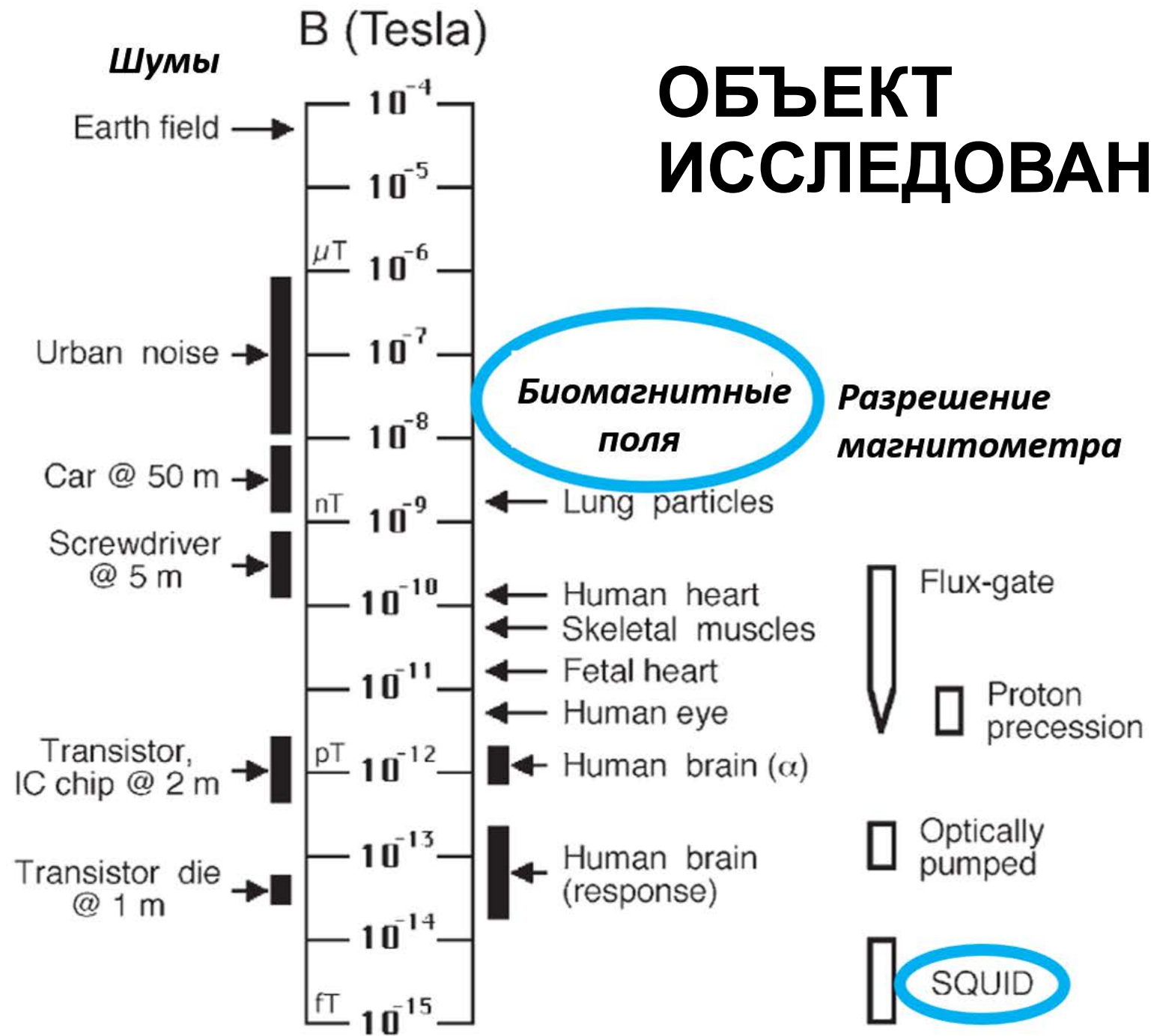


**РЕКОНСТРУКЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ
ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ТЕЛА
ПО ДАННЫМ МНОГОКАНАЛЬНЫХ
МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Устинин М.Н., Рыкунов С.Д., Бойко А.И., Сычев В.В.

Институт математических проблем биологии 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.

