

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 617-7

МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫЙ ТОМОГРАФ НА ОСНОВЕ КОМПАКТНОГО
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО МАГНИТА

© 2019 г. А. Н. Багдинова^{a,*}, В. П. Чехонин^b, М. А. Абакумов^b, А. Г. Мажуга^c,
А. С. Рыбаков^a, Е. И. Демихов^{a,**}, Т. Е. Демихов^a, В. В. Лысенко^a

*e-mail: anna.bagdinova@gmail.com

**e-mail: edemikhov@gmail.com

Поступила в редакцию 21.09.2018 г.

После доработки 21.09.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

DOI: 10.1134/S0032816219020198

Компактный магнитно-резонансный томограф “Эверест” (рис. 1а) разработан на основе сверхпроводящего магнита, охлаждаемого криорефрижератором по кондуктивной схеме охлаждения [1–6]. Томограф “Эверест” предназначен для получения изображений с использованием явления ядерного магнитного резонанса в плоскопараллельных срезах в трех основных сечениях (аксиальном, сагиттальном и коронарном) и в сечениях с углом наклона до 45°.

Томограф применяется в таких областях, как: медицинская диагностика конечностей, доклинические исследования (на животных) для отработки диагностических программ и новых технологий, в качестве обучающего оборудования в профильных учебных заведениях, в геологоразведке нефти для визуализации содержания нефти в шурфах.

В области медицинской диагностики томограф “Эверест” позволяет визуализировать и исследовать внутренние структуры конечностей и суставов человека: голени, коленного сустава, стопы, лодыжки, локтевого сустава, запястья, кисти. Томограф имеет туннельную конструкцию с отверстием для размещения исследуемого объекта диаметром 200 мм и длиной 600 мм. Рабочая зона сканирования представляет собой сферу диаметром 160 мм.

Томограф “Эверест” обеспечивает получение изображений с помощью основных импульсных последовательностей: 2D градиентное эхо, 2D спин-эхо, 3D градиентное эхо, турбо-спин-эхо, мультиэхо, инверсия–восстановление. Томографический комплекс включает в себя: криомаг-

нитную систему замкнутого цикла со сверхпроводящим магнитом; градиентно-шиммирующий модуль (максимальный градиент 15 мТл/м, время переключения 500 мкс) с модулем пассивного шиммирования, служащим для подстройки однородности магнитного поля; комплект радиочастотных катушек; стойку обеспечения с радиочастотным усилителем мощности и блоком усилителей градиентов; цифровой спектрометр с промежуточным преобразованием частоты и возможностью модуляции по частоте, фазе и амплитуде; компьютерный комплекс на базе персонального компьютера со специализированным программным обеспечением; радиочастотную клетку-экран (клетку Фарадея), служащую для подавления радиопомех, воспринимаемых по эфиру приемными катушками томографа.

Сверхпроводящий магнит представляет собой систему из восьми концентрических катушек, намотанных проводником на основе сплава ниобий-титан. Все катушки соединены последовательно и запитаны общим током. Максимальная индукция на сверхпроводящей обмотке составляет 3.3 Тл. Магнит является активно-экранированным: две наружные катушки включены по току навстречу остальным и подавляют рассеянное магнитное поле. Расстояние от центра магнитной системы до поверхностей с уровнем индукции 0.5 мТл составляет не более 1.6 м по всем трем осям координат. После процедуры запуска сверхпроводящий магнит работает в короткозамкнутом режиме, при этом “замороженное” магнитное поле затухает со скоростью менее $2 \cdot 10^{-6} \%$ /ч. Столь высокая стабильность поля позволяет магниту автономно функционировать в течение нескольких лет. Для изготовления тоководов использованы высокотемпературные сверхпроводники производства фирмы SuperPower (USA) на основе соединения I-Ba-Cu-O [7].

