 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 артефактов?

В. Оцените качество детализации структур молочных желез на изображениях?

Всего были проанализированы данные для 11 пациентов, каждой из которых было выполнено по два исследования (1 – со стандартной катушкой, 2 – с метаустройством) с использованием 3 критериев (вопросы А, Б и В). 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: медиана (интерквартильный размах). Данные представлены в табл. 1.

Сравнительный статистический анализ проведен между группами А1–А2, Б1–Б2, В1–В2, S1–S2 с помощью критерия Вилкоксона для парных сравнений (Табл. 2). Уровень значимости  $\alpha=0,05$ . Значение  $p$  скорректировано с помощью поправки на множественность Холма ( $p$ -values<sub>adj</sub>). Проверилась нулевая гипотеза ( $H_0$ ) об отсутствии различий в группах против альтернативной ( $H_1$ ) о существовании различий в группах.

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

**Результаты и обсуждение**

Изображения, полученные с использованием метаустройств, 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 27 раз для 3,0 Тл. При этом для 1,5 Тл входная мощность была снижена в 59 раз для конфигурации на рис. 4. и в 26 раз для конфигурации на рис. 5., а соотношение сигнал/шум – увеличено в 2 раза. Визуальные сходства и отличия представлены на рис. 3 – 5.

Таблица 1

Медиана и квартили  
Median and quartiles

	А1	Б1	В1	А2	Б2	В2	S1	S2
0,25	4,00	3,75	4,00	3,50	3,75	3,50	3,75	3,67
медиана	4,50	4,00	4,00	3,50	4,00	4,00	4,17	3,83
0,75	5,00	4,25	5,00	4,00	4,50	4,00	4,58	4,17

Таблица 2

Характеристика сравниваемых групп  
Characteristics of the compared groups

Группы сравнения	$p$ -критерий	Гипотеза
А1-А2	0,065	$H_0$
Б1-Б2	0,257	$H_0$
В1-В2	0,065	$H_0$
S1-S2	0,065	$H_0$

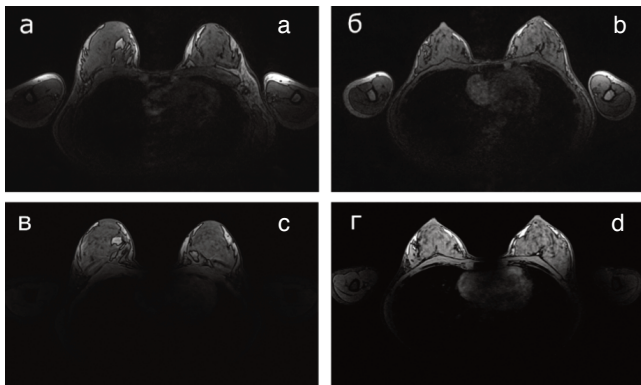


Рис. 3. МР-изображения двух здоровых добровольцев, полученные на томографе 3 Тл со специализированной 16-канальной катушкой для молочных желез (а, б) и разработанными диэлектрическими резонаторами (в, г).  
Fig. 3. MR images of two healthy volunteers obtained on a 3 T MR scanner with a specialized 16-channel coil for the mammary glands (a, b) and developed dielectric resonators (c, d).

Анализ собранных оценок независимых экспертов позволил сделать общий вывод, что диагностические характеристики МР-изображений молочных желез, полученных с помощью метаустройств на основе керамики (для 3 Тл) и на основе проводов (для 1,5 Тл), – хорошего и среднего уровня, и сравнимы по всем критериям со стандартными подходами (рис 6 и 7 соответственно). В частности, работа метаустройства для 3 Тл МРТ для выборки из 7 здоровых добровольцев по общей диагностике качества изображений (вопрос А) получило среднюю оценку 3,8 (диапазон оценок 3–5), а специализированная 16-канальная катушка для молочных желез – 4,7 (диапазон оценок 4–5).

