

УДК 004.8:61
DOI: 10.18799/29495407/2024/1/45
Шифр специальности ВАК: 1.2.1

Возможности повышения доступности МРТ-диагностики для населения с применением технологий искусственного интеллекта

Д.А. Федоров✉, Д.В. Дыбовский, А.В. Чукарин, И.Ю. Труфанов

Федеральный центр прикладного развития искусственного интеллекта, Россия, г. Москва

✉d.fedorov@aigov.ru

Аннотация. В настоящее время магнитно-резонансная томография (МРТ) является одним из основных методов медицинской визуализации и важным инструментом в исследовании человеческого мозга, сердца, опорно-двигательного аппарата и других частей тела. Появление данного метода является ярким примером междисциплинарного взаимодействия – над созданием аппаратов МРТ работали ученые и специалисты в области физики, математики, электроники, информатики и медицины. На протяжении уже пятидесяти лет ведется последовательная работа по развитию данного метода, тем не менее длительность МРТ-диагностики препятствует более широкому ее применению в клинической практике и снижает ее доступность для пациентов. Авторы статьи предполагают, что искусственный интеллект будет успешно интегрирован в процесс МРТ-диагностики и позволит повысить ее доступность для населения. Авторы отмечают, что наибольший потенциал применения искусственного интеллекта существует при реконструкции изображений для сокращения времени процедуры МРТ-диагностики.

Ключевые слова: искусственный интеллект, магнитно-резонансная томография, реконструкция изображений, цифровизация здравоохранения, медицинское программное обеспечение

Для цитирования: Возможности повышения доступности МРТ-диагностики для населения с применением технологий искусственного интеллекта / Д.А. Федоров, Д.В. Дыбовский, А.В. Чукарин, И.Ю. Труфанов // Известия томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2024. – Т. 2. – № 1. – С. 7–15.
DOI: 10.18799/29495407/2024/1/45

UDC 004.8:61
DOI: 10.18799/29495407/2024/1/45

Possibilities of increasing the availability of MRI diagnostics for population using artificial intelligence technologies

D.A. Fedorov✉, D.V. Dybovskiy, A.V. Chukarin, I.Yu. Trufanov

Federal Center for Applied Development of Artificial Intelligence, Moscow, Russian Federation

✉d.fedorov@aigov.ru

Abstract. Nowadays, magnetic resonance imaging (MRI) is one of the main medical imaging methods and an important tool in studying the human brain, heart, musculoskeletal system and other parts of the body. The emergence of this method is a striking example of interdisciplinary collaboration; scientists and specialists in the field of physics, mathematics, electronics, computer science and medicine worked on the creation of MRI devices. For fifty years, consistent work has been carried out to develop this method, however, the duration of MRI diagnostics prevents its wider use in clinical practice and reduces its accessibility to patients. The authors of the article suggest that artificial intelligence will be successfully integrated into the MRI diagnostic and will increase its accessibility to the population. The authors note that the greatest potential for using artificial intelligence exists in image reconstruction to reduce the time of the MRI diagnostic procedure.

Keywords: artificial intelligence, magnetic resonance imaging, image reconstruction, digitalization of healthcare, medical software

For citation: Fedorov D.A., Dybovskiy D.V., Chukarin A.V., Trufanov I.Yu. Possibilities of increasing the availability of MRI diagnostics for population using artificial intelligence technologies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2024, vol. 2, no. 1, pp. 7–15. DOI: 10.18799/29495407/2024/1/45

Введение

Применение искусственного интеллекта (ИИ) для обработки и анализа данных МРТ-диагностики становится одним из трендов современной медицины. ИИ обеспечивает стабильную диагностическую эффективность, высокую вычислительную скорость и точность при обработке данных. Известны примеры создания продуктов ИИ для интерпретации данных МРТ-диагностики различных заболеваний как в России, так и за рубежом [1, 2]. ИИ может применяться для диагностики опухоли головного мозга [3], шизофрении [4], рака простаты [5], височной эпилепсии [6], болезни Альцгеймера [7], остеоартрита [8], атеросклеротической болезни сердца [9] и других заболеваний. Соответственно, ИИ потенциально способен формировать заключения по результату процедуры МРТ при использовании сформированных для этого датасетов. Другим важным направлением применения ИИ становится реконструкция получаемых при диагностике МРТ-изображений для сокращения времени процедуры [10–13]. Целью данной статьи является изучение современных методов реконструкции МРТ-изображений и оценка возможного их применения в МРТ-диагностике.

Доступность МРТ-диагностики для населения в России и за рубежом

В РФ устойчиво наблюдается рост количества МРТ-аппаратов, применяемых в клинической практике. В 2000 г. в РФ использовалось 137 МРТ-аппаратов, а в 2016 г. – уже 680. Этот тренд соответствует расширению парка установок в европейских странах. В 2000 г. число установок в европейских странах составляло 481 единицу, а в 2016 г. страны Евросоюза (ЕС) уже располагали 8772 МРТ-аппаратами [14]. На рис. 1 хорошо видно, насколько мощным оказался этот рост в РФ, но особенно в ЕС.

Несмотря на существенное расширение парка оборудования МРТ, в России удельное количество (число МРТ-аппаратов на 1 миллион жителей) составляет 4,7 единиц (по данным исследования 2018 г.). В то же время у лидеров рейтинга (Германия, Италия, Греция, Финляндия) от 20 до 34 единиц при среднем показателе 17 единиц по ЕС (данные за 2016 г.) [14]. Важным параметром также является интенсивность работы МРТ-аппарата за год. Сравнение по количеству сканирований на аппарат приведено на рис. 2.

