

## РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫХ ТОМОГРАФОВ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ В РОССИИ

В.П. Чехонин<sup>1</sup>, М.А. Абакумов<sup>1</sup>, А.Г. Мажуга<sup>2</sup>, А.Н. Багдинова<sup>3</sup>, А.С. Рыбаков<sup>3</sup>,  
В.Н. Курдюков<sup>3</sup>, Е.И. Демихов<sup>3</sup>, Т.Е. Демихов<sup>3</sup>, В.В. Лысенко<sup>3</sup>, Б.Я. Мишкинис<sup>4</sup>,  
М.В. Константинов<sup>3</sup>, В.П. Тарасов<sup>3</sup>, Б.А. Шумм<sup>3</sup>, А.Б. Шумм<sup>3</sup>, Г.М. Пистрак<sup>3</sup>,  
А.Г. Пистрак<sup>3</sup>, Д.С. Дмитриев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Российский национальный исследовательский медицинский университет  
им. Н.И. Пирогова, Москва

<sup>2</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

<sup>3</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>4</sup> ООО "С.П. ГЕЛПИК", Москва

Представлен обзор состояния и стратегии дальнейшего развития разработок и производства магнитно-резонансных томографов в России. Описаны две модели отечественных МРТ, разработанных в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Рассмотрена рыночная ситуация с МРТ в России.

Ключевые слова: *магнитно-резонансные томографы, магнитно-резонансная томография, разработка, производство, Россия*

### Введение

Магнитно-резонансная томография представляет собой метод неинвазивного исследования внутренних органов и тканей с использованием явления ядерного магнитного резонанса. Магнитно-резонансный томограф (МРТ) позволяет получать изображения внутренних органов человека в плоскопараллельных срезах заданной толщины. Изображения, полученные с помощью МРТ, интерпретируются врачами-радиологами для ранней диагностики заболеваний у широкого круга пациентов.

МРТ имеет значительный диапазон диагностических возможностей. Современные МРТ применяются для диагностики широкого спек-

тра патологий организма человека, а именно следующих заболеваний:

- ✓ головного мозга и центральной нервной системы;
- ✓ шейного, грудного и поясничного отделов позвоночника;
- ✓ внутренних органов: сердца, легких, брюшной полости, печени, почек, органов малого таза;
- ✓ суставов конечностей;
- ✓ сосудистой системы (МР-ангиография) и др.

Для обеспечения условий использования эффекта ядерного магнитного резонанса необходимо поместить исследуемый объект в сильное постоянное и однородное магнитное поле и подвергнуть воздействию дополнительного высокочастотного поля. При определенной частоте высокочастотного поля возникает явление

ние резонанса, при котором ядра химических элементов поглощают энергию и переходят на более высокий энергетический уровень. После прекращения действия высокочастотного импульса возбужденные им ядра возвращаются в исходное состояние. Во время этого процесса, называемого релаксацией, резонировавшие ядра излучают слабые электромагнитные волны. Регистрация и компьютерная обработка этих сигналов позволяет построить срезы изображения человеческого тела в заданной плоскости. Магнитно-резонансная томография позволяет получить как анатомические, так и физико-химические характеристики тканей и четко отличить здоровые ткани от поврежденных.

Сейчас не подлежит сомнению, что магнитно-резонансная томография является одним из наиболее точных, безопасных и информативных методов современной диагностики.

### Оснащенность лечебных учреждений МРТ

Магнитно-резонансные томографы, применяемые в медицинской диагностике, можно разделить на два основных типа:

- ✓ высокопольные томографы с магнитной индукцией от 1,0 до 3,0 Тл на базе сверхпроводящих магнитов;
- ✓ МР томографы на основе постоянных и резистивных магнитов с магнитной индукцией от 0,2 до 0,6 Тл (имеют большой вес от 12 тонн и выше, долгое время сканирования, что уменьшает поток пациентов).

В данной статье будут рассматриваться сверхпроводящие высокопольные магнитно-резонансные томографы, т.к. данное направление является одним из лидирующих и передовых методов в современной диагностике.

Крупные компании производят МР системы с магнитной индукцией 1,5 и 3,0 Тл. В последних версиях МРТ комплексов применяются цифровые технологии как для передачи полученных сигналов при исследовании, так и для обработки диагностического изображения.

Если рассматривать текущую инсталляционную базу МР-систем в России по крупным компаниям, то она в среднем составляет:

- ✓ GE – свыше 800;
- ✓ Siemens – свыше 400;
- ✓ Philips – свыше 400;
- ✓ Canon-Toshiba – свыше 100;
- ✓ Hitachi – до 100.