Для МР-томографа с силой индукции магнитного поля 1,5 Тл метаустройство на основе проводов получило более низкую оценку по вопросу А, чем традиционный подход (3,5). Причиной меньшей оценки метаустройства явилась недостаточная визуализация латеральных зон молочной железы и подмышечных областей за счет использования металлического экрана, что особенно вы-

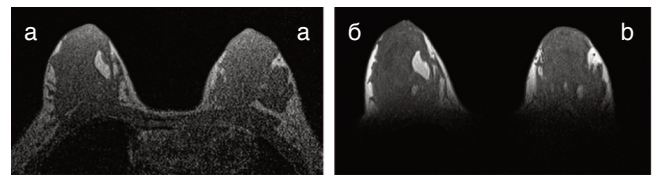


Рис. 4. МР изображения (T1-ВИ) двух здоровых добровольцев, полученные на томографе 1,5 Тл с поверхностной катушкой для тела (а) и разработанным метаустройством (б)  
Fig. 4. MR images (T1-w) of two healthy volunteers obtained on a 1.5 T MR scanner with a surface coil for the body (a) and developed metadvice (b)

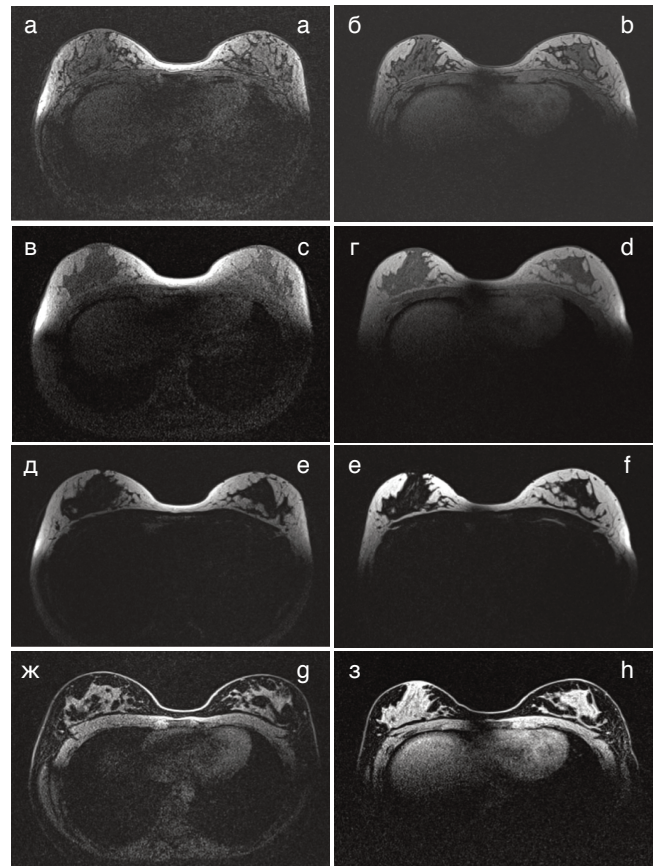


Рис. 5. МР-изображения двух здоровых добровольцев, полученные на томографе 1,5 Тл (импульсная последовательность с технологией «Диксон») с поверхностной катушкой для тела (а, в, д, ж) и разработанным метаустройством (б, г, е, з)  
Fig. 5. MR images of two healthy volunteers obtained on a 1.5 T MR scanner (Dixon-based pulse sequence) with a surface coil for the body (a, c, e, g) and developed metadvice (b, d, f, h)

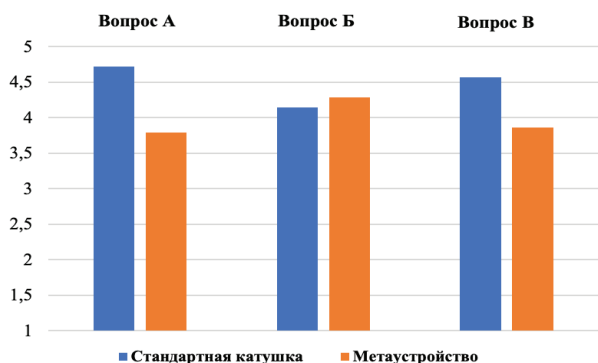


Рис. 6. Сравнительный анализ оценок метаустройства (ответы на вопросы А, Б, В) для МР-томографа с силой индукции магнитного поля 3 Тл

Fig. 6. Comparative analysis of metadvice estimates (answers to questions A, B, C) for an MR scanner with 3 T magnetic field strength.

