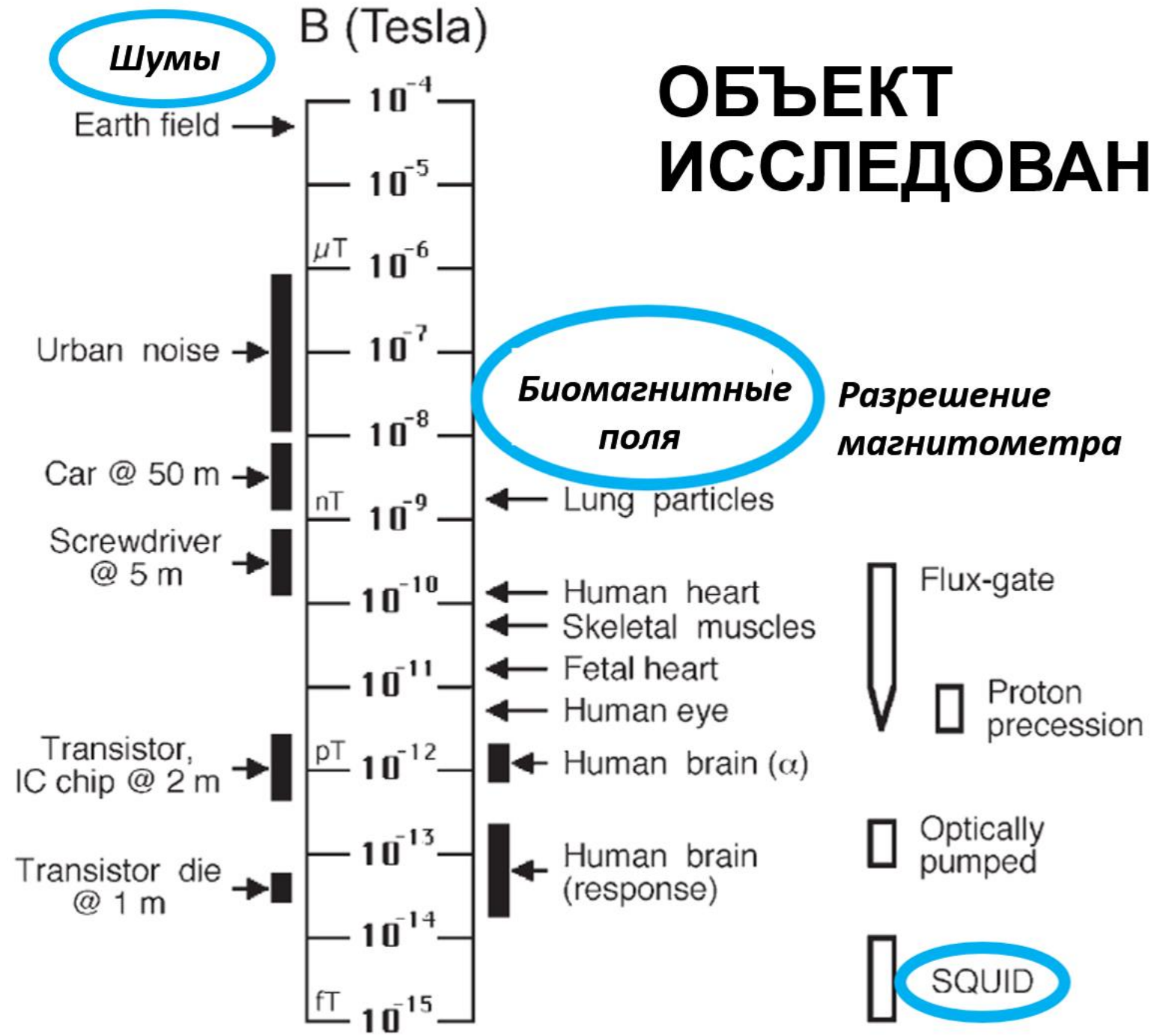


Методы изучения локальных свойств функциональной структуры человеческого тела

***Устинин М.Н., Рыкунов С.Д., Рыкунова Е.Д.,
Бойко А.И.***

ИМПБ РАН - филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ



ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ

По магнитным полям, измеренным снаружи тела, надо определить положение и зависимость от времени источников этих полей.

Функция тела, с точки зрения данного исследования, состоит в генерации магнитного поля.

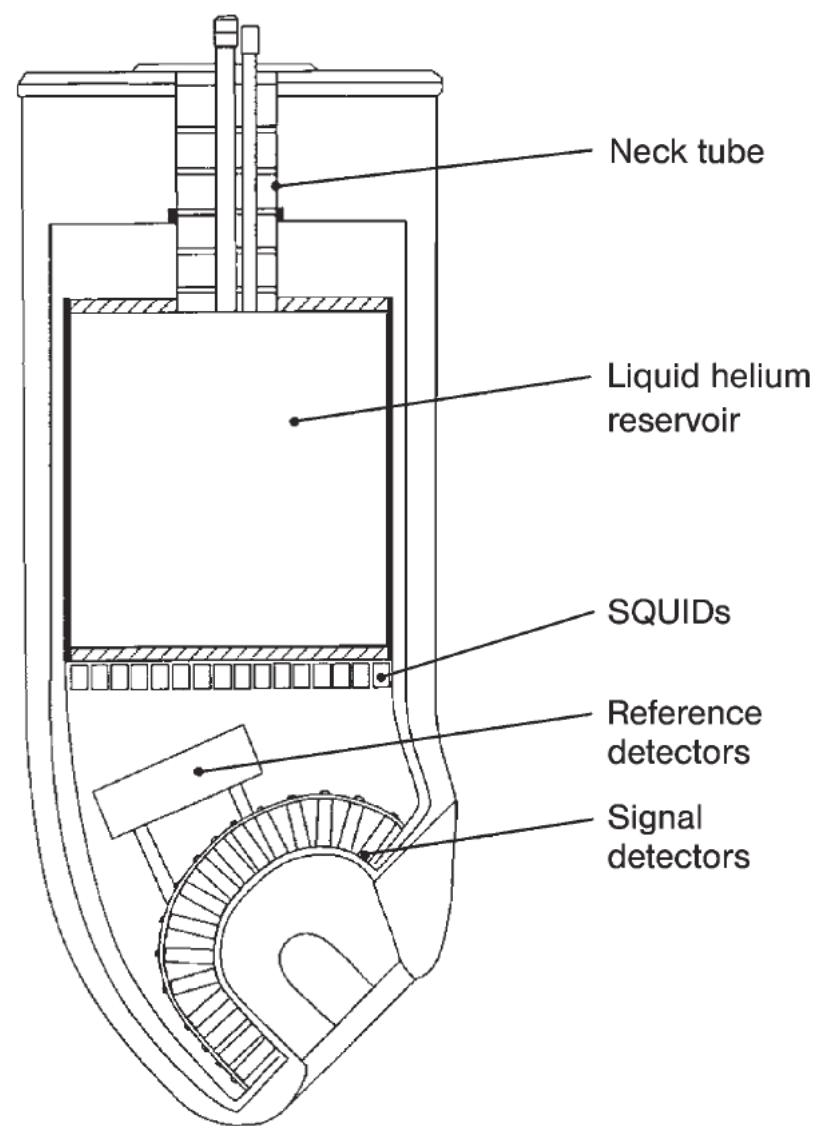
Функциональная структура тела – конфигурация источников в пространстве.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ

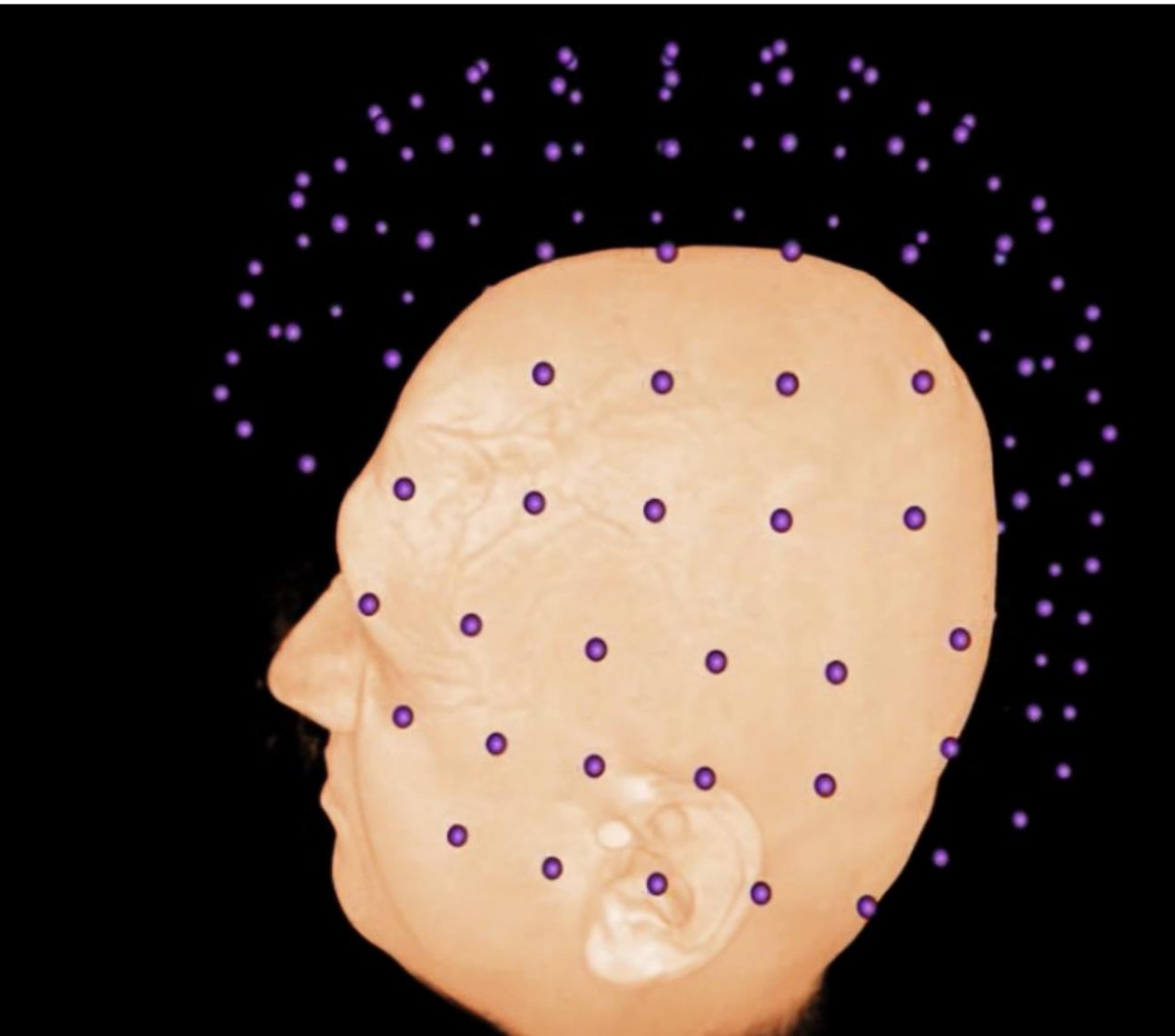
Экспериментальные данные получены на следующих установках:

