

## СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ КВАНТОВЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ДЛЯ МАГНИТОЭНЦЕФАЛОГРАФИИ И МАГНИТОКАРДИОГРАФИИ

Ю. В. Масленников<sup>1,5</sup>, М. И. Фалей<sup>1,2,4</sup>, И. А. Герасимов<sup>4</sup>, В. Ю. Слободчиков<sup>1,5</sup>, В. П. Кошелец<sup>1</sup>,  
С. П. Наурзаков<sup>3</sup> и А. П. Гребенкин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 101999, Москва, Россия

<sup>2</sup>Исследовательский центр Юлих, Германия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва, Россия

<sup>4</sup>The Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

<sup>5</sup>ООО «НПО КРИОТОН», 142190, Москва, Троицк, Россия

[cryoton@inbox.ru](mailto:cryoton@inbox.ru)

Приводятся результаты экспериментов по измерению магнитокардиограмм и магнитоэнцефалограмм человека с помощью высокочувствительных сверхпроводящих квантовых интерферометров – СКВИДов - на основе низкотемпературных (НТСП) с рабочей температурой 4.2 К и высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с рабочей температурой 77 К. Метод представляет интерес для ранней и неинвазивной диагностики заболеваний сердца и исследования вызванной и спонтанной активности мозга человека, как наиболее информативный метод визуализации электрических процессов, происходящих в данных органах. Проведенные тестовые измерения продемонстрировали достаточную чувствительность разработанных СКВИДов и возможность построения на их основе многоканальных магнитометрических систем с плотной упаковкой измерительных каналов для медицинской диагностики.

В настоящее время в медицине на первый план выдвигаются методы ранней и неинвазивной диагностики болезней сердца и мозга человека. Измерение и последующий анализ магнитокардиограмм (МКГ) и магнитоэнцефалограмм (МЭГ) позволяет охарактеризовать и визуализировать электрические процессы, происходящие в данных органах с временным разрешением порядка 1 миллисекунды, и использовать полученную информацию в целях медицинской диагностики.

Общеизвестно, что на сегодняшний день СКВИДы являются наиболее чувствительными датчиками магнитного потока среди существующих. Актуальными проблемами конкретных практических применений магнитометрических СКВИД-систем является переход на использование в них СКВИД-датчиков на основе высокотемпературных сверхпроводников (повышение рабочей температуры до 77 К), а в области систем гелиевого уровня охлаждения - разработка и создание многоканальных СКВИД-магнитометров, устойчиво работающих без дополнительной магнитной экранировки в условиях обычной клиники.

В настоящей работе исследования проводились по обоим направлениям, и были получены весьма обнадеживающие результаты, дающие основание предполагать возможности успешного применения подобных СКВИД-систем в биомедицине.

Так, для магнитоэнцефалографии была проектирована и создана десятиканальная магнитометрическая система, а для магнитокардиографии – двенадцатиканальная магнитометрическая система на основе СКВИДов гелиевого уровня охлаждения. Обе системы проектировались на базе концепции модульного построения биомагнитных СКВИД-систем, которая предполагала унификацию и взаимозаменяемость используемых СКВИДов, электронных блоков и программных модулей.

Разработанная и практически реализованная десятиканальная СКВИД-система была предназначена для регистрации и исследования вызванных магнитных сигналов, генерируемых в мозге человека в ответ на зрительную стимуляцию. Она включала в свой состав следующие основные элементы: стеклопластиковый криостат для жидкого гелия; измерительный зонд с семью каналами регистрации МЭГ и референтным XYZ-магнитометром; блок электроники; блок согласования с системой электронного подавления помех и 10-канальной системой сбора данных; программное обеспечение для управления режимами работы СКВИД-системы и регистрации МЭГ.

В ходе разработки и практической реализации экспериментальной магнитометрической СКВИД-системы, предназначенной для регистрации магнитных сигналов мозга, генерируемых, в частности, на сетчатке глаза человека, решались

несколько практических задач, связанных с исследованием собственных характеристик разработанной системы, выбором размеров области регистрации биомагнитных сигналов, конфигурации сетки измерений и расположения измерительного зонда для совместного использования с системой стимуляции глаза для получения вызванных ответов мозга.