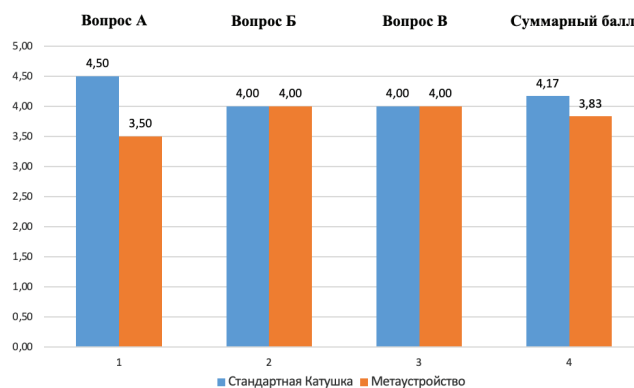


Рис. 7. Сравнительный анализ оценок метаустройства (ответы на вопросы А, Б, В, суммарный балл)

для МР-томографа с силой индукции магнитного поля 1,5 Тл  
Fig. 7. Comparative analysis of metadvice estimates (answers to questions A, B, C) for an MR scanner with 1,5 T magnetic field strength

ражено на 1,5 Тл. Для МР-томографов 1,5 Тл может быть рассмотрена возможность неиспользования металлического экрана, так как даже в этом случае радиочастотная безопасность остается выше в 3 раза, чем при использовании обычной катушки.

По критериям качества изображения в отношении наличия/отсутствия артефактов средняя оценка для метаустройства (4,3) несколько выше оценки для специализированной катушки (4,1) на 3 Тл, что связано с минимизацией сигнала от соседних органов, например, сердца, за счет локализации радиочастотного магнитного поля непосредственно в области молочной железы. Для 1,5 Тл данный параметр оказался одинаковым, что связано с более низким уровнем артефактов на 1,5 Тл, чем на 3 Тл в целом, а также что не весь набор применяемых в клинической практике импульсных последовательностей был исследован на данном этапе проекта, некоторые из которых более чувствительны к артефактам.

Отсутствие сигнала от средостения и большей части тела, попадающей в проекцию поля обзора, является скорее достоинством, нежели недостатком, поскольку позволит снизить степень выраженности артефактов от сокращений сердца и тока крови по магистральным сосудам, в том числе легких. Однако недостаточная визуализация подмышечной области требует усовершенствования метаустройств. Недостатком метаустройства является пространственная неоднородность РЧ магнитного поля в области интереса. Данную проблему можно решить использованием специализированных РЧ импульсов с варьированной несущей частотой и амплитудой, корректирующих неоднородность РЧ поля. Такие импульсы с успехом применяются

в сверхвысокопольной МРТ, которой изначально присуща неоднородность возбуждающего РЧ магнитного поля.

Ограничение работы: субоптимальная настройка последовательности для метаустройств в силу отсутствия исследовательского доступа к МР-оборудованию для оптимизации настроек импульсных последовательностей при использовании метаустройств; отсутствие многоканальных приемных элементов в текущей конфигурации метаустройства. Сравнение диагностического качества изображений было проведено на группе здоровых добровольцев.

### 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 молочных желез. Метаустройства позволяют существенно снизить РЧ нагрузку, что открывает возможности в перспективном расширении допустимых показаний к проведению исследования МРТ, сокращению времени сканирования и использованию данных устройств, например, при исследовании беременных. Кроме этого, учитывая низкую оснащенность специализированными катушками для исследования молочных желез большей части МРТ-диагностических подразделений РФ, метаустройства могут стать хорошей альтернативой как для исследований по показаниям, так и для скрининговых исследований женщин, с учетом высокой информативности МРТ в выявлении патологии мягкотканых структур.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Агеева Л.И., Александрова Г.А., Зайченко Н.М. и др. Здравоохранение в России. 2019. М.: Стат. Сб. Росстат, 2019. 170 с.
2. Захарова Н.А., Семиглазов В.Ф., Duffy S.W. Скрининг рака молочной железы: проблемы и решения. М: ГЭОТАР-Медиа, 2011. 176 с.
3. Серебрякова С.В., Труфанов Г.Е., Юхно Е.А. Магнитно-резонансная семиотика рака молочной железы // Опухоли женской репродуктивной системы. 2009. № 3-4. С. 20-25.
4. Bakker M.F., de Lange S.V., Pijnappel R.M., et al. Supplemental MRI Screening for Women with Extremely Dense Breast Tissue // New England Journal of Medicine. 2019. V.381, No. 22. P. 2091-2102.
5. Александрова Л.М., Калинина А.М., Ипатов П.В. и др. Выявление рака молочной железы: состояние проблемы, пути решения // Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. 2016. Т. 5, № 2. С. 34-39.
6. Gao Y., Reig B., Heacock L., et al. Magnetic Resonance Imaging in Screening of Breast Cancer // Radiologic Clinics. 2021. V.59, No. 1. P. 85-98. DOI: 10.1016/j.rcl.2020.09.004.
7. Chiarelli A.M., Blackmore K.M., Muradali D., et al. Performance Measures of Magnetic Resonance Imaging Plus Mammography in the High Risk Ontario Breast Screening Program // Journal of the National Cancer Institute. 2020. V.112, No. 2. P. 136-144.
8. Onishi N., Sadinski M., Hughes M.C., et al. Ultrafast Dynamic Contrast-Enhanced Breast MRI May Generate Prognostic Imaging Markers of Breast Cancer // Breast Cancer Research. 2020. V.22, No. 1. P. 1-13. DOI: 10.1186/s13058-020-01292-9.
9. Saadatmand S., Geuzinge H.A., Rutgers E.J., et al. MRI Versus Mammography for Breast Cancer Screening in Women with Familial Risk (FaMRIsc): a Multicentre, Randomised, Controlled Trial // The Lancet Oncology. 2019. V.20, No. 8. P. 1136-1147. DOI: 10.1016/S1470-2045(19)30275-X.
10. Strigel R.M., Rollenhagen J., Burnside E.S., et al. Screening Breast MRI Outcomes in Routine Clinical Practice: Comparison to BI-RADS Benchmarks // Academic Radiology. 2017. V.24, No. 4. P. 411-417.