- Градиометр 3-го порядка, 275 каналов, VSM Medtech, установлен в Центре нейромагнетизма Нью-Йоркского университета, США
- Градиометр 2-го порядка, 36 (9x4) каналов, НПО КРИОТОН, установлен в Институте радиотехники и электроники РАН, Москва, Россия
- Градиометр 2-го порядка, 7 каналов, НПО КРИОТОН, установлен в НИЦ «Курчатовский институт, Москва, Россия
- Методы анализа данных разработаны в Институте математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия

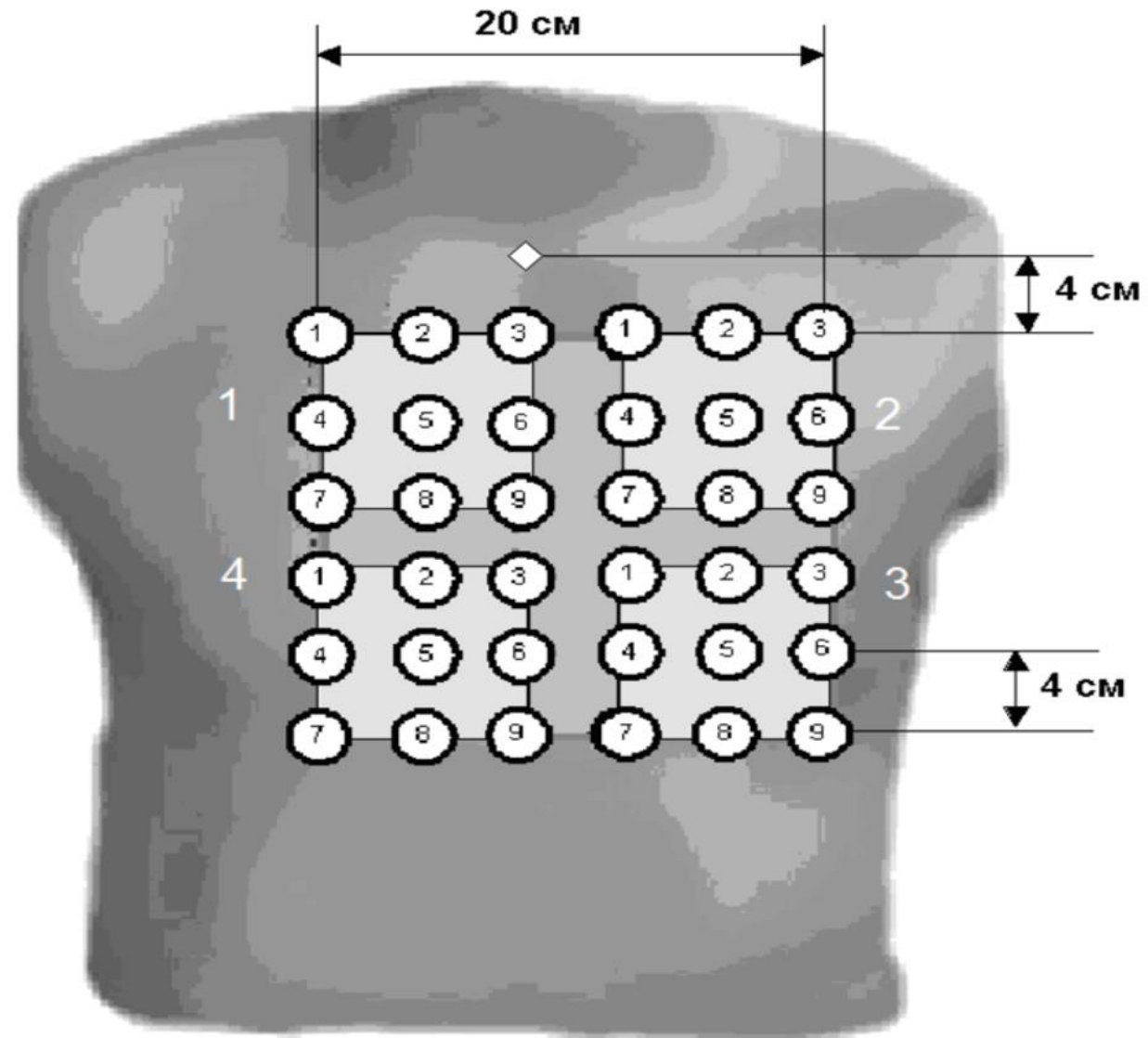
Магнитоэнцефалограф: криогенные сенсоры при температуре жидкого гелия в магнитоизолированном помещении



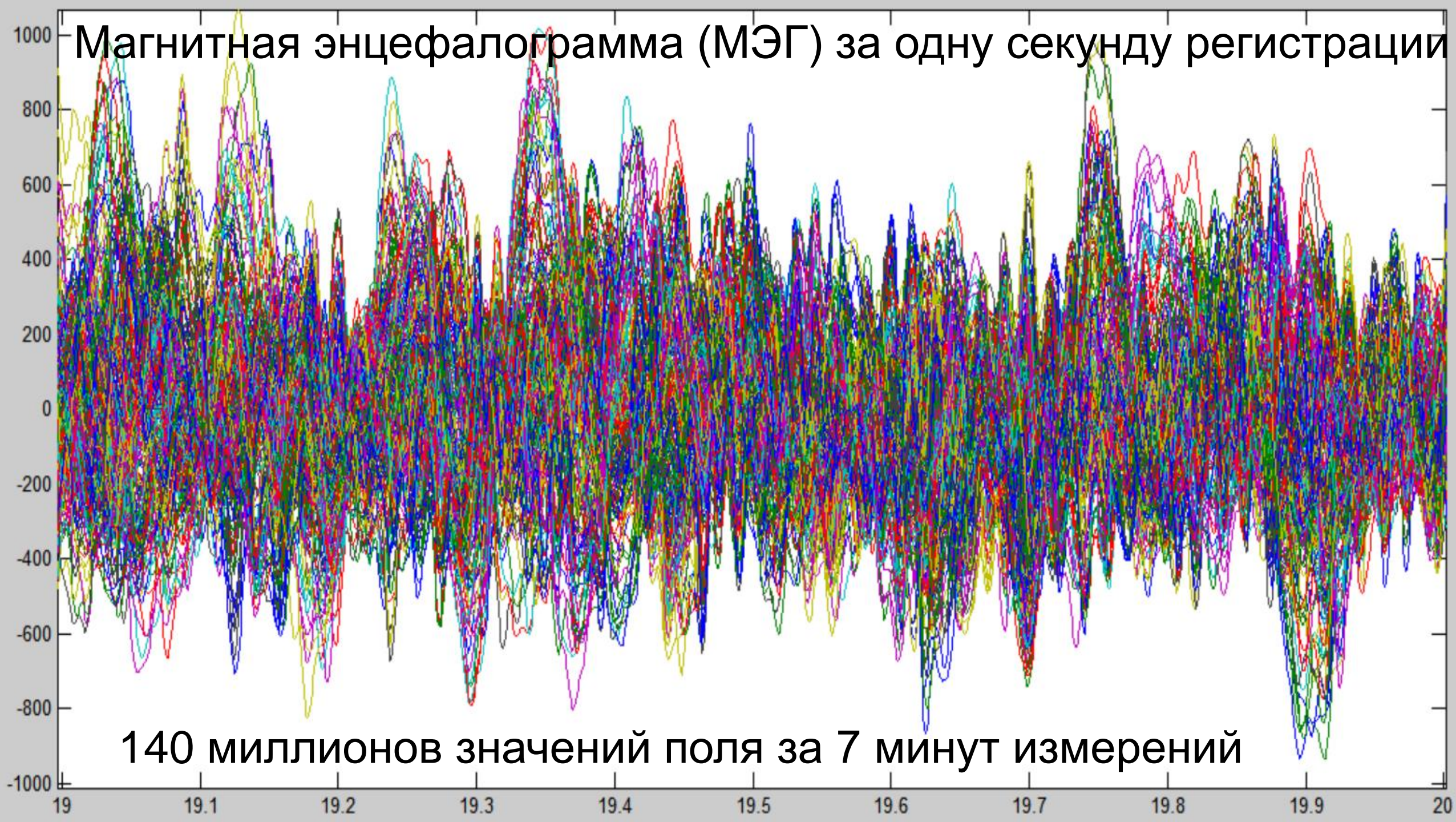
Магнитная энцефалография



Магнитная кардиография



Магнитная энцефалограмма (МЭГ) за одну секунду регистрации



140 миллионов значений поля за 7 минут измерений

Разложение экспериментальных функций $\tilde{B}_k(t)$ в многоканальные ряды Фурье