Потребность МРТ на население составляет: 1 МРТ – на 50–75 тыс. человек. Население России сейчас составляет 147 млн. человек. Для обеспечения диагностического процесса требуется не менее 3 тыс. МР томографов. Эти данные подтверждаются Минздравом.

Кроме того, для специализированных медучреждений в научных целях существует необходимость в оборудовании со специальными расширенными функциями, и эта потребность составляет от 500 МРТ.

Ежегодно для удовлетворения этих потребностей у иностранных компаний закупается от 50 до 100 магнитно-резонансных томографов, что составляет среднюю стоимость закупок на сумму порядка 150 млн евро (11,25 млрд. руб.) в год.

Импортные МРТ являются достаточно дорогостоящими как при производстве, так и в период эксплуатации. Если стоимость МР системы, расходы на её доставку, установку и эксплуатацию перевести на стоимость одного среднего исследования, то, согласно средним тарифам на МР-исследования по Европе, оно составляет от 1 200 до 1 500 евро (90–112,5 тыс. руб.). На текущий момент в России средняя стоимость исследования в коммерческом диагностическом центре составляет от 3 500 до 6 000 руб.

### Отечественный МРТ. Что лучше?

Встает вопрос – почему такая низкая стоимость исследования при использовании дорогостоящего оборудования? Здесь нужно рассмотреть два случая: бюджетные медучреждения и коммерческие диагностические центры. В бюджетных учреждениях используется, как правило, новая МРТ-техника, закупленная за бюджетные деньги.

Ответ на поставленный вопрос прост:

- ✓ В первом случае имеет место поддержка бюджетных медучреждений со стороны государства (выделение средств на приобретение и эксплуатацию МР томографов);
- ✓ Во втором случае происходит частичная трансформация российской медицины в страховую коммерческую структуру и появление коммерческой составляющей в бюджетных учреждениях.

Это означает, что фактически низкая стоимость обследования оплачивается госу-

дарством и частично коммерческими поступлениями бюджетных клиник. Российские граждане не в состоянии оплачивать реальную стоимость МРТ-диагностики, которая определена с учетом всех затрат и равна стоимости диагностики в западных странах, а страховая медицина покрывает эти услуги только частично.

Частные диагностические центры используют, в подавляющем большинстве случаев, восстановленное МРТ-оборудование, которое, как правило, имеет ресурс около 5 лет, при условии хорошего обслуживания. Рентабельность МРТ-диагностики определяется в этом случае наличием, кроме МРТ, других возможностей заработка, при которых МРТ служит показателем солидности и привлекает клиентов.

На данном этапе получается замкнутый круг, приобретение дорогостоящего импортного оборудования из бюджетных средств стоимостью, включая инфраструктуру, около 1,5 млн евро (свыше 125 млн руб.), плюс эксплуатационные расходы, в среднем от 1 млн до 5 млн руб. в год, не позволяют сделать МРТ-исследования доступными для широкого круга населения, а частные диагностические МРТ-центры, если не входят в состав крупных частных клиник, не покрывают своих расходов и закрываются, тем самым снижая доступность диагностических услуг для граждан.

Тенденция, сложившаяся на рынке медицинских услуг и крупного медицинского оборудования, приводит к тому, что необходимо организовывать и выпускать МРТ-оборудование высокого класса внутри страны по значительно более низким, чем у западных фирм, ценам. Опыт последних лет показывает, что это невозможно выполнить без государственной поддержки по нескольким объективным причинам:

- ✓ частный бизнес не испытывает желания делать долгосрочные инвестиции в производство российских МР томографов, т.к. первые дивиденды от вложений появятся на 3–5 году после инвестиций;
- ✓ разработка и производство такого типа оборудования требует значительных вложений (по данным руководителя отдела разработок General Electric Др. Джарвиса, стоимость разработок одной новой модели МРТ составляет 20 млн. долларов США = 1,4 млрд. рублей), учитывая тот фактор, что разработанное и произведенное оборудование должно опередить или по крайней мере быть конкурентоспособно по своим пара-

метрам по сравнению с импортными аналогами.

Если перевести в цифры то затраты на разработку и создание производства на начальном этапе составят не менее 5–9 млн. евро (до 750 млн. на одну выпускаемую модель), соответственно, минимальная партия должна составить не менее 10 МР томографов в год на стартовом этапе.