^a Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, Москва

^b Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Россия, Москва

^c Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, Москва

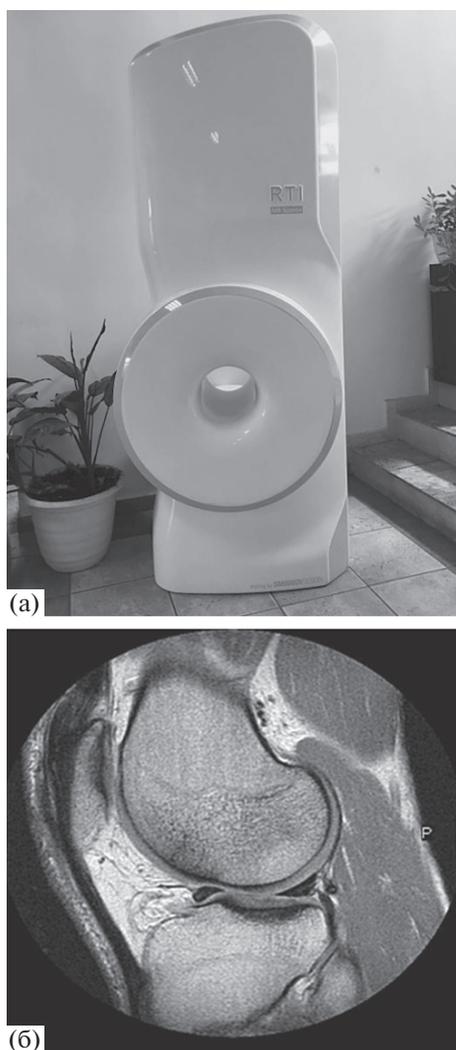


Рис. 1. Внешний вид магнитно-резонансного томографа для ортопедии (а) и образец снимка колена, полученный на этом томографе (б).

Сверхпроводящий магнит размещен в компактном гелиевом криостате “нулевого парения”, обеспечивающем его долговременную работу без подлива жидкого гелия за счет использования двухступенчатого криорефрижератора. Первая ступень криорефрижератора используется для охлаждения теплового экрана, а холодопроизводительность его второй ступени — для реконденсации паров испарившегося жидкого гелия. Это обеспечивает рабочую температуру сверхпроводящих обмоток ниже 4.5 К. Общий теплоприток к гелиевому контейнеру криостата составляет менее 0.5 Вт.

В конструкции применен криорефрижератор SRP-082В компании Sumitomo холодопроизводительностью 1 Вт при 4.2 К. Это криорефрижератор типа “пульсационная труба”, он обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с распространенными криорефрижераторами Гиф-

форда–МакМагона, а именно более длительным сроком службы и низким уровнем вибраций и электромагнитных помех.

Созданное программное обеспечение позволяет получать изображения хорошего качества (рис. 1б) со следующими характеристиками: минимальная толщина слоя — 3 мм в режимах 2D и 1 мм в режиме 3D; размер матрицы изображения — от 64×64 до 512×512 ; число одновременно получаемых срезов — 24 в режимах 2D и 36 в режиме 3D; ориентация плоскости сечения — аксиальная, сагитальная, фронтальная, наклонная с углом наклона до 45° .

Стабильная работа томографа продемонстрирована в течение более чем пяти лет.

Основные технические характеристики. Напряженность магнитного поля 1.5 Тл; диаметр рабочей зоны 160 мм; удаление линии 0.5 мТл от центра по радиусу — 1.2 м, по оси — 1.6 м; градиент 15 мТл/м; рабочая частота 64 МГц; потребление энергии 8 кВт. Масса 800 кг; габариты (ш×г×в) $600 \times 600 \times 2000$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Demikhov T.E., Kostrov E.A., Lysenko V.V., Demikhov E.I., Piskunov N.A. // IEEE transactions on applied superconductivity. 2012. V. 22. № 3. Article number 9501004. doi 10.1109/TASC.2011.2178994
2. Demikhov E.I., Kostrov E.A., Lysenko V.V., Piskunov N.A., Troitskiy V.F. // IEEE transactions on applied superconductivity. 2010. V. 20. № 3. P. 612. doi 10.1109/TASC.2010.2041592
3. Bagdinov A.V., Demikhov E.I., Kostrov E.A., Lysenko V.V., Piskunov N.A., Rybakov A.S., Tsyachnykh Y.V. // IEEE transactions on applied superconductivity. 2018. V. 28. № 3. Article number 4400704. doi 10.1109/TASC.2017.2784402
4. Kostrov E.A., Demikhov E.I., Bagdinov A.V., Demikhov T.E., Lysenko V.V., Tsyachnykh Y.V. // IEEE transactions on applied superconductivity. 2016. V. 26. № 4. Article number 0601305. doi 10.1109/TASC.2016.2522821
5. Rybakov A.S., Bagdinov A.V., Demikhov E.I., Kostrov E.A., Lysenko V.V., Piskunov N.A., Tsyachnykh Y.V. // IEEE transactions on applied superconductivity. 2016. V. 26. № 4. Article number 4400403. doi 10.1109/TASC.2016.2517328
6. Наумов П.Г., Любутин И.С., Фролов К.В., Демихов Е.И. // ПТЭ. 2010. № 5. С. 158.
7. Antonova L.Kh., Borovitskaya I.V., Gorshkov P.V., Demikhov E.I., Ivanov L.I., Krokhin O.N., Mikhailova G.N., Menushenkov A.P., Nikulin V.Ya., Oginov A.V., Podlivaev A.I., Pokrovskii S.V., Rudnev I.A., Troitskii A.V. // Doklady physics. 2009. V. 54. № 10. P. 463. doi 10.1134/S1028335809100061

Адрес для справок: Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН; Демихов Е.И., тел 8(499) 135-41-74, e-mail: edemikhov@gmail.com