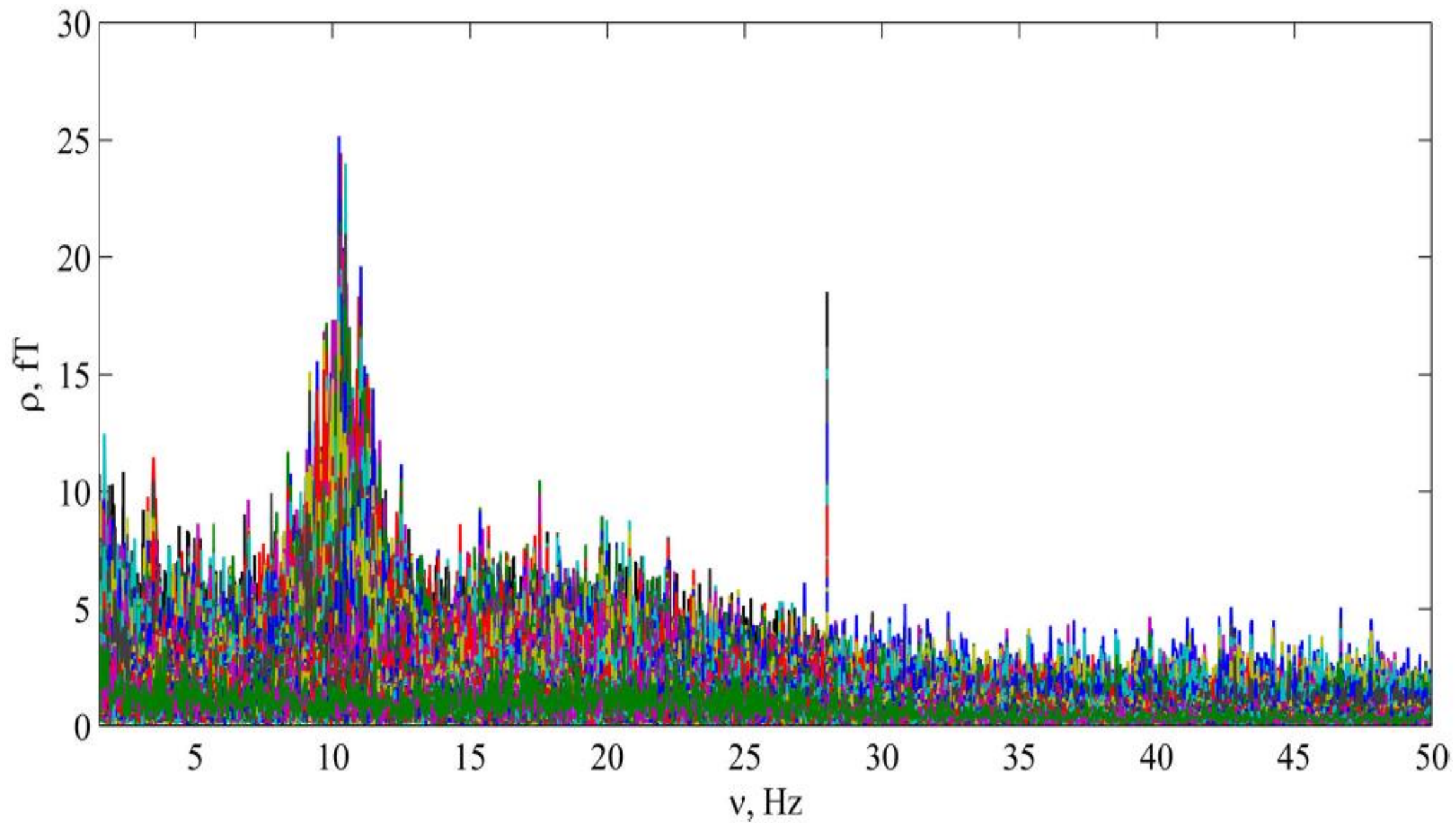
$$a_{0k} = \frac{2}{T} \int_0^T \tilde{B}_k(t) dt, \quad a_{nk} = \frac{2}{T} \int_0^T \tilde{B}_k(t) \cos(2\pi \nu_n t) dt,$$

$$b_{nk} = \frac{2}{T} \int_0^T \tilde{B}_k(t) \sin(2\pi \nu_n t) dt,$$

$$B_k(t) = \frac{a_{0k}}{2} + \sum_{n=1}^N \rho_{nk} \sin(2\pi \nu_n t + \varphi_{nk}), \quad \nu_n = \frac{n}{T}, \quad N = \nu_{\max} T,$$

$$\rho_{nk} = \sqrt{a_{nk}^2 + b_{nk}^2}, \quad \varphi_{nk} = \text{atan2}(a_{nk}, b_{nk})$$

Многоканальный спектр Фурье магнитной энцефалограммы



Обратное преобразование Фурье для каждой частоты во всех каналах:

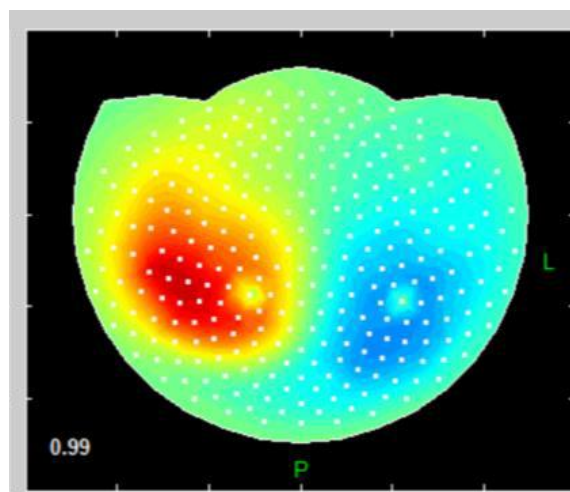
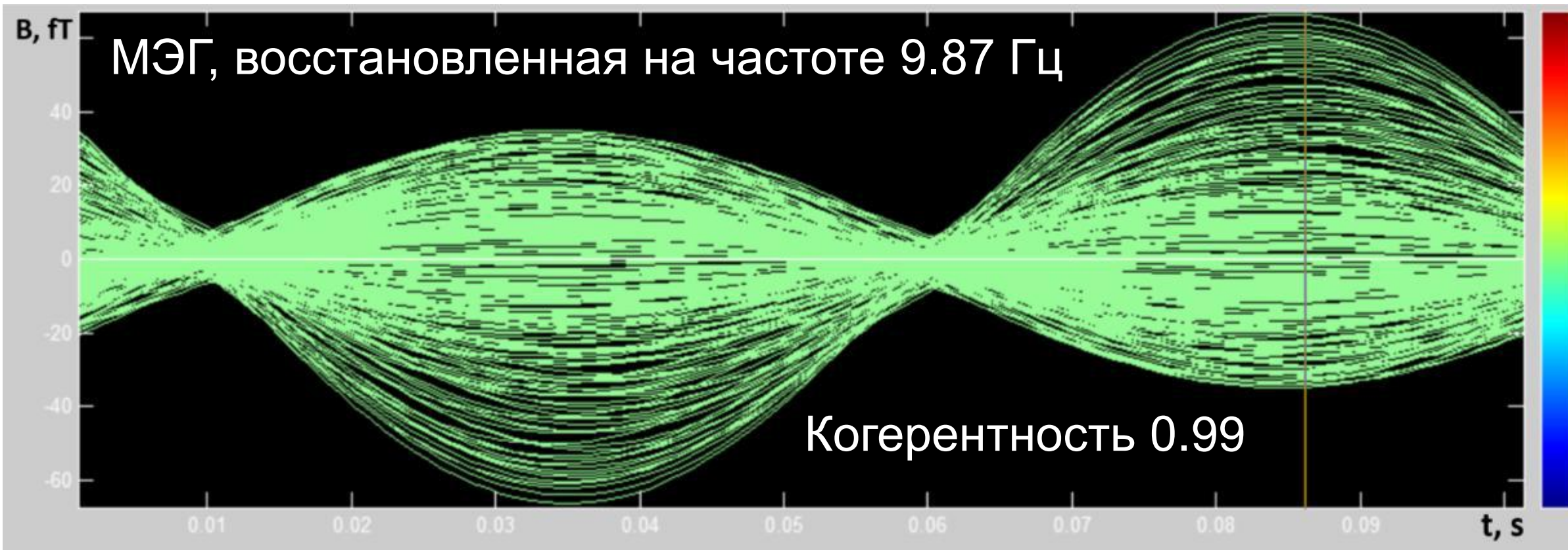
$$B_{nk}(t) = \rho_{nk} \sin(2\pi \nu_n t + \varphi_{nk}), \quad k = 1, \dots, K$$

$$t \in [0, T_{\nu_n}], \quad T_{\nu_n} = \frac{1}{\nu_n} \quad \text{Частота когерентна, если фазы во всех каналах равны.}$$