11. Lehman C.D., Lee J.M., DeMartini W.B., et al. Screening MRI in Women with a Personal History of Breast Cancer // *Journal of the National Cancer Institute*. 2016. V.108, No. 3. P. djv349.
12. Clauser P., Dietzel M., Weber M., et al. Motion Artifacts, Lesion Type, and Parenchymal Enhancement in Breast MRI: what Does Really Influence Diagnostic Accuracy? // *Acta Radiologica*. 2019. V.60, No. 1. P. 19-27. DOI: 10.1177/0284185118770918.
13. 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.
14. Ivanov V., Shchelokova A., Andreychenko A., Slobozhanyuk A. Coupled Very-High Permittivity Dielectric Resonators for Clinical MRI // *Applied Physics Letters*. 2020. V.117, No. 10. P. 103701.
15. Puchnin V., Solomakha G., Nikulin A., et al. Metamaterial Inspired Wireless Coil for Clinical Breast Imaging // *Journal of Magnetic Resonance*. 2021. No. 322. P. 106877.
16. Bickelhaupt S., Laun F.B., Tesdorff J., et al. Fast and Noninvasive Characterization of Suspicious Lesions Detected at Breast Cancer X-Ray Screening: Capability of Diffusion-Weighted MR Imaging with MIPs // *Radiology*. 2016. V.278, No. 3. P. 689-697.
17. Zhang S., Seiler S., Wang X., et al. CEST-Dixon for Human Breast Cancer Characterization at 3T: a Preliminary Study // *Magnetic Resonance in Medicine*. 2018. V.80, No. 3. P. 895-903.
18. Sánchez-González J., Luna A. Diffusion MRI Outside the Brain: A Case-Based Review and Clinical Applications / Eds Luna A., Ribes R., Soto J.A. Springer Science & Business Media, 2011. P. 51-72.
19. Vinogradov E., Sherry A.D., Lenkinski R.E. CEST: from Basic Principles to Applications, Challenges and Opportunities // *Journal of Magnetic Resonance*. 2013. No. 229. P. 155-172.