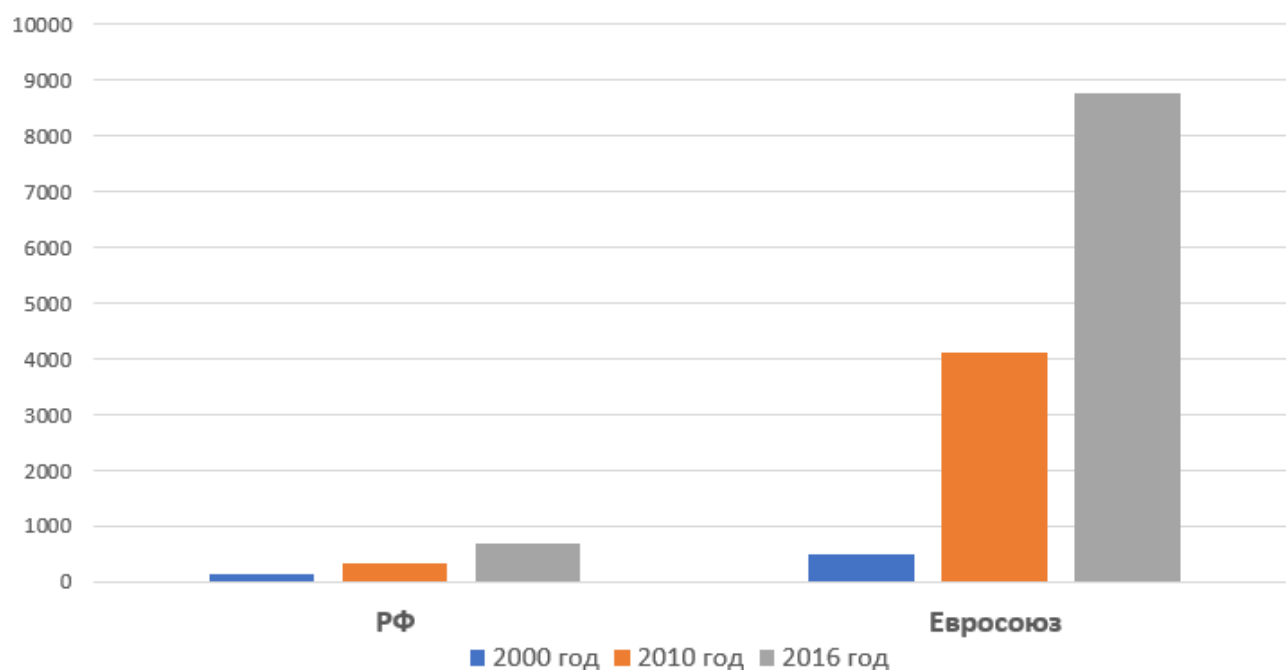


Рис. 1. Количество МРТ-аппаратов, применяемых в клинической практике в РФ и в ЕС в разные годы [14]

Fig. 1. Number of MRI machines used in clinical practice in the Russian Federation and the EU in different years [14]

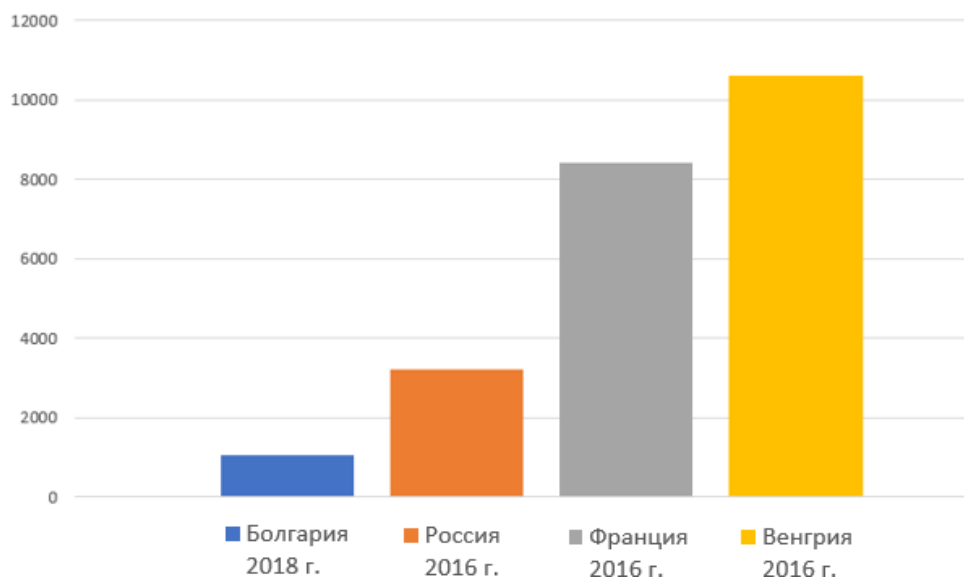


Рис. 2. Количество сканирований на один МРТ-аппарат в разных странах с указанием соответствующего года [14]

Fig. 2. Number of scans per MRI machine in different countries, indicating the corresponding year [14]

Таким образом, чем больше в государстве действующих аппаратов МРТ, и чем более интенсивно они используются, тем шире охват населения услугами МРТ-диагностики. Количество МРТ-исследований на 100 тысяч жителей в различных странах показано на рис. 3.