Это приводит к разделению переменных:

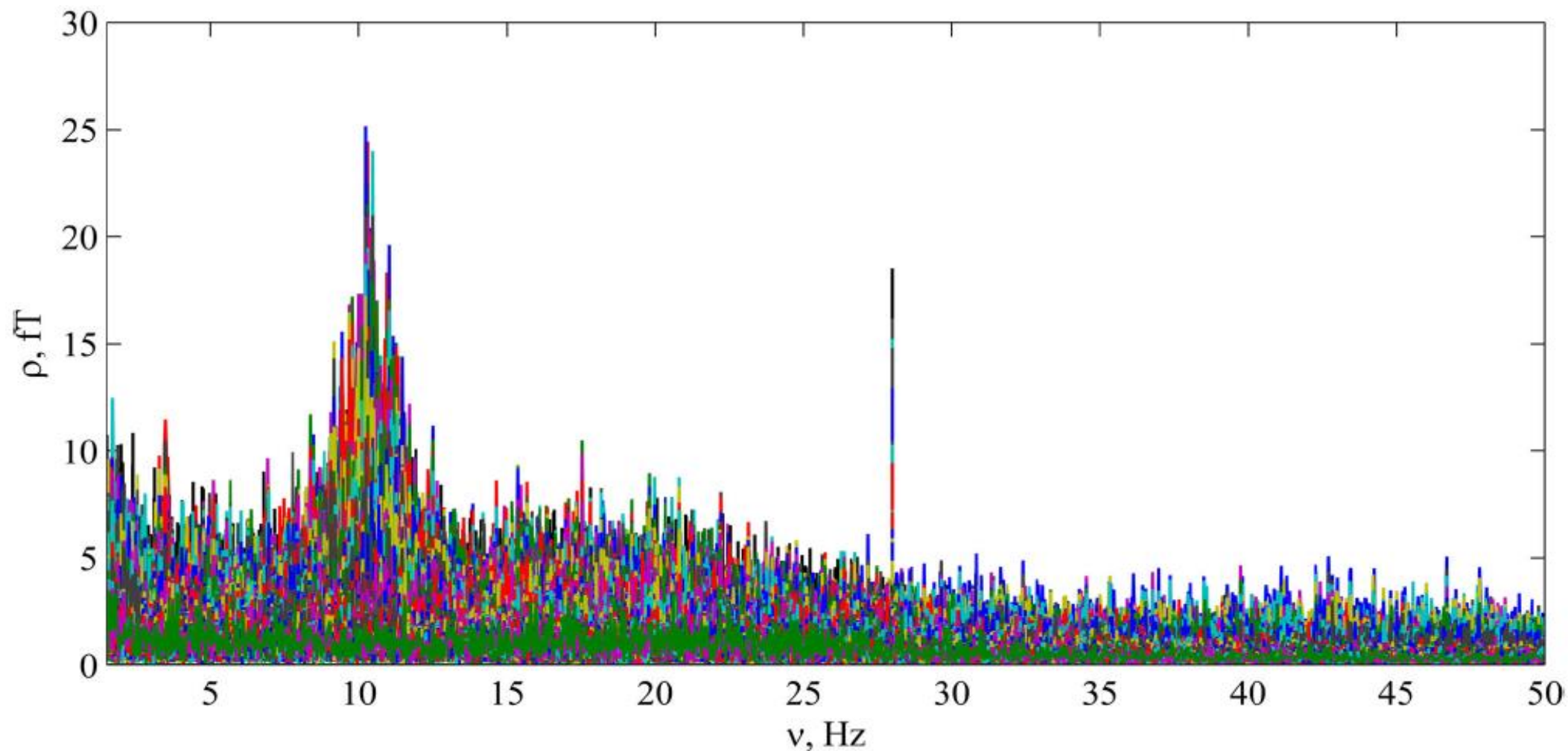
$$B_{nk}(t) = \rho_{nk} \sin(2\pi \nu_n t + \varphi_n)$$

Паттерн поля ρ_{nk} осциллирует как единое целое на частоте ν_n



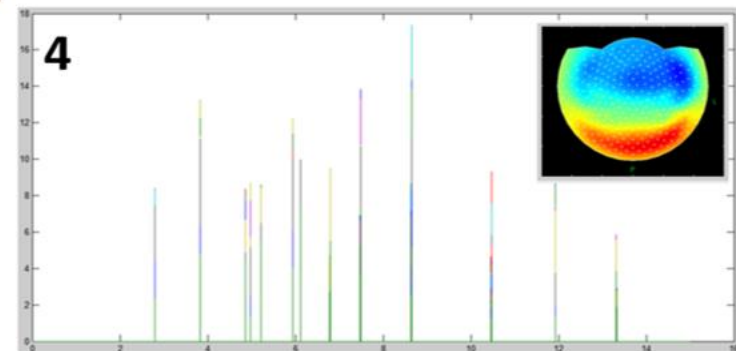
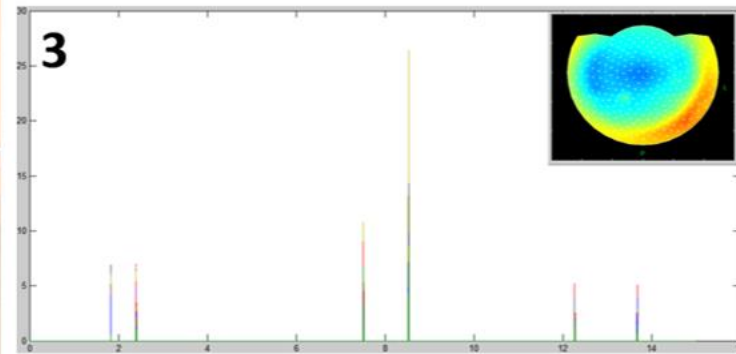
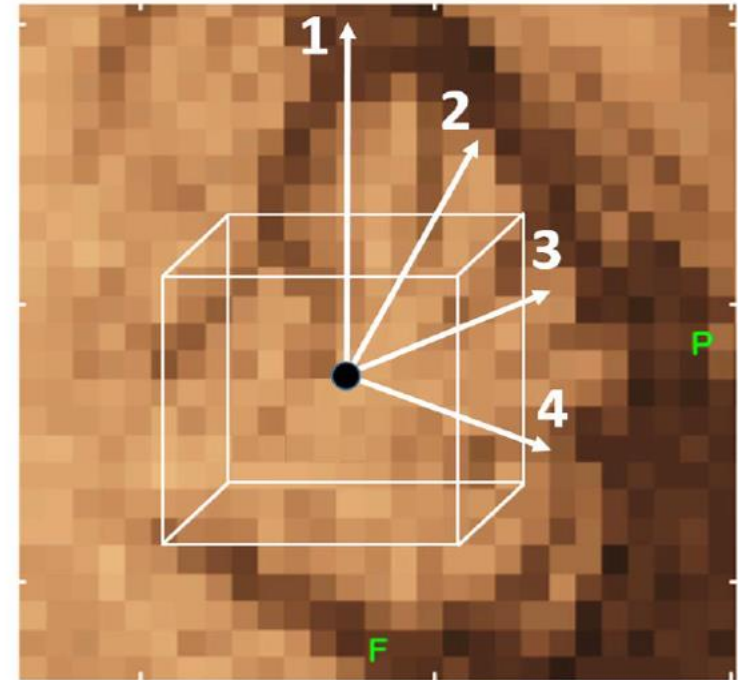
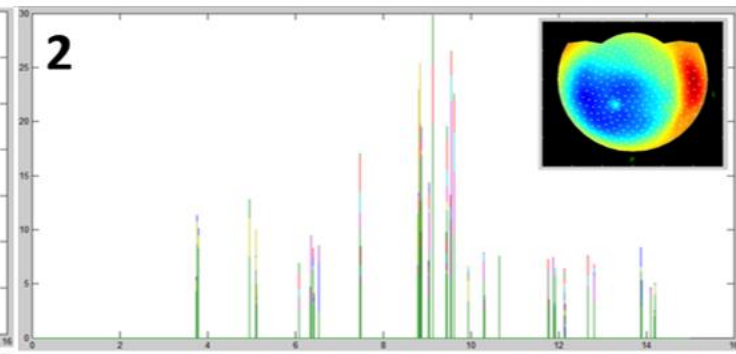
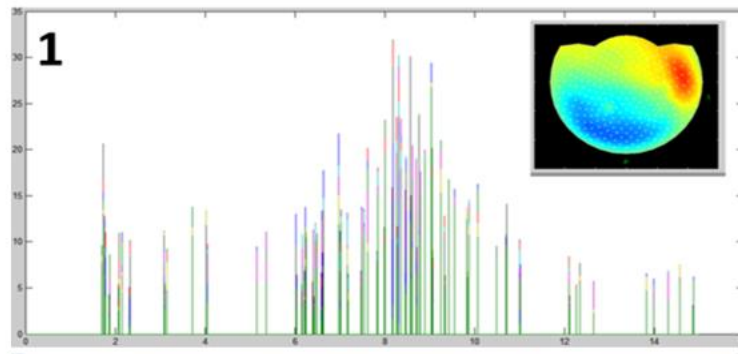
Паттерн
магнитного
поля на частоте
9.87 Гц