## REFERENCES

1. Ageyeva L.I., Aleksandrova G.A., Zaychenko N.M., et al. Zdravookhraneniye v Rossii. 2019 = Health Care in Russia. 2019. Moscow Publ., 2019. 170 p. (In Russ.).
2. Zakharova N.A., Semiglazov V.F., Duffy S.W. Skrinig Raka Molochnoy Zhelezy: Problemy i Resheniya = Breast Cancer Screening: Problems and Solutions. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2011. 176 p. (In Russ.).
3. Serebryakova S.V., Trufanov G.Ye., Yukhno Ye.A. Magnetic Resonance Semiotics of Breast Cancer. Opukholi Zhenskoy Reprodukivnoy Sistemy = Tumors of Female Reproductive System. 2009;3-4:20-25 (In Russ.).
4. Bakker M.F., de Lange S.V., Pijnappel R.M., et al. Supplemental MRI Screening for Women with Extremely Dense Breast Tissue. *New England Journal of Medicine*. 2019;381;22:2091-2102.
5. Aleksandrova L.M., Kalinina A.M., Ipatov P.V., et al. Detection of Breast Cancer: State of the Problem, Solutions. *Onkologiya. Zhurnal im. P.A. Gertsena = P.A. Herzen Journal of Oncology*. 2016;5;2:34-39 (In Russ.).
6. Gao Y., Reig B., Heacock L., et al. Magnetic Resonance Imaging in Screening of Breast Cancer. *Radiologic Clinics*. 2021;59;1:85-98. DOI: 10.1016/j.rcl.2020.09.004.
7. Chiarelli A.M., Blackmore K.M., Muradali D., et al. Performance Measures of Magnetic Resonance Imaging Plus Mammography in the High Risk Ontario Breast Screening Program. *Journal of the National Cancer Institute*. 2020;112;2:136-144.
8. Onishi N., Sadinski M., Hughes M.C., et al. Ultrafast Dynamic Contrast-Enhanced Breast MRI May Generate Prognostic Imaging Markers of Breast Cancer. *Breast Cancer Research*. 2020;22;1:1-13. DOI: 10.1186/s13058-020-01292-9.
9. Saadatmand S., Geuzinge H.A., Rutgers E.J., et al. MRI Versus Mammography for Breast Cancer Screening in Women with Familial Risk (FaMRIsc): a Multicentre, Randomised, Controlled Trial. *The Lancet Oncology*. 2019;20;8:1136-1147. DOI: 10.1016/S1473-0245(19)30275-X.
10. Strigel R.M., Rollenhagen J., Burnside E.S., et al. Screening Breast MRI Outcomes in Routine Clinical Practice: Comparison to BI-RADS Benchmarks. *Academic Radiology*. 2017;24;4:411-417.
11. Lehman C.D., Lee J.M., DeMartini W.B., et al. Screening MRI in Women with a Personal History of Breast Cancer. *Journal of the National Cancer Institute*. 2016;108;3:djv349.
12. Clauser P., Dietzel M., Weber M., et al. Motion Artifacts, Lesion Type, and Parenchymal Enhancement in Breast MRI: what Does Really Influence Diagnostic Accuracy? *Acta Radiologica*. 2019;60;1:19-27. DOI: 10.1177/0284185118770918.
13. 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.
14. Ivanov V., Shchelokova A., Andreychenko A., Slobozhanyuk A. Coupled Very-High Permittivity Dielectric Resonators for Clinical MRI. *Applied Physics Letters*. 2020;117;10:103701.
15. Puchnin V., Solomakha G., Nikulin A., et al. Metamaterial Inspired Wireless Coil for Clinical Breast Imaging. *Journal of Magnetic Resonance*. 2021;322:106877.
16. Bickelhaupt S., Laun F.B., Tesdorff J., et al. Fast and Noninvasive Characterization of Suspicious Lesions Detected at Breast Cancer X-Ray Screening: Capability of Diffusion-Weighted MR Imaging with MIPs. *Radiology*. 2016;278;3:689-697.
17. Zhang S., Seiler S., Wang X., et al. CEST-Dixon for Human Breast Cancer Characterization at 3T: a Preliminary Study. *Magnetic Resonance in Medicine*. 2018;80;3:895-903.
18. Sánchez-González J., Luna A. Diffusion MRI Outside the Brain: A Case-Based Review and Clinical Applications / Eds Luna A., Ribes R., Soto J.A. Springer Science & Business Media, 2011. P. 51-72.
19. Vinogradov E., Sherry A.D., Lenkinski R.E. CEST: from Basic Principles to Applications, Challenges and Opportunities. *Journal of Magnetic Resonance*. 2013;229:155-172.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
**Финансирование.** Российским научным фондом (проект № 18-75-10088).  
**Участие авторов.** Статья подготовлена с равным участием авторов.  
**Поступила:** 17.04.2022. Принята к публикации: 06.05.2022.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.  
**Financing.** The Russian Science Foundation (Project No. 18-75-10088).  
**Contribution.** Article was prepared with equal participation of the authors.  
**Article received:** 17.04.2022. Accepted for publication: 06.05.2022