Данные, приведенные выше, показывают важность не только наличия большого количества аппаратов МРТ для широкого охвата населения МРТ-диагностикой, но и оптимальной загрузки этих аппаратов. В отдельных случаях страна или регион с меньшим количеством МРТ-сканеров может обеспечивать для населения больший объем исследований из-за оптимальной загрузки этих аппаратов. Для России это весьма актуально, так как число МРТ-аппаратов в стране на данный момент в не-

сколько раз меньше среднего уровня по ЕС, при этом загруженность аппаратов в ЕС зачастую выше. Видно, что решение проблемы зависит не только от расширения парка МРТ-установок. Невысокая загруженность аппаратов также является одной из ключевых проблем на пути повышения доступности МРТ-диагностики для пациентов в России. Повышение загруженности уже существующей аппаратуры способно повысить доступность МРТ-диагностики и сократить отставание от ведущих стран по этому параметру. Именно эта причина делает ускорение процесса МРТ-диагностики особенно важным для нашей страны, в том числе и с применением компетенций в области ИИ, которые уже успешно используются в отечественной медицине в последнее время [15, 16].

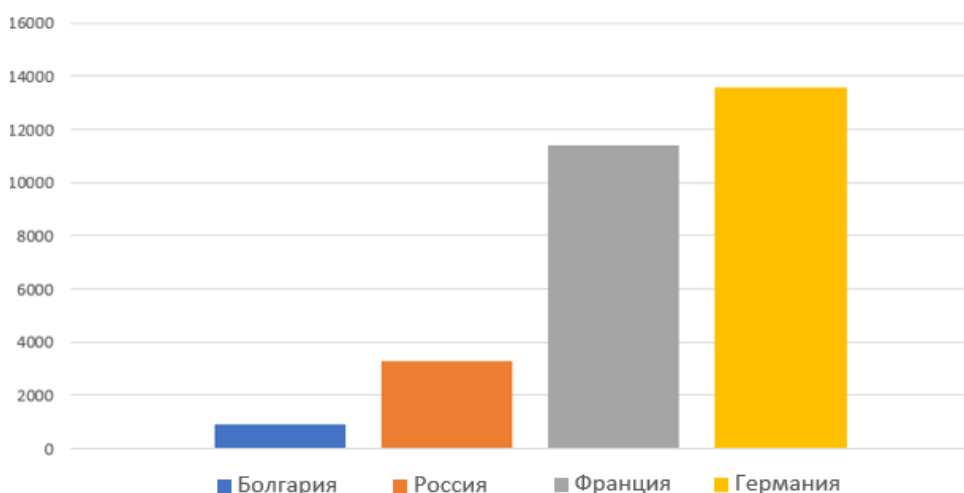


Рис. 3. Количество МРТ-исследований на 100 тысяч жителей в различных странах (данные за 2016–2018 гг.) [14]

Fig. 3. Number of MRI examinations per 100 thousand inhabitants in various countries (data for 2016–2018) [14]

Возможности применения ИИ для ускорения МРТ-диагностики с помощью реконструкции изображения

Длительность процедуры МРТ-сканирования приводит к низкой пропускной способности профильного кабинета, дискомфорту пациента при процедуре, искажениям изображения от движений пациента. Низкая пропускная способность кабинетов МРТ снижает доступность диагностики для пациентов. На протяжении длительного времени ведутся исследования по повышению скорости МРТ-диагностики, в последние годы также и с применением ИИ. Ускорение получения результатов данного исследования за счет реконструкции изображений является на сегодняшний день перспективной областью исследований [10–13].

Длительность процедуры МРТ связана с тем, что изображение формируется таким образом, что информация о пространственном изображении сканируемого объекта кодируется в частоте и фазе сигнала от него, далее регистрируемого в аппарате МРТ. Этот процесс является последовательным, что ведет к долгому сбору необходимых данных. Последовательность процесса необходима для того, чтобы сопоставлять сигнал и место, откуда он получен, что дает возможность на основе этих параметров построить изображение исследуемого объекта. На основе сбора данных получается пространственная карта частот, которую называют k-пространством. Далее необходима реконструкция данных k-пространства для формирования клинически интерпретируемого изображения объекта исследования. Очевидно, что получение неполной выборки данных k-пространства при МРТ-диагностике позволяет ускорять процесс, но затрудняет получение качественного изображения [12].

Основными разработками, которые способствуют ускорению визуализации в МРТ-диагностике, являются параллельная визуализация и сжатое зондирование. В методе параллельной визуализации известная чувствительность нескольких приемных катушек обеспечивает необходимую дополнительную фазовую информацию сигнала. Такой вид визуализации позволяет уменьшить время сканирования, на данный момент этот метод широко интегрирован в коммерческие системы МРТ и регулярно используется в клинической практике. Для параллельной визуализации может применяться обобщенная автокалибровка с частичным параллельным сбором данных (Generalized Autocalibrating Partial Parallel Acquisition – GRAPPA) и кодирование чувствительности (Sensitivity Encoding – SENSE). Метод GRAPPA работает в k-пространстве по принципу интерполяции, недостающие данные определяются из имеющихся. Метод SENSE работает по обратному прин-

ципу, устраняя дефекты изображения с помощью информации о чувствительности приемных катушек аппарата МРТ. В реконструкции МРТ-изображений методом сжатого зондирования используется уже существующая (предварительная) информация о получаемом изображении. Применение данной информации (хоть она зачастую и ограничена) может существенно помочь в решении проблемы реконструкции изображений. Применение подходов ИИ может обеспечить более эффективное получение предварительной информации. Многие из существующих и внедряемых подходов реконструкции МРТ-изображений, как без применения, так и с применением ИИ, основаны на методах GRAPPA, SENSE, сжатого зондирования [17, 18].