В случае перенаправления этих средств на создание и развитие производства МР томографов в России можно получить следующие предпочтения:

- ✓ создание новых высокотехнологичных производств и новых рабочих мест (до 1 тыс. дополнительных рабочих мест в Москве и Новой Москве);
- ✓ производство магнитно-резонансных томографов, удовлетворяющих современным медицинским и диагностическим требованиям;
- ✓ снижение закупочной и эксплуатационной стоимости МР-томографов;
- ✓ как следствие снижение стоимости исследований и удовлетворение потребностей населения в оказании диагностических услуг.

### Отечественные высокопольные МРТ

Несмотря на финансовые сложности, у российских разработчиков существует значительный интерес к созданию отечественных МРТ. Межведомственный творческий коллектив под руководством академика В.П. Чехонина (Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова) и проф. Е.И. Демихова (Физический институт им. П.Н. Лебедева в сотрудничестве с коммерческими компаниями ООО “НПО РТИ” и ООО “С.П. Гелпик” создали первые отечественные высокопольные (с полем 1,5 Тл) магнитно-резонансные томографы МРТ4.1 и “Эверест”, которые по многим параметрам превосходят зарубежные аналоги и продемонстрировали конкурентоспособные эксплуатационные характеристики и удобство в работе. МРТ4.1 – это полноразмерный сверхпроводящий томограф туннельного типа (рис. 1), “Эверест” – малогабаритный ортопедический томограф на сверхпроводящем магните с безгелиевым охлаждением (рис. 2).

Также создано и зарегистрировано отечественное программное обеспечение (ПО), которое позволяет получать томограммы высокой



**Рис. 1.** Магнитно-резонансный сверхпроводящий томограф МРТ4.1 с магнитной индукцией 1,5 Тл



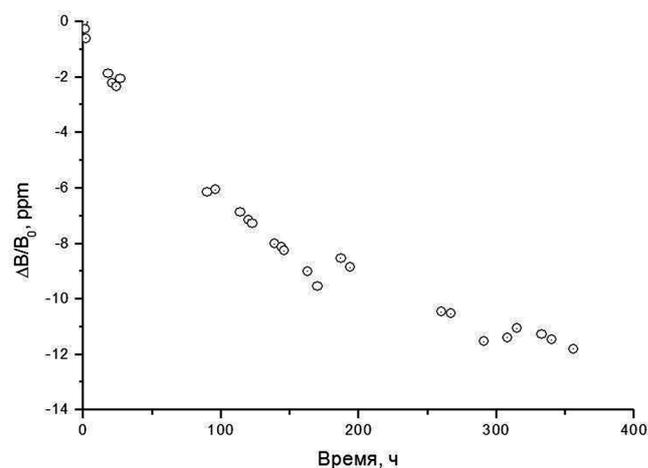
**Рис. 3.** Снимки колена с различной толщиной срезов, полученные на томографе “Эверест”



**Рис. 2.** Ортопедический сверхпроводящий магнитно-резонансный томограф “Эверест” с магнитной индукцией 1,5 Тл и безгелиевым охлаждением

точности, не уступающие зарубежным аналогам. При помощи томографа Эверест можно получить изображения высокого качества с различной толщиной слоя сканирования и ориентацией плоскости сечения (рис. 3).

На рис. 4 показана зависимость относительного изменения магнитного поля по отношению к полю в центре магнита от времени ( $\Delta B/B$ ). Временная стабильность представляет собой очень важную величину, которая характеризует качество получаемых томограмм и определяет стабильность работы МРТ. Кривая показывает, что  $\Delta B/B$  выходит на насыщение приблизительно через 300 ч работы. При этом временные изменения магнитного поля



**Рис. 4.** Изменения магнитного поля по отношению к полю в центре магнита в зависимости от времени работы томографа

позволяют не более чем на 0,01 ppm. Для МРТ4.1 этот параметр превосходит параметры западных производителей.

Высокая точность томограмм обеспечивается использованием инновационных железистых наноконтрастов со средствами адресной доставки, которые обладают свойствами жидких кристаллов [1, 2]. Применение контрастных средств для МРТ прочно вошло в клиническую практику врачей-рентгенологов по всему миру. На сегодняшний день все контрастные средства, применяемые в клинической практике, основаны на использовании парамагнитных ионов гадолиния, связанных низкомолекулярными лигандами, которые уменьшают их токсичность и увеличивают время циркуляции в крови. Такие контрастные агенты увеличивают интенсивность сигнала в области накопления за счет сокращения времени релаксации  $T_1$ . Принципиально другим типом контрастных агентов являются вещества на основе наночастиц оксида железа. Данные препараты снижают время релаксации  $T_2$  и интенсивность сигнала, таким образом являясь “негативными” контрастными средствами. Среди отдельных преимуществ  $T_2$ -контрастных средств можно отметить следующие:

1. Использование биосовместимого и биоразлагаемого оксида железа вместо экзогенного и токсичного в свободной форме гадолиния.
2. В десятки раз превосходящие аналоги значения релаксивности для  $T_2$ -контрастных средств, что позволяет существенно снизить дозу вводимого в организм препарата.
3. Увеличенное время циркуляции в крови.
4. Пассивное накопление в опухолях за счет эффекта повышенной проницаемости и удержания, свойственного только для наночастиц.