В ходе проектирования МЭГ-системы были уточнены геометрические размеры приемных градиентометров второго порядка с целью оптимизации их параметров по чувствительности и пространственному разрешению. Исследования характеристик магнитометрической СКВИД-системы проводились без дополнительной экранировки в условиях воздействия промышленных электромагнитных помех.

На Рисунке 1 в качестве примера представлен фрагмент многоканальной записи магнитного сигнала в области левой глазницы испытуемого при искусственно вызванном моргании с частотой 0,5 Гц. Видно, что процессы, связанные с морганием приводят к появлению преобладающих по амплитуде низкочастотных колебаний, сравнимых с удвоенным условным периодом искусственно вызванного моргания, и, возможно, к смене режимов в альфа-ритме (отмечено на рисунке стрелками). Запись выполнена без дополнительной магнитной экранировки.

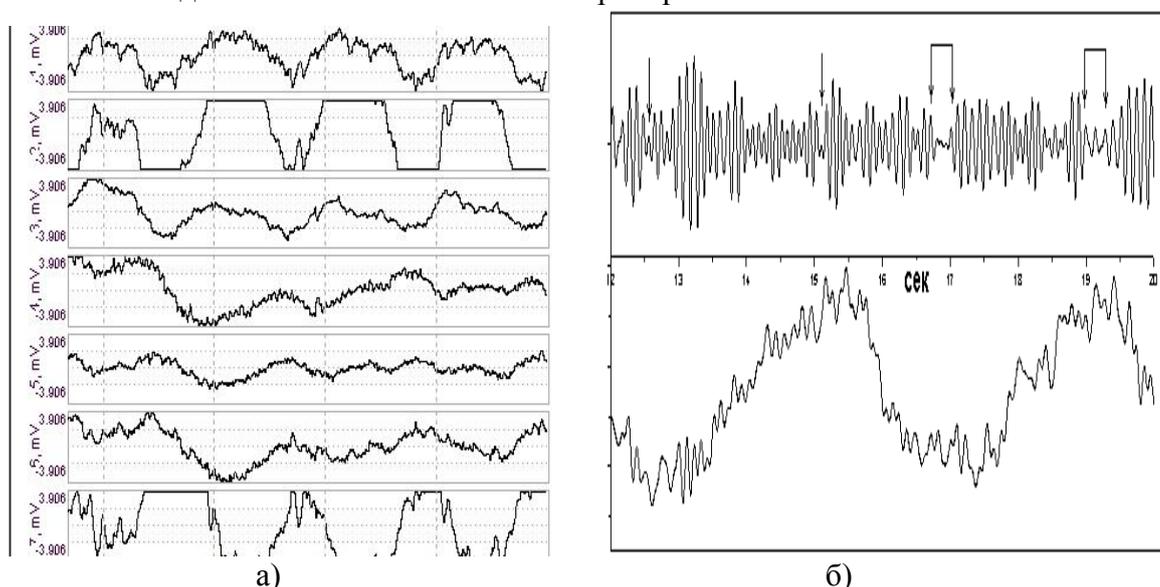
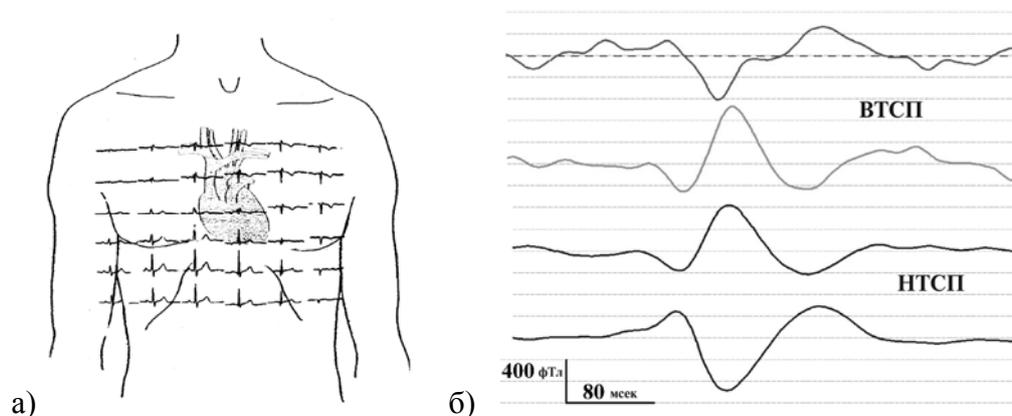