Современные методы ИИ для ускоренного получения МРТ-изображений относятся к категории глубокого обучения с учителем. В этом методе происходит обучение нейронных сетей преобразованию некоторых входных данных в выходные данные, учитывая множество известных примеров пар входных и выходных данных (применительно к описываемой реконструкции это означает, что проводится ручная разметка МРТ-изображений специалистами, далее на них обучается нейросеть). Данные методы применяются для классификации изображений, когда сверточные нейронные сети обучаются с помощью размеченных изображений. Сверточные нейронные сети применяются, когда информация в пространстве непрерывна, например, пиксели изображения. Данный вид нейросетей широко применяется для работы с различными видами изображений. При этом сначала происходит определение того, что на нем находится, а дальше идет работа по выявлению более тонких деталей. Название дано из-за применения математической операции свертки (в изображениях по каждому пикселю проходит ядро свертки, что позволяет после ряда математических преобразований обнаруживать определенные признаки на изображении). Сверточная нейронная сеть при этом учится извлекать необходимые признаки для выполнения задачи классификации изображений. Методы глубокого обучения с учителем успешны в области медицинской визуализации применительно к автоматической диагностике заболеваний по медицинским изображениям. Но данные методы могут применяться и для реконструкции МРТ-изображений. Методы глубокого обучения с учителем применяются для реконструкции изображений вне медицинской сферы, например, фотографий в художественных целях. Схожие методы применимы и в реконструкции МРТ-изображений. Для этого требуются примеры эталонных изображений, сформированных по данным с полной выборкой. Инструменты для этих целей оказываются схожи с реконструкцией обыч-

ных фотографий методами глубокого обучения с учителем. Ключевое различие заключается в получении МРТ-изображения в k -пространстве. Это приводит к ограничениям, заключающимся в том, что выборка данных в k -пространстве должна быть одинаковой для входных и выходных данных [17]. Тем не менее реконструкцию можно проводить и в пространстве изображений. Существуют различные методы реконструкции:

1. Методы реконструкции в пространстве изображений с применением ИИ.

Одна из категорий методов машинного обучения, которая позволяет быстрее формировать МРТ-снимки, работает в пространстве изображений. В данном случае за основу берется метод SENSE. Машинное обучение позволяет модифицировать метод и также использует предварительную информацию о содержании изображения, однако глубокое обучение позволяет получать ее из больших объемов данных без требования в явном виде. В итоге удастся получить предварительную информацию о взаимосвязи между неполной и полной выборкой данных, а также предварительную информацию о содержании и структуре изображений [17].

Одним из успешных методов ускоренной реконструкции МРТ-изображений является вариационная сеть. Вариационная сеть решает задачу реконструкции изображения из неполных данных k -пространства, применяя измеренную чувствительность катушек и используя сверточные нейронные сети для получения предварительной информации об изображениях. По сути, это расширение глубоким обучением метода SENSE и сжатого зондирования. Применение сверточных нейронных сетей с большей емкостью модели может способствовать более точной реконструкции изображения. По сравнению с результатами классической реконструкции МРТ-изображений применение глубокого обучения способно дать более высокое качество реконструированных изображений при

меньших затратах времени на процесс реконструкции [17].

2. Методы реконструкции в k -пространстве с применением ИИ.

Нейронные сети могут применяться при интерполяции в k -пространстве для последующей реконструкции изображений. Как и в методе GRAPPA, интерполяция осуществляется для получения полной выборки данных. В качестве функции интерполяции используются обученные сверточные нейронные сети, что позволяет повысить качество получаемых изображений в сравнении с методом GRAPPA. Достоинством этого метода является отсутствие необходимости в использовании большого количества данных для обучения нейронных сетей, недостатком является длительное время реконструкции [17].

Методы реконструкции с помощью ИИ в пространстве изображений и в k -пространстве показаны на рис. 4.

3. Другие варианты применения ИИ в реконструкции МРТ-изображений.

Выполнение реконструкции МРТ-изображений при помощи сверточных нейронных сетей может приводить к неестественному виду изображений, которые иногда выглядят слишком сглаженными. Это может насторожить врачей, выполняющих расшифровку снимка. Для решения этой проблемы применяются генеративно-состязательные сети (Generative Adversarial Network – GAN). Генеративно-состязательные сети используют две нейросети: одна генерирует данные, а вторая пытается отличить правильные данные от неправильных. Данный вид нейросетей часто используется для получения реалистичных изображений, которые человек принимает за оригинальные (не созданные нейросетью). Тем не менее их применение может привести к снижению качества изображения применительно к диагностике, а также зачастую их достаточно сложно обучать [17, 19].

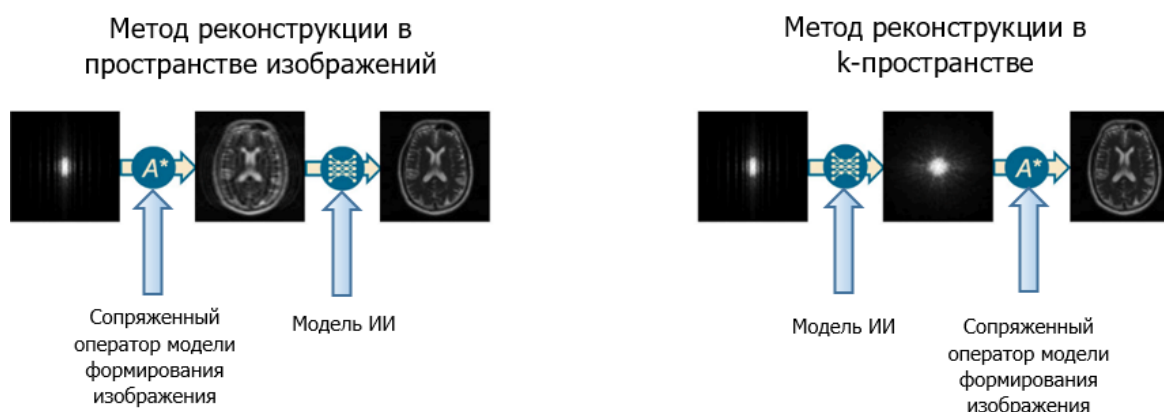


Рис. 4. Методы реконструкции с помощью ИИ в пространстве изображений и в k -пространстве [12]