Следует отметить, что ранее уже была предпринята попытка вывода на рынок контрастного агента на основе наночастиц оксида железа, однако несовершенство химического дизайна и узкая направленность на патологии печени привели к выходу препарата с рынка. Тем не менее, по сей день большое количество препаратов на основе наночастиц постоянно разрабатывается, что подтверждает актуальность и перспективность их использования в медицинской практике. Использование наноконтрастов и программного обеспечения позволяет улучшать пространственное разрешение до 0,4 мм.

Томографы МРТ4.1 и “Эверест” обладают целым рядом преимуществ [3–9]:

1. Достоинством томографа МРТ4.1 является инновационная система криогенного охлаждения, которая позволяет работать 5 лет без добавления жидкого гелия.
2. Разработана революционная технология безгелиевых томографов на примере ортопедического томографа “Эверест”. Эта технология позволяет снизить издержки на производство МРТ на 20 % без использования дорогостоящего жидкого гелия. МРТ “Эверест” является на данный момент единственным в мире безгелиевым томографом.
3. Собственное программное обеспечение высокого уровня, которое включает рабочее место врача. Это ПО позволяет проводить обработку данных и оперативно сравнивать их с результатами других методик медицинской визуализации.
4. Потребительские свойства: МРТ4.1 и “Эверест” – это малошумящие томографы с акустическим шумом в 1 тыс. раз ниже, чем у конкурентов. Это важное свойство делает сканирование томограмм комфортным для пациента.
5. Предлагаемая цена созданных МРТ в два раза ниже, чем стоимость западных аналогов. Аналогов томографа “Эверест” на данный момент не существует.
6. Кроме медицины, томограф “Эверест” может применяться в геологоразведке нефтяных месторождений и ветеринарии в составе мобильных поисковых комплексов. Безгелиевые МРТ особенно важны для малых городов России, где отсутствует инфраструктура доставки и заправки дорогостоящим жидким гелием.
7. МРТ4.1 и “Эверест” – это единственная отечественная разработка МРТ с полем 1,5 Тл. Технически, технологически, организационно, по уровню программного обеспечения коллектив готов к началу производства с годовым оборотом до 6–10 млрд. рублей, что позволит заполнить рынок МРТ России и других стран (Китай, Индия, Иран, Ближний Восток, СНГ и др).

Ниже приведен проект создания и развития выпускаемого МРТ оборудования на основании опыта, полученного при создании экспериментальной и действующей модели МР томографа МРТ4.1 с технологией рекуперации жидкого гелия (технология Zero boiloff helium), созданного в ФИАН им. П.Н. Лебедева.

## Стратегия развития

- ✓ Сегментация рынка потребностей в МР томографах по напряженности и функционалу.
- ✓ Создание производства и линейки конкурентоспособных МР томографов удовлетворяющих текущим диагностическим потребностям медучреждений.
- ✓ Плавное вытеснение и замещение импортных томографов в государственных медучреждениях (замена МР томографов с эксплуатацией выше 10 лет на новые отечественные).
- ✓ Продвижение и продажи российских МР томографов в частные диагностические центры.
- ✓ Создание и оснащение гелиевого и азотного цехов, необходимых для производства МРТ.
- ✓ Создание параллельного цеха по производству радиочастотных клеток и выпуск медицинской немагнитной и другой мебели, необходимой для оснащения МР кабинета (стеллажи для катушек, тумбы для контрастных веществ, столы оператора и для рабочей станции и т.д. в зависимости от требований и дизайнерского решения в больнице).