Рис. 1. а) Пример многоканальной записи Z-компоненты магнитного поля искусственно вызванного моргания с условной частотой 0,5 Гц. Сигнал зарегистрирован вблизи левой глазницы, испытуемый находится в затемненном помещении. б) канал № 6, доминируют два процесса: – интенсивные низкочастотные колебания с периодом 4 сек, и слабый альфа-ритм: - показан в верхнем окне рисунка б, увеличено в 4 раза-

Двенадцатиканальная магнитометрическая СКВИД-система для МКГ-применений имела сходную конфигурацию с системой для МЭГ, с тем отличием, что число каналов регистрации МКГ равнялось девяти, и диаметры приемных петель использованных градиентометров были увеличены с 16 до 20 мм. Система позволяла регистрировать магнитокардиограммы испытуемых в условиях обычной лаборатории с величиной отношения «сигнал/шум» более 100, что обеспечивало высокое качество дальнейшего анализа полученных МКГ-данных.

В эксперименте с высокотемпературными СКВИДами использовались сверхпроводящие квантовые интерферометры с разрешением по магнитному полю лучше, чем  $10 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$  при рабочей температуре 77 К, разработанные и изготовленные в Исследовательском центре Юлих, Германия [1, 2, 3]. Измерения проводились в магнитноэкранированной комнате с использованием электронного аксиального градиометра с базой 10 см состоящего из двух магнитометров, имевшего разрешение по

градиенту магнитного поля лучше чем  $1 \text{ фТл/см}\sqrt{\text{Гц}}$  при 77 К. Перекрестные помехи магнитометров не превышали 0.1 %. На рис. 2. представлены магнитокардиограммы измеренные ВТСП системой в 36 точках над торсом пациента и сравнение магнитоэнцефаллограмм измеренных с помощью ВТСП (77 К) и НТСП (4.2 К) измерительных систем.



**Рис. 2.** (а) Магнитокардиограммы, измеренные ВТСП системой в 36 точках (сетка 6 x 6) над торсом пациента и (б) сравнение магнитоэнцефаллограмм полученных с помощью ВТСП и НТСП систем.

Проведенные исследования продемонстрировали устойчивую работоспособность СКВИД-систем гелиевого уровня охлаждения в условиях неэкранированного пространства, достаточно высокую чувствительность систем на основе ВТСП-СКВИДов при работе в магнитноэкранированной комнате, и возможность построения многоканальных СКВИД-систем с плотной упаковкой измерительных каналов для решения задач медицинской диагностики.

1. M. I. Faley, U. Poppe, K. Urban et al., Appl. Phys. Lett. 81 2406 (2002).
2. М. И. Фалей, Ю. В. Масленников и В. П. Кошелец, Радиотехника, № 12, стр.5-26 (2012).
3. M. I. Faley, U. Poppe, R. E. Dunin-Borkowski et al., IEEE Trans Appl. Supercond. 23 1600705 (2013).

## SUPERCONDUCTING QUANTUM INTERFEROMETERS FOR MAGNETOCARDIOGRAPHY AND MAGNETOENCEPHALOGRAPHY

M. I. Faley<sup>1,2,4</sup>, I. A. Gerasimov<sup>4</sup>, V. Yu. Slobodchikov<sup>1,5</sup>, Yu. V. Maslennikov<sup>1,5</sup>, and V. P. Koshelets<sup>1</sup>  
S.P. Naurzakov<sup>3</sup>, A.P. Grebenkin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>The Kotel'nikov Institute of Radio Engineering & Electronics, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Forschungszentrum Jülich, Germany

<sup>3</sup>The National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>4</sup>The Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

<sup>5</sup>The CRYOTON Co. Ltd., Moscow, Troitsk, Russia

The results of experiments to measure magnetocardiogram and magnetoencephalogram using a highly sensitive conventional and high-temperature superconducting quantum interferometers – SQUIDs - with an operating temperatures of 4.2 K and 77 K. The method is of interest for early and non-invasive diagnosis of diseases of the heart and investigations of spontaneous and evoked activity of the human brain as the most informative method for visualizing the electrical processes occurring in these organs. The measurements showed sufficient sensitivity of SQUID-based systems for medical diagnostics and the possibility of building multi-channel systems with close packing of channels.