Fig. 4. Reconstruction methods using AI in image space and k -space [12]

Известно, что существуют сложности при повышении разрешения МРТ-изображений с низким разрешением (в какой-либо плоскости) при помощи методов глубокого обучения. Сложности связаны с тем, что реконструированные изображения приемлемы для визуальной диагностики, но не всегда пригодны для автоматической обработки алгоритмами. Решить эту проблему могут методы сверхвысокого разрешения (Super-resolution techniques). В этом случае изображение с высоким разрешением реконструируется из нескольких изображений с низким разрешением (имеется в виду низкое разрешение по определенному направлению). Очевидным недостатком при этом является необходимость получения нескольких изображений, что требует дополнительного времени [10].

Подходы ИИ, изложенные выше, обещают повысить скорость выполнения МРТ-диагностики. В этих методах используются двумерные сверточные нейронные сети. Перспективным направлением для развития этих методов может стать их расширение до трехмерных. Соседние срезы несут важную информацию о структуре и контрасте изображения, которая может значительно помочь реконструкции изображения. Также сверточные нейронные сети могут обучаться для определения взаимосвязи между изображениями с разным контрастом, что будет способствовать получению более полной предварительной информации и потенциально улучшить реконструкцию изображений [17].

Оптимизация работы кабинета МРТ

Многие специалисты отмечают, что кроме развития аппаратной и цифровой части МРТ важной областью для оптимизации является непосредственно организация работы кабинета МРТ [20]. Это особенно актуально ввиду того, что на этапе строительства лечебного учреждения не всегда учитывается специфика работы конкретной медицинской организации, в том числе и кабинета МРТ в ней. Неправильная планировка кабинета МРТ может значительно снижать эффективность работы диагностического отделения [21]. Для оптимизации процессов диагностики непосредственно в МРТ-отделении необязательно применять ИИ, достаточно организовать рабочую группу из специалистов для организации процесса оптимизации. Существуют примеры, когда специалисты добивались значительного сокращения времени на МРТ-диагностику (около 5 минут на одного пациента) именно путем реорганизации МРТ-отделения. Такие результаты достигались за счет наличия двух дверей в каждом кабинете МРТ, одна дверь использовалась для прохода пациента на процедуру (перед ней располагался кабинет подготовки к процедуре), другая – для выхода с процедуры. Примене-

ние двух независимых столов, которые легко стыкуются с основным рабочим местом аппарата МРТ, позволяло в кабинете предварительной подготовки подготовить пациента к диагностике, а далее отвезти его на диагностику прямо на столе. При этом время между двумя процедурами минимально, так как пациента после процедуры сразу же отвозят из кабинета диагностики на втором таком же столе, который таким же образом отсоединяется от основного рабочего места. Конфиденциальность обследования при этом сохраняется [20].

Помимо оптимизации работы кабинета МРТ важной задачей остается реализация персонализированного подхода к пациентам. Например, существенной проблемой, которая затрудняет доступ к МРТ-исследованиям, является неявка пациента на прием. Применение ИИ потенциально может помочь повысить процент явки пациентов. Обработка с помощью ИИ данных из медицинских карт пациентов позволяет выделить группу пациентов, которые с высокой вероятностью могут не прийти на прием. Напоминание этим пациентам о предстоящем приеме с помощью телефонного звонка или сообщения способно повысить процент явки. Существуют исследования, где ИИ выделял группу пациентов с наивысшим риском неявки на прием, а далее этих пациентов уведомляли о предстоящем приеме. Применение такой модели позволило снизить уровень неявки на прием с 19,3 до 15,9 % [22].

Заключение

Магнитно-резонансная томография стала одним из основных методов медицинской визуализации и важным инструментом диагностики в клинической практике. Повышение доступности МРТ-диагностики для населения является важной задачей современного здравоохранения. Искусственный интеллект может позволить повысить число проводимых процедур диагностики без закупки новых МРТ-сканеров. Основным драйвером для этого должна стать реконструкция МРТ-изображений с помощью ИИ для уменьшения времени проведения процедуры МРТ-диагностики.

Методы реконструкции могут применяться как в пространстве изображений, так и в k-пространстве. Методы реконструкции в пространстве изображений за счет применения глубокого обучения позволяют значительно сократить время на реконструкцию и при этом обеспечивать необходимое качество изображения, но требуют большое количество данных для обучения. В то же время реконструкция в k-пространстве не требует большого количества данных для обучения, но ее недостатком является длительное время процедуры реконструкции.

ИИ также потенциально способен в автоматическом режиме формировать заключения по результату процедуры МРТ при использовании сформированных для этого дата-сетов. Важным фактором в повышении доступности МРТ-диагностики может стать оптимизация пространства в кабинете МРТ. Применение ИИ может поз-

волить снизить процент неявки пациентов на прием путем точечного оповещения определенных пациентов перед процедурой.