Портфолио серии МР томографов, планируемых к производству:

- ✓ Серия сверхпроводящих МР томографов МРТ4.1 с полем 1,5 Тл с применением цифровых технологий (на базе экспериментальной модели). Сфера применения – текущие потребности диагностических медицинских услуг для населения.
- ✓ Сверхпроводящий МР томограф с магнитной индукцией 2,0 Тл, с технологией 4К и с использованием малого количества гелия не более 100–200 л (полный объем гелия при полном погружении магнита в жидкий гелий около 1 500 л) (зарубежные аналоги используют до 100 л при стабильной работе МРТ) или с применением технологии HeliumFree cooling – безгелиевой технологии. Сфера применения – со временем заменить МРТ4.1.
- ✓ Безгелиевый открытый сверхпроводящий МР томограф для конечностей с полем 1,0 Тл (на базе экспериментального тоннельного безгелиевого томографа “Эверест”).

Использование этого подхода при инвестициях около 1 млрд. руб. позволит создать конкурентоспособное производство отечественных МРТ, которое чрезвычайно актуально

в условиях современной международной обстановки.

## Выводы

Недостаточное оснащение лечебных учреждений МРТ можно ликвидировать только через развитие собственного производства и разработок МРТ. Описанные отечественные МРТ не уступают западным по качеству изображения. Необходимо дальнейшее развитие разработок и создание производства в области высокопольных магнитно-резонансных томографов.

## Список литературы

1. Demikhov E.I., Dolganov V.K., Filev V.M. Pretransitional anomalies in the rotation of the plane of polarization of light in ferroelectric liquid-crystals // JETP Letters. 1983. Vol. 37. № 7. P. 361–365.
2. Demikhov E.I., Stegemeyer H., Blumel T. Domain growth laws for the phase ordering of chiral liquid-crystals // Physical Review E. 1994. Vol. 49. № 6. P. R4787–R4790.
3. Demikhov E.I., Kostrov E.A., Lysenko V.V. et al. 8 T cryogen free magnet with a variable temperature insert using a heat switch // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2010. Vol. 20. № 3. P. 612–615.
4. Demikhov T.E., Kostrov E.A., Lysenko V.V. et al. 9 T NbTi cryogen free HTS test stand // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2012. Vol. 22. № 3. Article number: 9501004.
5. Bagdinov A.V., Demikhov E.I., Kostrov E.A. et al. Performance test of 1.5 T cryogen-free orthopedic MRI magnet // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2018. Vol. 28. № 3. Article number: 4400704.
6. Kostrov E.A., Demikhov E.I., Bagdinov A.V. et al. Magnetic field operation and shielding of a G-M cryocooler // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2016. Vol. 26. № 4. Article number: 0601305.
7. Rybakov A.S., Bagdinov A.V., Demikhov E.I. et al. 1.5 T cryogen free superconducting magnet for dedicated MRI // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2016. Vol. 26. № 4. Article number: 4400403.
8. Наумов П.Г., Любутин И.С., Фролов К.В., Демихов Е.И. Криостат замкнутого цикла для оптической и мёссбауэровской спектроско-

- пии в диапазоне температур 4.2–300 К // ПТЭ. 2010. № 5. С. 158–164.
9. Antonova L.Kh., Borovitskaya I.V., Gorshkov P.V. et al. Effect of shock waves on the current-carrying properties of HTSC YBCO(123) tape // Doklady Physics. 2009. Vol. 54. № 10. P. 463–465.

### MAGNETIC RESONANCE IMAGING WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION

V.P. Chekhonin<sup>1</sup>, M.A. Abakumov<sup>1</sup>, A.G. Mazhuga<sup>2</sup>, A.N. Bagdinova<sup>3</sup>, A.S. Rybakov<sup>3</sup>, V.N. Kurdyukov<sup>3</sup>, E.I. Demikhov<sup>3</sup>, T.E. Demikhov<sup>3</sup>, V.V. Lysenko<sup>3</sup>, B.Ya. Mishkinis<sup>4</sup>, M.V. Konstantinov<sup>3</sup>, V.P. Tarasov<sup>3</sup>, B.A. Shumm<sup>3</sup>, A.B. Shumm<sup>3</sup>, G.M. Pistrak<sup>3</sup>, A.G. Pistrak<sup>3</sup>, D.S. Dmitriev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Pirogov Russian National Research Medical University (RNRMU), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

<sup>3</sup> P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>4</sup> S.P.HELPIC, Moscow, Russia

The review of the state and strategy of development and production of magnet resonance imaging systems in Russia is presented. Two models of first-in-Russian MRI developed at the P.N. Lebedev Institute of the Russian Academy of Sciences are described. The market situation with MRI in Russia is discussed.

Key words: *magnetic resonance tomography, magnetic resonance imaging, MRI, nuclear magnetic resonance, medical visualization*

E-mail: [anna.bagdinova@gmail.com](mailto:anna.bagdinova@gmail.com)