Для каждой частоты выполняется обратное преобразование Фурье, методом независимых компонент выделяются когерентные составляющие, для них вычисляются нормированные паттерны. **Без потерь информации исходная МЭГ преобразуется в десятки тысяч когерентных осцилляций.**

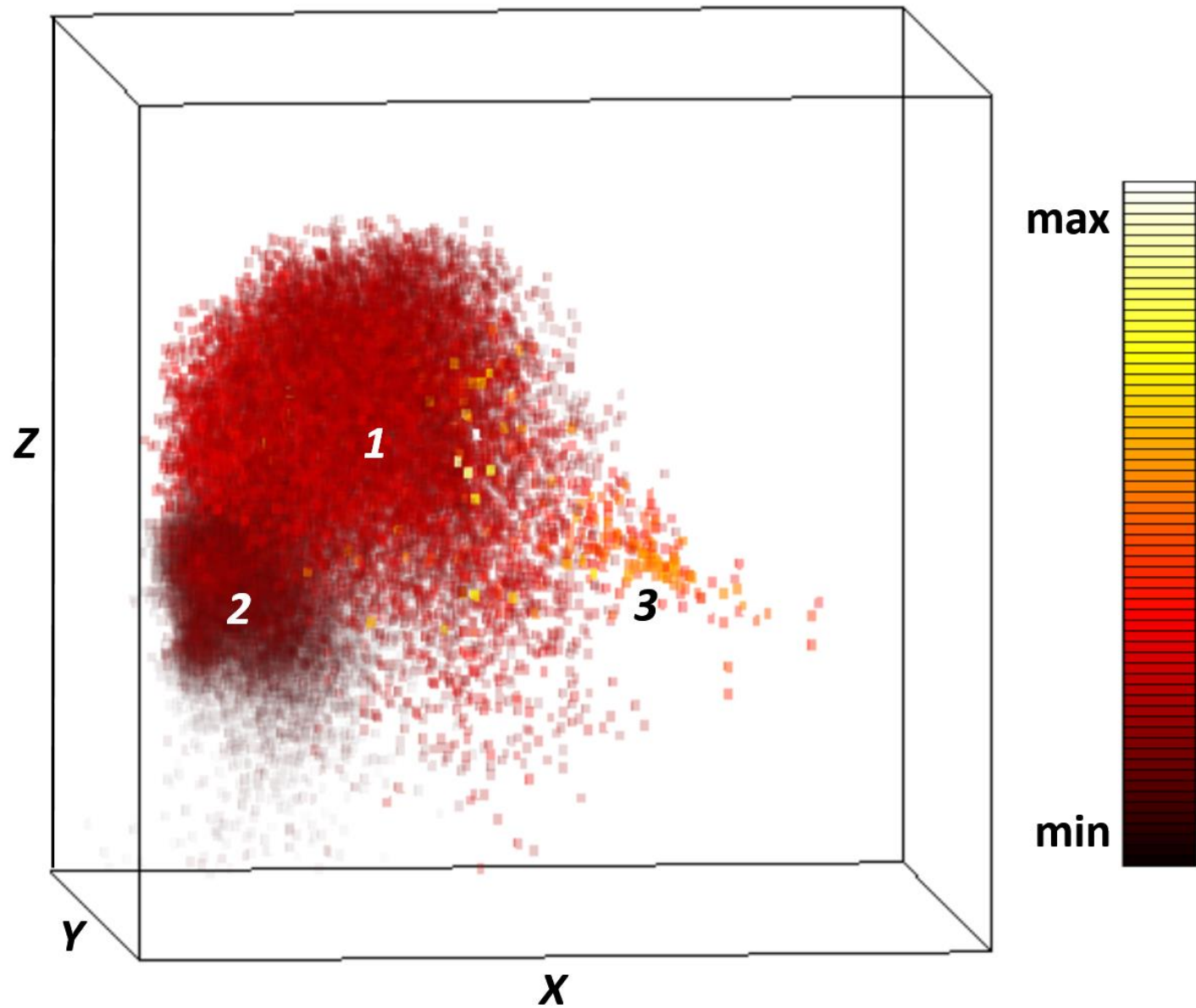


Массовое решение обратной задачи по нормированным паттернам поля

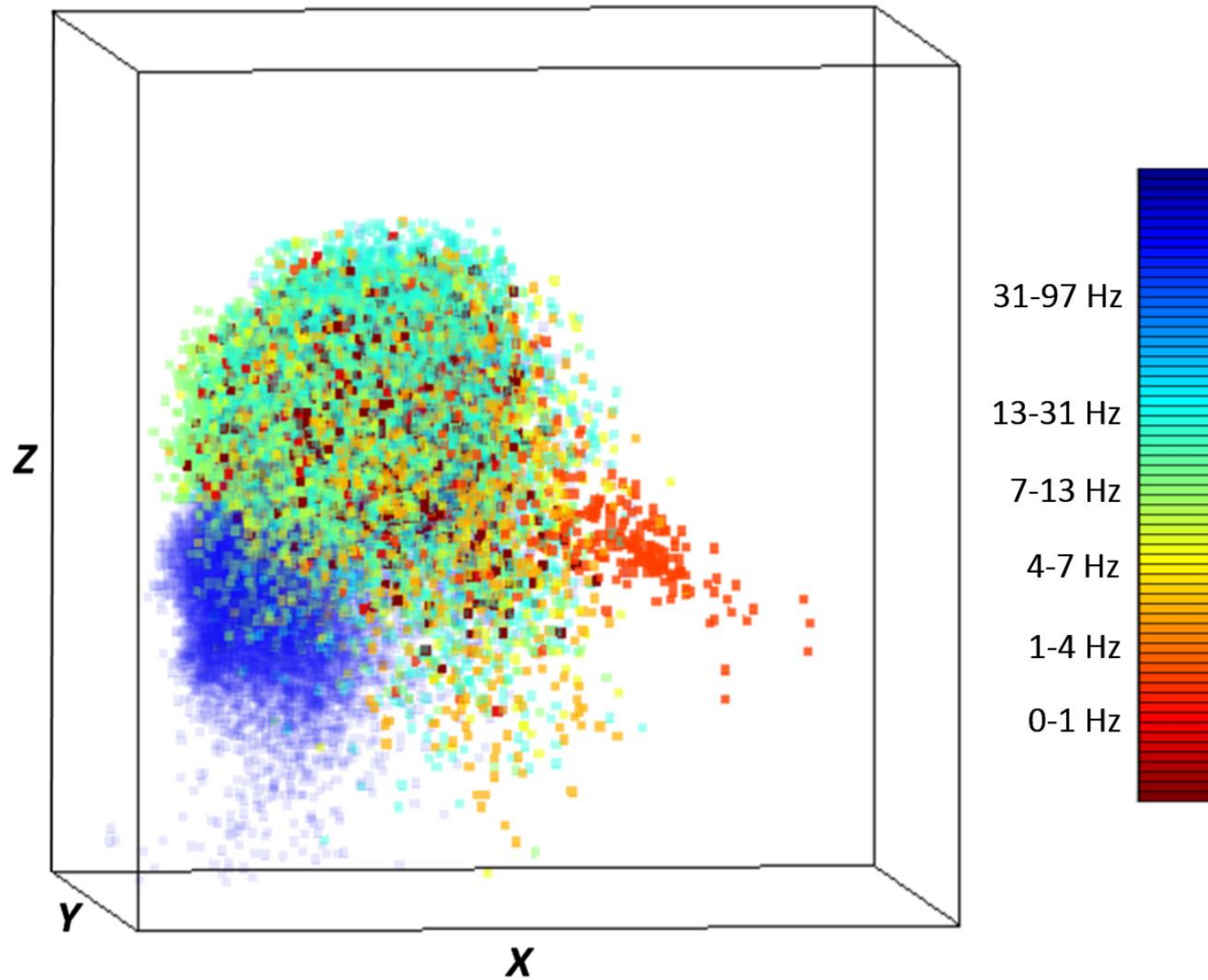
В объеме
25x25x25 куб.см.
с шагом 3 мм
генерируется
свыше 2 млн.
пробных
паттернов