Таким образом, существует большой потенциал для оптимизации работы МРТ-отделений в России и за рубежом, причем основную роль в оптимизации будет играть ИИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Artificial intelligence system approaching neuroradiologist-level differential diagnosis accuracy at brain MRI / A. Rauschecker, J. Rudie, L. Xie et al. // *Radiology*. – 2020. – Vol. 295. – № 3. DOI: <https://doi.org/10.1148/radiol.2020190283>
2. Применение искусственного интеллекта в МРТ диагностике рака прямой кишки / Р.Р. Елигулашвили, И.В. Зароднюк, С.И. Ачкасов, Д.М. Белов, В.А. Михальченко, Е.П. Гончарова, А.Г. Запольский, Д.И. Суслова, М.А. Ряховская, Е.Д. Никитин, Н.С. Филатов // *Колопроктология*. – 2022. – Т. 21. – № 1. – С. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.33878/2073-7556-2022-21-1-26-36>
3. Gull S., Akbar S. Artificial intelligence in brain tumor detection through MRI scans: advancements and challenges // *Artificial Intelligence and Internet of Things*. – 2021. – P. 241–276. URL: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003097204-10/artificial-intelligence-brain-tumor-detection-mri-scans-sahar-gull-shahzad-akbar> (дата обращения: 21.01.2024).
4. An overview of artificial intelligence techniques for diagnosis of Schizophrenia based on magnetic resonance imaging modalities: Methods, challenges, and future works / Delaram Sadeghi, Afshin Shoeibi, Navid Ghassemi, Parisa Moridian, Ali Khadem, Roohallah Alizadehsani, Mohammad Teshnehlal, Juan M. Gorriz, Fahime Khozeimeh, Yu-Dong Zhang, Saeid Nahavandi, U. Rajendra Acharya. // *Computers in Biology and Medicine*. – 2022. – Vol. 146. – 105554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.105554>
5. Prostate cancer classification from ultrasound and MRI images using deep learning based on Explainable Artificial Intelligence / Md. Rafiul Hassan, Md. Fakrul Islam, Md. Zia Uddin, Goutam Ghoshal, Mohammad Mehedi Hassan, Shamsul Huda, G. Fortino // *Future Generation Computer Systems*. – 2022. – Vol. 127. – P. 462–472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.09.030>
6. Artificial intelligence for classification of temporal lobe epilepsy with ROI-level MRI data: a worldwide ENIGMA-Epilepsy study / E. Gleichgerricht, B.C. Munsell, S. Alhusaini, M.K.M. Alvim, N. Bargalló, B. Bender, A. Bernasconi, N. Bernasconi, B. Bernhardt, K. Blackmon, M.E. Caligiuri, F. Cendes, L. Concha, P.M. Desmond, O. Devinsky, C.P. Doherty, M. Domin, J.S. Duncan, N.K. Focke, A. Gambardella, R. Wiest // *NeuroImage: Clinical*. – 2021. – Vol. 31. – 102765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2021.102765>
7. Application of Artificial Intelligence techniques for the detection of Alzheimer's disease using structural MRI images / X. Zhao, C. Ang, U. Acharya, K. Cheong // *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. – 2021. – Vol. 41. – № 2. – P. 456–473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2021.02.006>
8. Studying osteoarthritis with artificial intelligence applied to magnetic resonance imaging / F. Calivà, N.K. Namiri, M. Dubreuil, V. Pedoia, E. Ozhinsky, Sh. Majumdar // *Nature Reviews Rheumatology*. – 2022. – Vol. 18. – № 2. – P. 112–121. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41584-021-00719-7>
9. Sharma A., Kumar R., Jaiswal V. Classification of heart disease from MRI images using convolutional neural network // 2021 6th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC). IEEE. – 2021. – P. 358–363. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISPCC53510.2021.9609408>
10. Applications of a deep learning method for anti-aliasing and super-resolution in MRI / Can Zhao, Muhan Shao, Aaron Carass, Hao Li, B.E. Dewey, L.M. Ellingsen, Jonghye Woo, M.A. Guttman, A.M. Blitz, M. Stone, P.A. Calabresi, H. Halperin, J.L. Prince // *Magnetic resonance imaging*. – 2019. – Vol. 64. – P. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mri.2019.05.038>
11. Multi-institutional collaborations for improving deep learning-based magnetic resonance image reconstruction using federated learning / Pengfei Guo, Puyang Wang, Jinyuan Zhou, Shanshan Jiang, V.M. Patel // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2021. – С. 2423–2432. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.02148>
12. Machine learning in magnetic resonance imaging: image reconstruction / J. Montalt-Tordera, V. Muthurangu, A. Hauptmann, J. Steeden // *Physica Medica*. – 2021. – Vol. 83. – P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.02.020>
13. Deep learning-based acceleration of compressed sense MR imaging of the ankle / S.C. Foreman, J. Neumann, J. Han, N. Harrasser, K. Weiss, J.M. Peeters, D.C. Karampinos, M.R. Makowski, A.S. Gersing, K. Woertler // *European Radiology*. – 2022. – Vol. 32. – P. 8376–8385. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00330-022-08919-9>
14. Панова Л.В., Панова А.Ю. Доступность современных медицинских технологий в России и странах Европы // *Экономическая социология*. – 2020. – Т. 21. – № 5. – С. 58–93. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dostupnost-sovremennyh-meditsinskih-tehnologiy-v-rossii-i-stranah-evropy> (дата обращения: 21.01.2024).
15. Эталонные медицинские датасеты (MosMedData) для независимой внешней оценки алгоритмов на основе искусственного интеллекта в диагностике / Н. Павлов, А. Андрейченко, А. Владимирский, А.А. Реваян, Ю.С. Кирпичев, С.П. Морозов // *Digital Diagnostics*. – 2021. – Т. 2. – № 1. – С. 49–66. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD60635>
16. Каледин Е.А., Каледина О.Е., Кулягина Т.И. Применение методов машинного обучения для предсказания сердечно-сосудистых заболеваний на малых наборах // *Проблемы информатики*. – 2022. – № 1 (54). – С. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.24412/2073-0667-2022-1-66-76>
17. Johnson P., Recht M., Knoll F. Improving the speed of MRI with artificial intelligence // *Seminars in musculoskeletal radiology*. – 2020. – Т. 24. – № 1. – С. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0039-3400265>
18. Методы параллельной визуализации // Siemens Healthineers. URL: <https://www.siemens-healthineers.com/ru/magnetic-resonance-imaging/mri-technologies/mri-services/ipat> (дата обращения: 21.01.2024).

19. Lv J., Wang C., Yang G. PIC-GAN: a parallel imaging coupled generative adversarial network for accelerated multi-channel MRI reconstruction // *Diagnostics*. – 2021. – Vol. 11. – № 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/diagnostics11010061>
20. Optimization of MRI turnaround times through the use of dockable tables and innovative architectural design strategies / M.P. Recht, K.T. Block, H. Chandarana, J. Friedland, Th. Mullholland, D. Teahan, R. Wiggins // *AJR. American journal of roentgenology*. – 2019. – Vol. 212. – № 4. DOI: <https://doi.org/10.2214/AJR.18.20459>
21. Обзор российской нормативной документации по организации и функционированию кабинетов и отделений магнитно-резонансной томографии / А.В. Смирнов, Д.С. Семенов, Е.С. Ахмад, А.Н. Хоружая // *Digital Diagnostics*. – 2021. – Т. 2. – № 4. – С. 453–464. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD80901>
22. Artificial intelligence predictive analytics in the management of outpatient MRI appointment no-shows / Le Roy Chong, Koh Tzan Tsai, Lee Lian Lee, Seck Guan Foo, Piek Chim Chang // *American Journal of Roentgenology*. – 2020. – Vol. 215. – № 5. – P. 1155–1162. DOI: <https://doi.org/10.2214/AJR.19.22594>

Информация об авторах

Дмитрий Андреевич Федоров, инженер-исследователь департамента нормативного и методического обеспечения, Федеральный центр прикладного развития искусственного интеллекта, Россия, 125040, г. Москва, 3-я улица Ямского поля, 32; d.fedorov@aigov.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7752-1937>

Дмитрий Викторович Дыбовский, заместитель генерального директора, Федеральный центр прикладного развития искусственного интеллекта, Россия, 125040, г. Москва, 3-я улица Ямского поля, 32; d.dybovskij@aigov.ru

Андрей Валерьевич Чукарин, кандидат фармакологических наук, директор департамента нормативного и методического обеспечения, Федеральный центр прикладного развития искусственного интеллекта, Россия, 125040, г. Москва, 3-я улица Ямского поля, 32; a.chukarin@aigov.ru

Иван Юрьевич Труфанов, заведующий лабораторией медицинских данных, Федеральный центр прикладного развития искусственного интеллекта, Россия, 125040, г. Москва, 3-я улица Ямского поля, 32; i.trufanov@aigov.ru

Поступила: 12.02.2024

Принята: 25.03.2024

Опубликована: 30.03.2024

REFERENCES

1. Rauschecker A., Rudie J., Xie L. Artificial intelligence system approaching neuroradiologist-level differential diagnostic accuracy at brain MRI. *Radiology*, 2020, vol. 295, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.1148/radiol.2020190283>
2. Eligulashvili R.R., Zarodnyuk I.V., Achkasov S.I., Belov D.M., Mikhachenko V.A., Goncharova E.P., Zapolskiy A.G., Suslova D.I., Ryakhovskaya M.A., Nikitin E.D., Filatov N.S. The use of artificial intelligence in MRI diagnostics of rectal cancer. *Koloproktologia*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 26–36. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33878/2073-7556-2022-21-1-26-36>
3. Gull S., Akbar S. Artificial intelligence in brain tumor detection through MRI scans: advancements and challenges. *Artificial Intelligence and Internet of Things*, 2021, pp. 241–276. Available at: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003097204-10/artificial-intelligence-brain-tumor-detection-mri-scans-sahar-gull-shahzad-akbar> (accessed: 21 January 2024).
4. Delaram Sadeghi, Afshin Shoeibi, Navid Ghassemi, Parisa Moridian, Ali Khadem, Roohallah Alizadehsani, Mohammad Teshnehlav, Juan M. Gorris, Fahime Khozeimeh, Yu-Dong Zhang, Saeid Nahavandi, U. Rajendra Acharya. An overview of artificial intelligence techniques for diagnosis of Schizophrenia based on magnetic resonance imaging modalities: methods, challenges, and future works. *Computers in Biology and Medicine*, 2022, vol. 146, 105554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.105554>
5. Md. Rafiul Hassan, Md. Fakrul Islam, Md. Zia Uddin, Goutam Ghoshal, Mohammad Mehedi Hassan, Shamsul Huda, Fortino G. Prostate cancer classification from ultrasound and MRI images using deep learning based Explainable Artificial Intelligence. *Future Generation Computer Systems*, 2022, vol. 127, pp. 462–472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.09.030>
6. Gleichgerrcht E., Munsell B.C., Alhusaini S., Alvim M.K.M., Bargalló N., Bender B., Bernasconi A., Bernasconi N., Bernhardt B., Blackmon K., Caligiuri M.E., Cendes F., Concha L., Desmond P.M., Devinsky O., Doherty C.P., Domin M., Duncan J.S., Focke N.K., Gambardella A., Wiest R. Artificial intelligence for classification of temporal lobe epilepsy with ROI-level MRI data: a worldwide ENIGMA-Epilepsy study. *NeuroImage: Clinical*, 2021, vol. 31, 102765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2021.102765>
7. Zhao X., Ang C., Acharya U., Cheong K. Application of Artificial Intelligence techniques for the detection of Alzheimer's disease using structural MRI images. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 2021, vol. 41, no. 2, pp. 456–473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2021.02.006>
8. Calivà F., Namiri N.K., Dubreuil M., Pedoia V., Ozhinsky E., Majumdar Sh. Studying osteoarthritis with artificial intelligence applied to magnetic resonance imaging. *Nature Reviews Rheumatology*, 2022, vol. 18, no. 2, pp. 112–121. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41584-021-00719-7>
9. Sharma A., Kumar R., Jaiswal V. Classification of heart disease from MRI images using convolutional neural network. *2021 6th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC)*. IEEE, 2021, pp. 358–363. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISPCC53510.2021.9609408>