Пробные диполи
в одной ячейке,
паттерны поля и
парциальные спектры

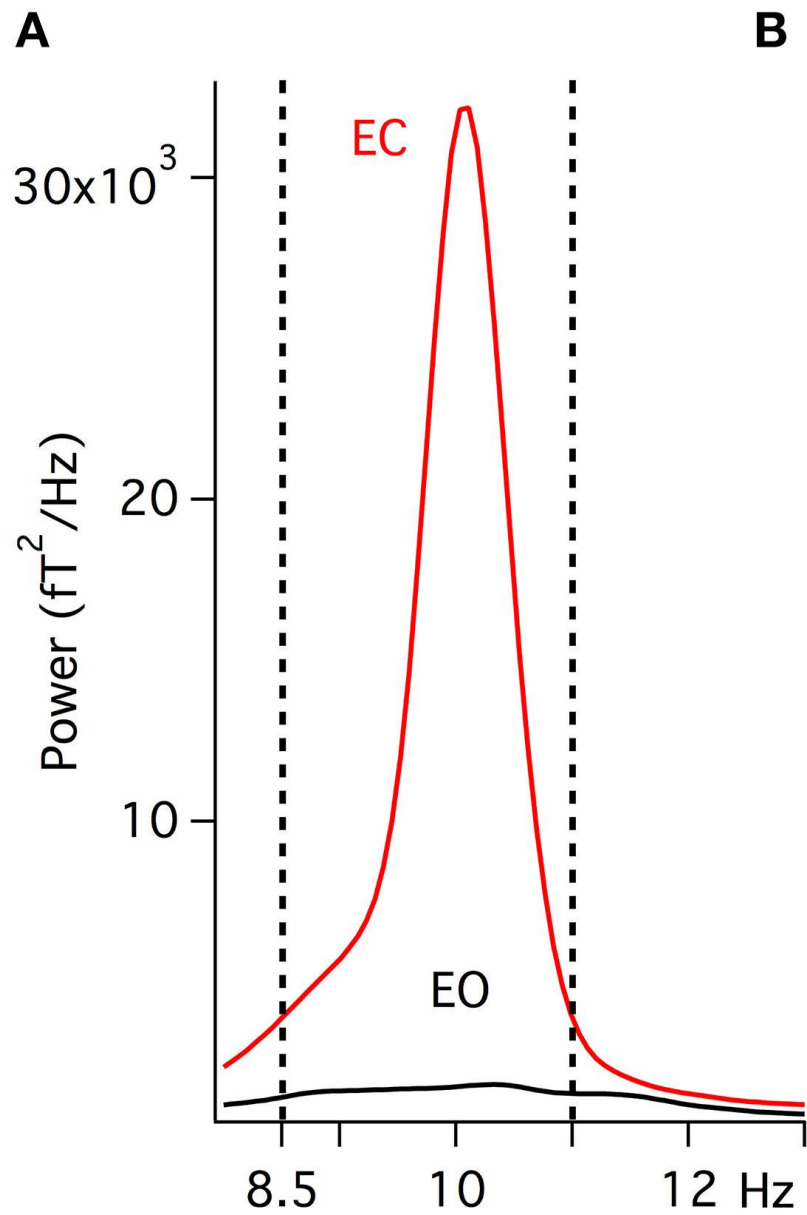


Функциональная томограмма – пространственное распределение энергии МЭГ в диапазоне частот 0.003-100 Гц. (1) – мозг, (2) – шейные мускулы, (3) – дыхательная система.

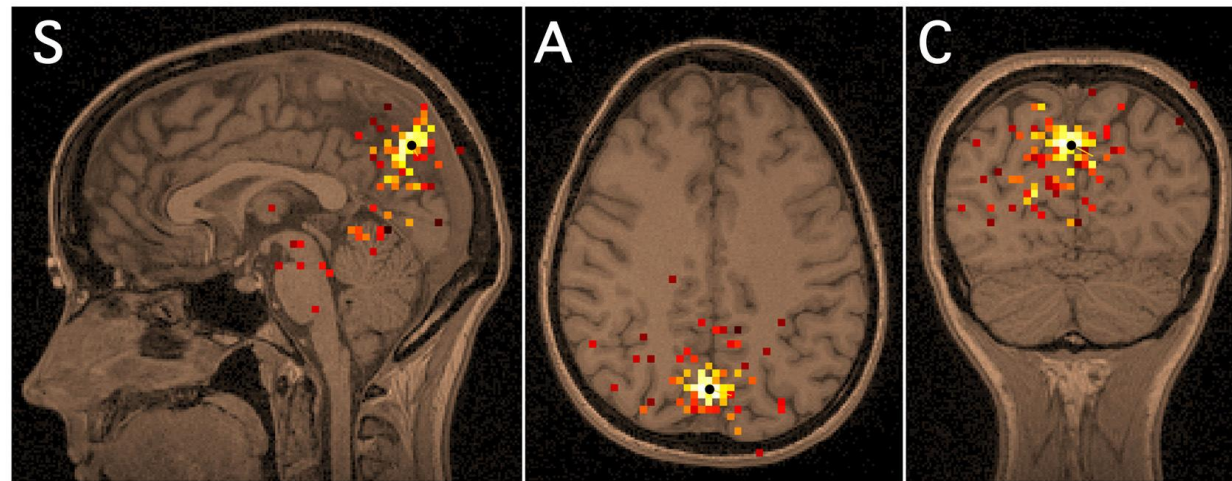


Функциональная томограмма – пространственное распределение различных диапазонов частот.

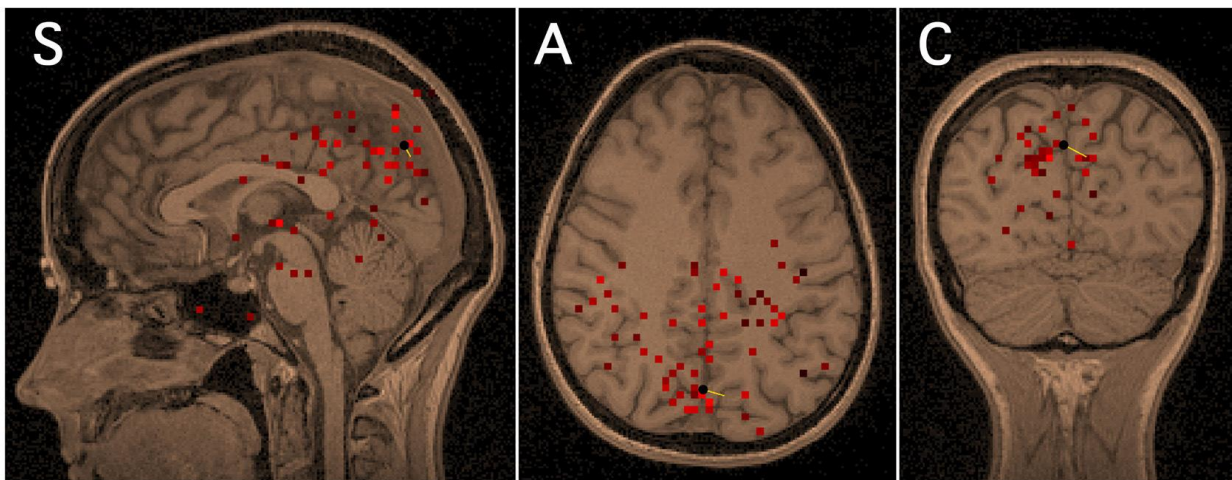
МАГНИТНАЯ ЭНЦЕФАЛОГРАФИЯ



B Eyes Closed



Eyes Open



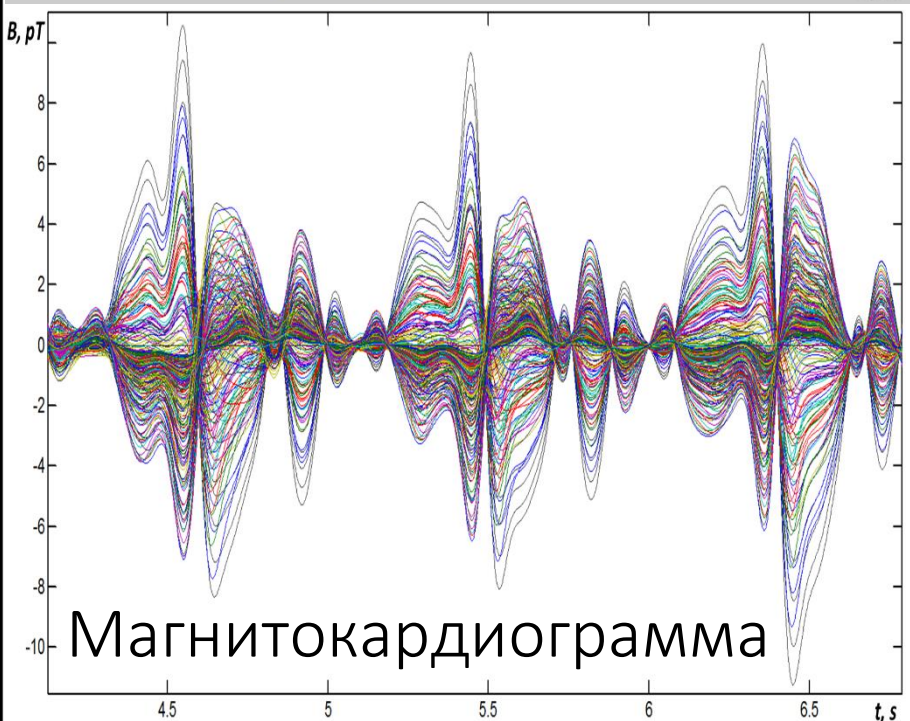
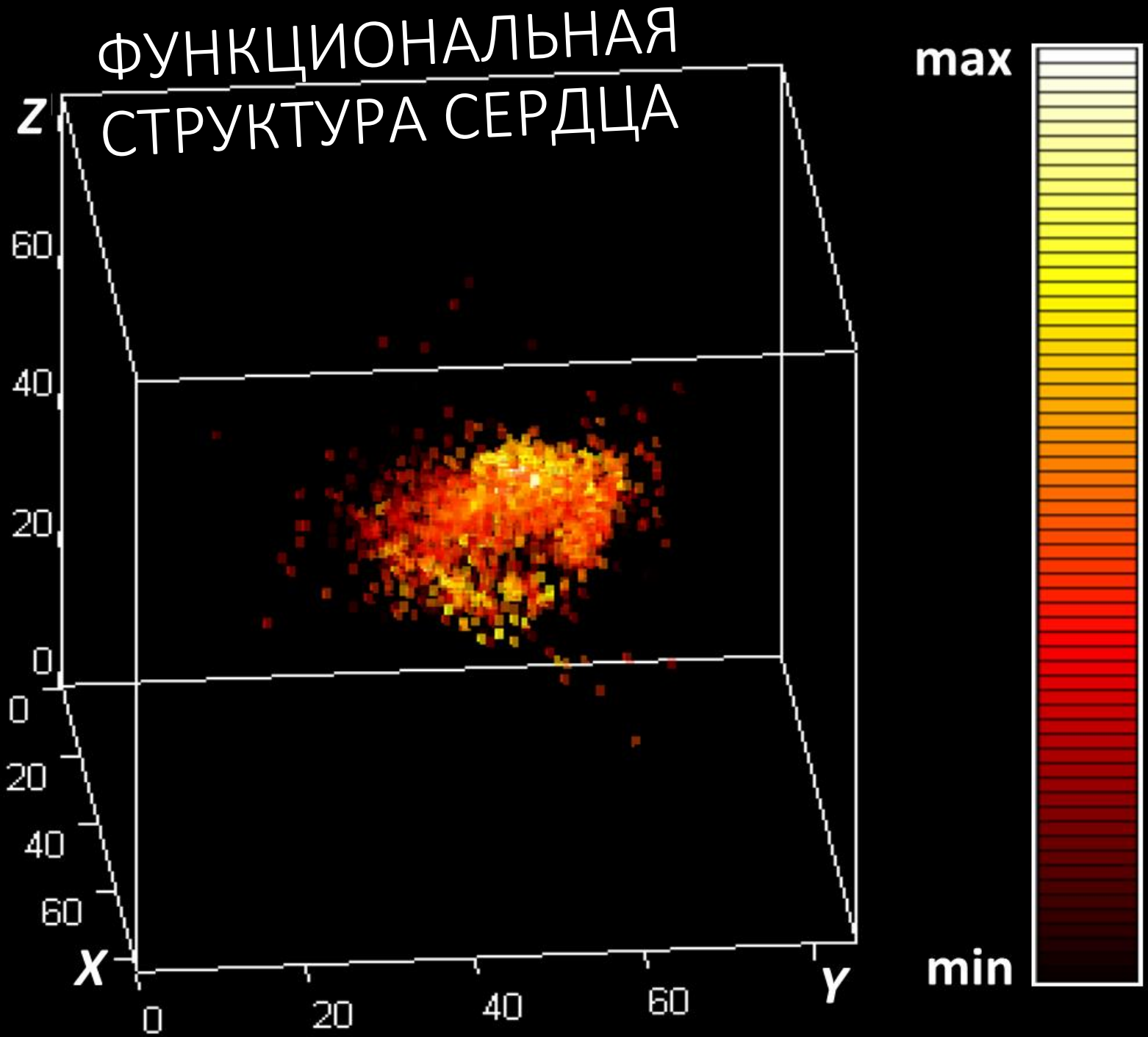
min

Power of Source

max

Спектры и функциональные томограммы для субъекта #4 в состояниях с открытыми (EO) и закрытыми глазами (EC).

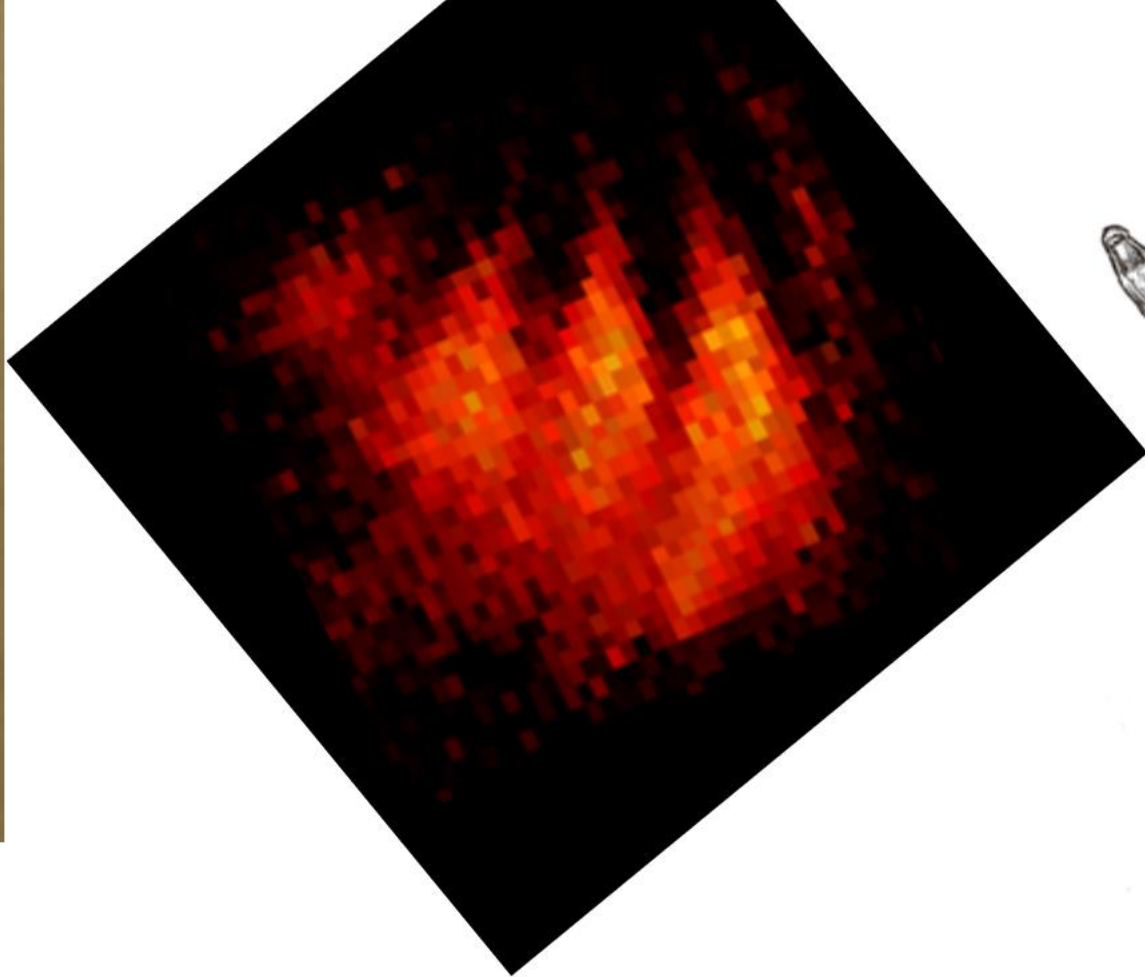
МАГНИТНАЯ КАРДИОГРАФИЯ



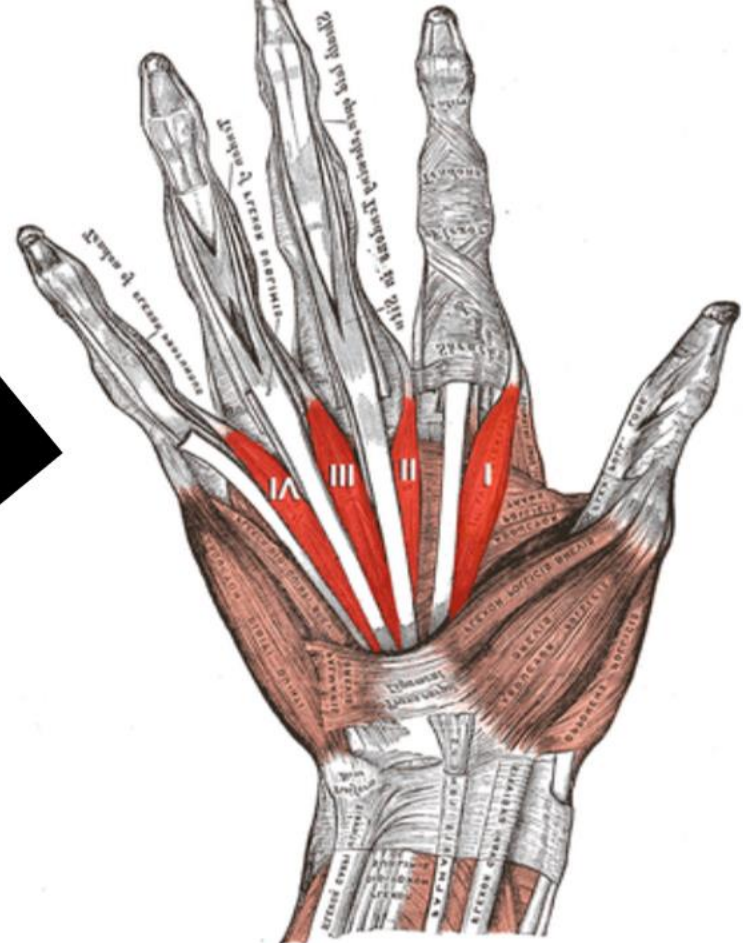
МАГНИТНАЯ МИОГРАФИЯ



Эксперимент:
Измерялось
магнитное поле
руки, сжимающей
яблоко



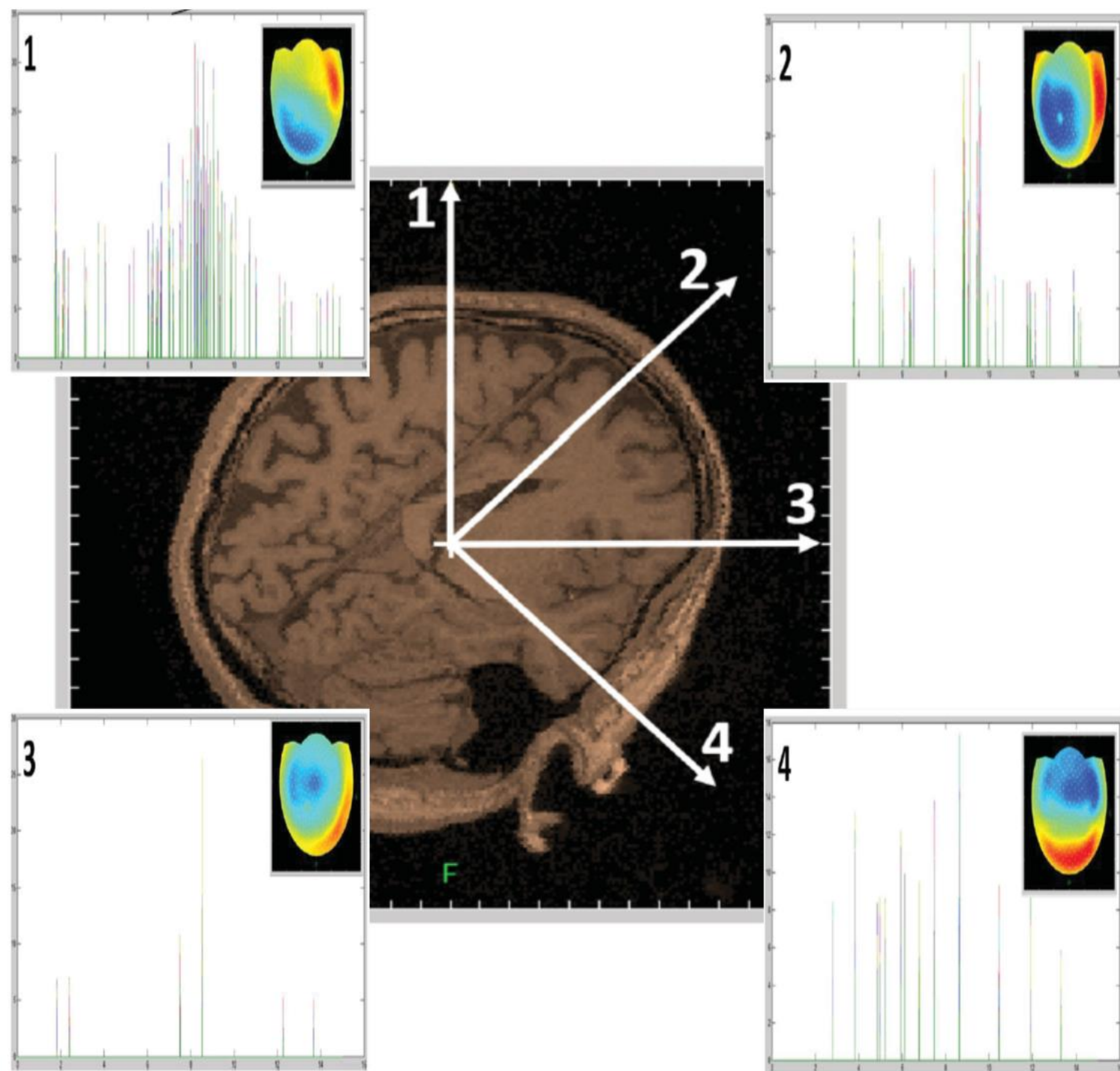
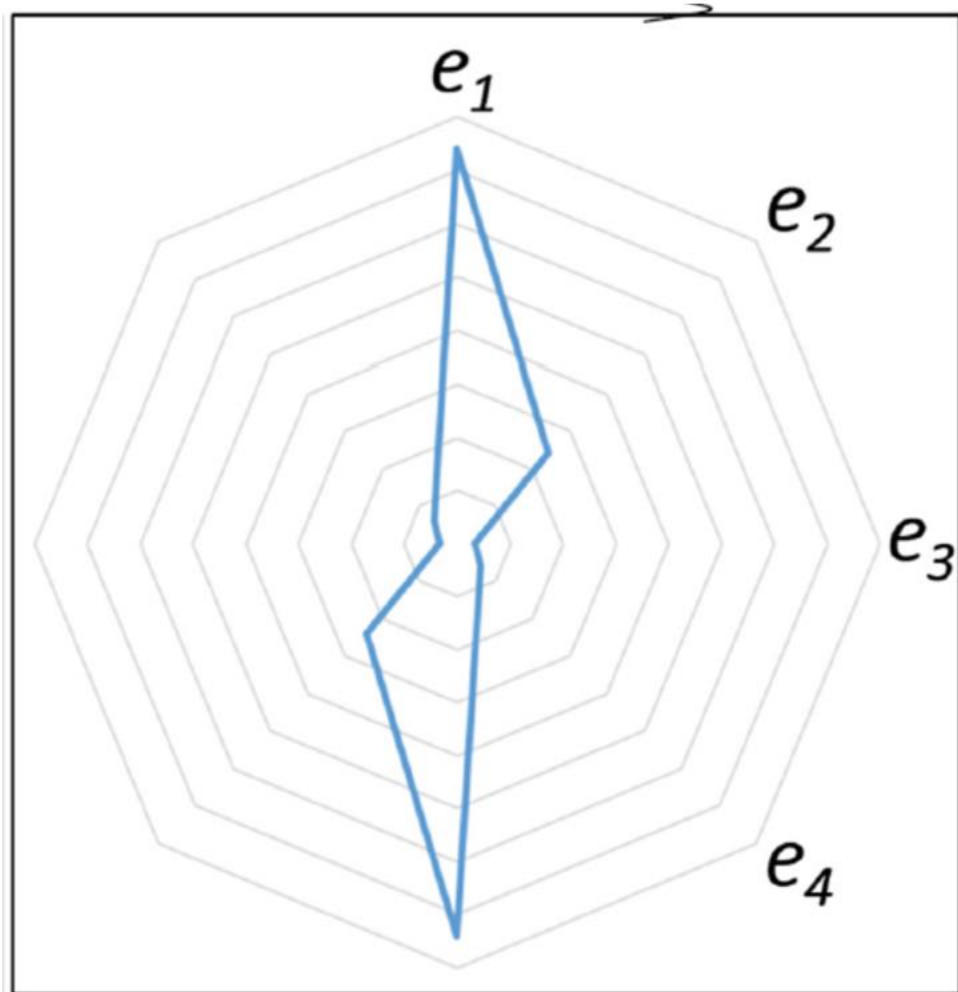
Функциональная структура
червеобразных мышц кисти,
найденная по магнитному полю
(яркость пропорциональна
электрической активности мышцы)



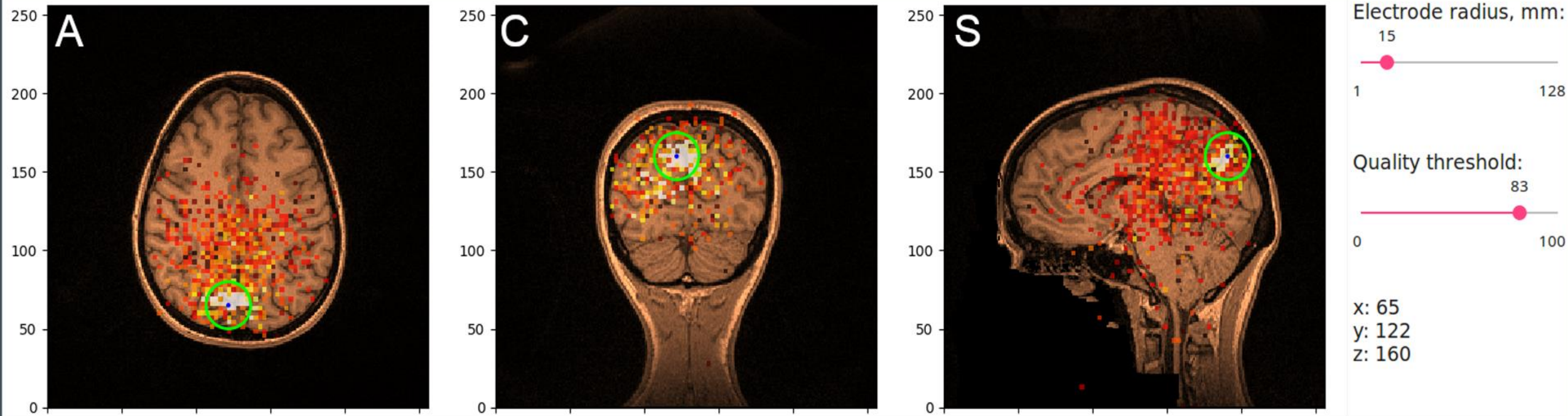
Червеобразные
мышцы кисти,
анатомическая
схема (показаны
красным)

ЛОКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Оценка направления источников по парциальным спектрам



Метод виртуальных электродов



**Метод анализа данных
многоканальных магнитных
измерений в пространстве
«частота-паттерн» позволяет
реконструировать и детально
изучать функциональную структуру
человеческого тела**

Возможные приложения

- Исследования и диагностика центральной и периферийной нервной системы, включая рецепторы.
- Исследования и диагностика мышечной системы.
- Локализация магнитных наночастиц в органах и тканях.
- Другие задачи.

Исследование выполняется при поддержке
Российского научного фонда
(проект № 18-11-00178)