10. Can Zhao, Muhan Shao, Aaron Carass, Hao Li, Dewey B.E., Ellingsen L.M., Jonghye Woo, Guttman M.A., Blitz A.M., Stone M., Calabresi P.A., Halperin H., Prince J.L. Applications of a deep learning method for anti-aliasing and super-resolution in MRI. *Magnetic resonance imaging*, 2019, vol. 64, pp. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mri.2019.05.038>
11. Pengfei Guo, Puyang Wang, Jinyuan Zhou, Shanshan Jiang, Patel V.M. Multi-institutional collaborations for improving deep learning-based magnetic resonance image reconstruction using federated learning. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2021, pp. 2423–2432. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.02148>
12. Montalt-Tordera J., Muthurangu V., Hauptmann A., Steeden J. Machine learning in magnetic resonance imaging: image reconstruction. *Physica Medica*, 2021, vol. 83, pp. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.02.020>
13. Foreman S.C., Neumann J., Han J., Harrasser N., Weiss K., Peeters J.M., Karampinos D.C., Makowski M.R., Gersing A.S., Woertler K. Deep learning-based acceleration of Compressed Sense MR imaging of the ankle. *European Radiology*, 2022, vol. 32, pp. 8376–8385. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00330-022-08919-9>
14. Panova L.V., Panova A.Yu. Access to modern medical technologies in Russia and Europe. *Journal of Economic Sociology*, 2020, vol. 21, no 5, pp. 58–93. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/dostupnost-sovremennyh-meditsinskih-tehnologiy-v-rossii-i-stranah-evropy> (accessed: 21.01.2024)
15. Pavlov N., Andreichenko A., Vladimirovsky A., Revazyan A.A., Kirpichev Y.S., Morozov S.P. Reference medical datasets (MosMedData) for independent external evaluation of algorithms based on artificial intelligence in diagnostics. *Digital Diagnostics*, 2021, vol. 2, no. 1, pp. 49–66. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17816/DD60635>
16. Kaledina E.A., Kaledin O.E., Kulyagina T.I. Applying machine learning for prediction of cardiovascular diseases on small data sets. *Problems of Informatics*, 2022, no. 1 (54), pp. 66–76. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24412/2073-0667-2022-1-66-76>
17. Johnson P., Recht M., Knoll F. Improving the speed of MRI with artificial intelligence. *Seminars in musculoskeletal radiology. Thieme Medical Publishers*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0039-3400265>
18. Parallel Imaging Techniques. *Siemens Healthineers*. (In Russ.) Available at: <https://www.siemens-healthineers.com/ru/magnetic-resonance-imaging/mri-technologies/mri-services/ipat> (accessed: 21 January 2024).
19. Lv J., Wang C., Yang G. PIC-GAN: a parallel imaging coupled generative adversarial network for accelerated multi-channel MRI reconstruction. *Diagnostics*, 2021, vol. 11, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/diagnostics11010061>
20. Recht M.P., Block K.T., Chandarana H., Friedland J., Mullholland Th., Teahan D., Wiggins R. Optimization of MRI turnaround times through the use of dockable tables and innovative architectural design strategies. *AJR. American Journal of Roentgenology*, 2019, vol. 212, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.2214/AJR.18.20459>
21. Smirnov A.V., Semenov D.S., Akhmad E.S., Khoruzhaya A.N. The Russian regulatory documents on the organization and functioning of offices and departments of magnetic resonance imaging. *Digital Diagnostics*, 2021, vol. 2, no. 4, pp. 453–464. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17816/DD80901>
22. Le Roy Chong, Koh Tzan Tsai, Lee Lian Lee, Seck Guan Foo, Piek Chim Chang. Artificial intelligence predictive analytics in the management of outpatient MRI appointment no-shows. *American Journal of Roentgenology*, 2020, vol. 215, no. 5, pp. 1155–1162. DOI: <https://doi.org/10.2214/AJR.19.22594>

Information about the authors

Dmitry A. Fedorov, Research Engineer, Federal Center for Applied Development of Artificial Intelligence, 32, 3rd Yamskogo Polya street, Moscow, 125040, Russian Federation. d.fedorov@aigov.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7752-1937>

Dmitry V. Dybovskiy, Deputy General Director, Federal Center for Applied Development of Artificial Intelligence, 32, 3rd Yamskogo Polya street, Moscow, 125040, Russian Federation. d.dybovskij@aigov.ru

Andrey V. Chukarin, Cand. Sc., Director of the Department of Regulatory and Methodological Support, Federal Center for Applied Development of Artificial Intelligence, 32, 3rd Yamskogo Polya street, Moscow, 125040, Russian Federation. a.chukarin@aigov.ru

Ivan Yu. Trufanov, Head of the Medical Data Laboratory, Federal Center for Applied Development of Artificial Intelligence, 32, 3rd Yamskogo Polya Street, Moscow, 125040, Russian Federation. i.trufanov@aigov.ru

Received: 12.02.2024

Revised: 25.03.2024

Accepted: 30.03.2024