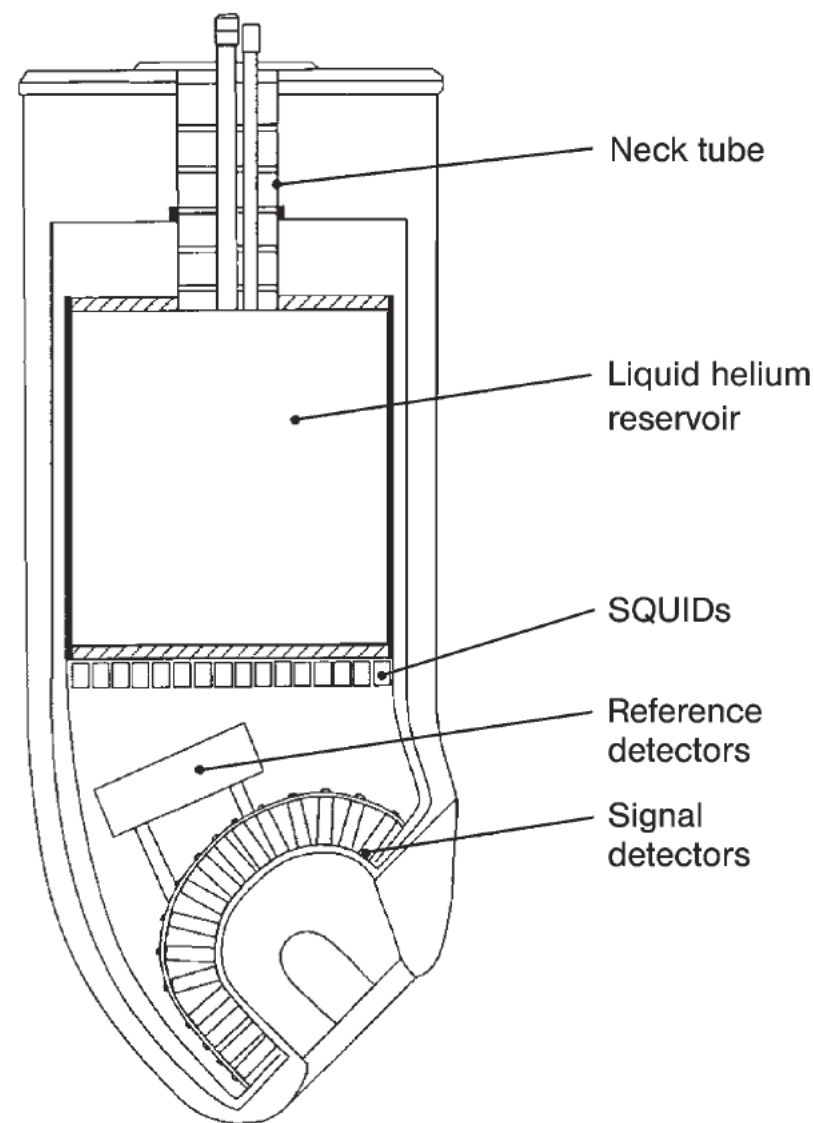
Функциональная структура – конфигурация источников в пространстве.

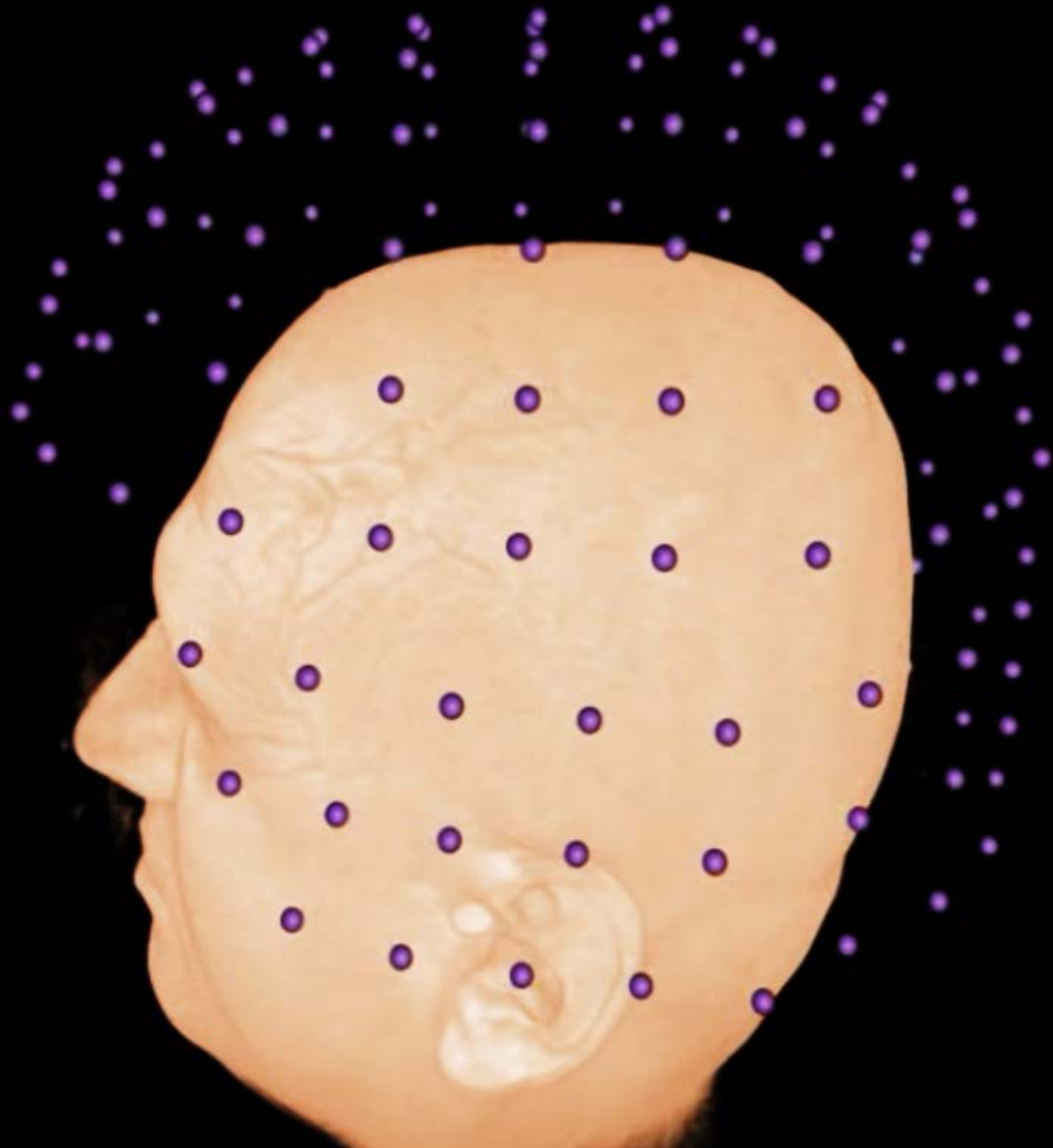
ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ

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, 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



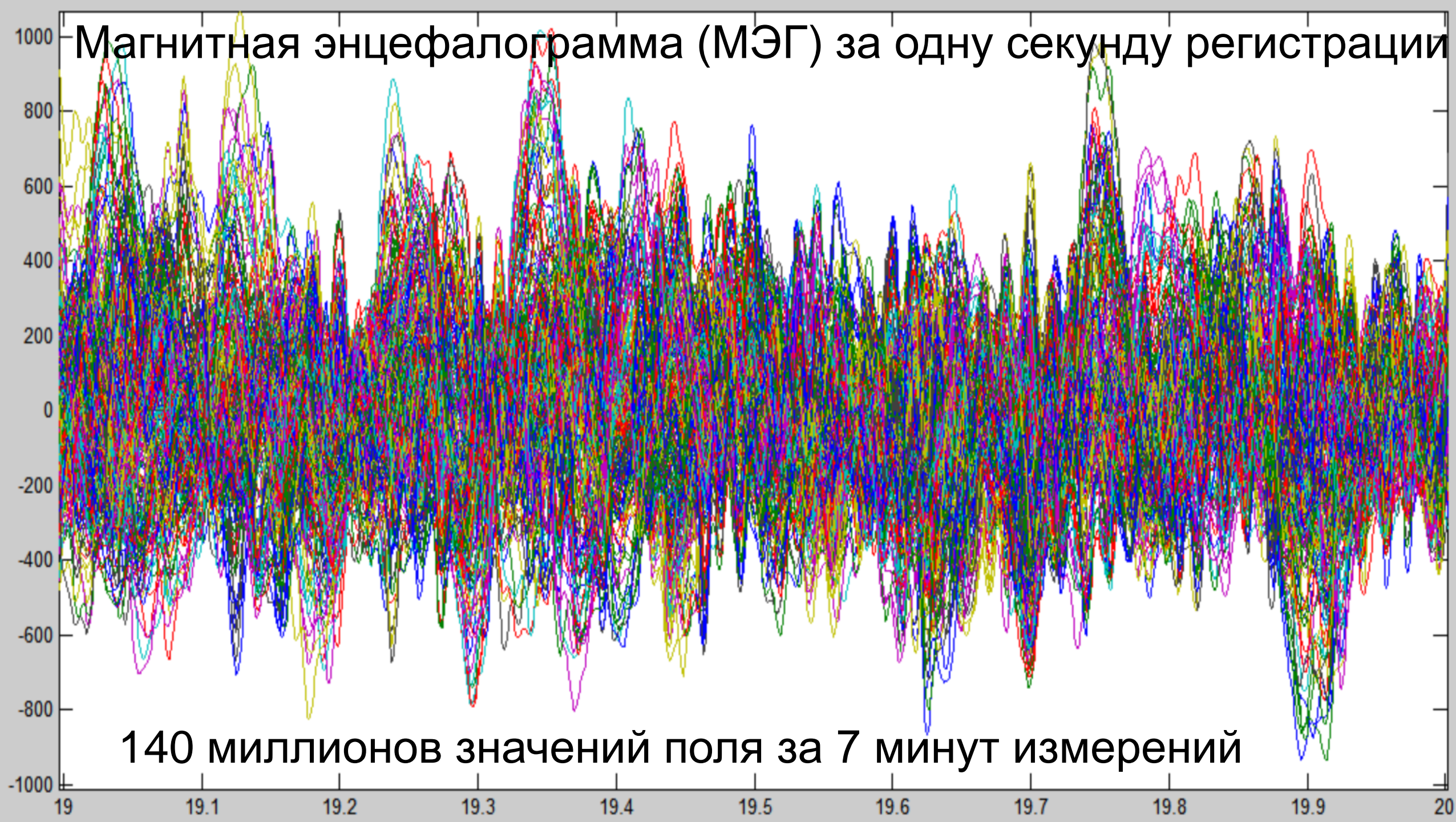


Магнитная энцефалография

эксперимент

Показано взаимное
расположение
головы
испытуемого
и сенсоров
магнитного поля

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

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

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

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

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

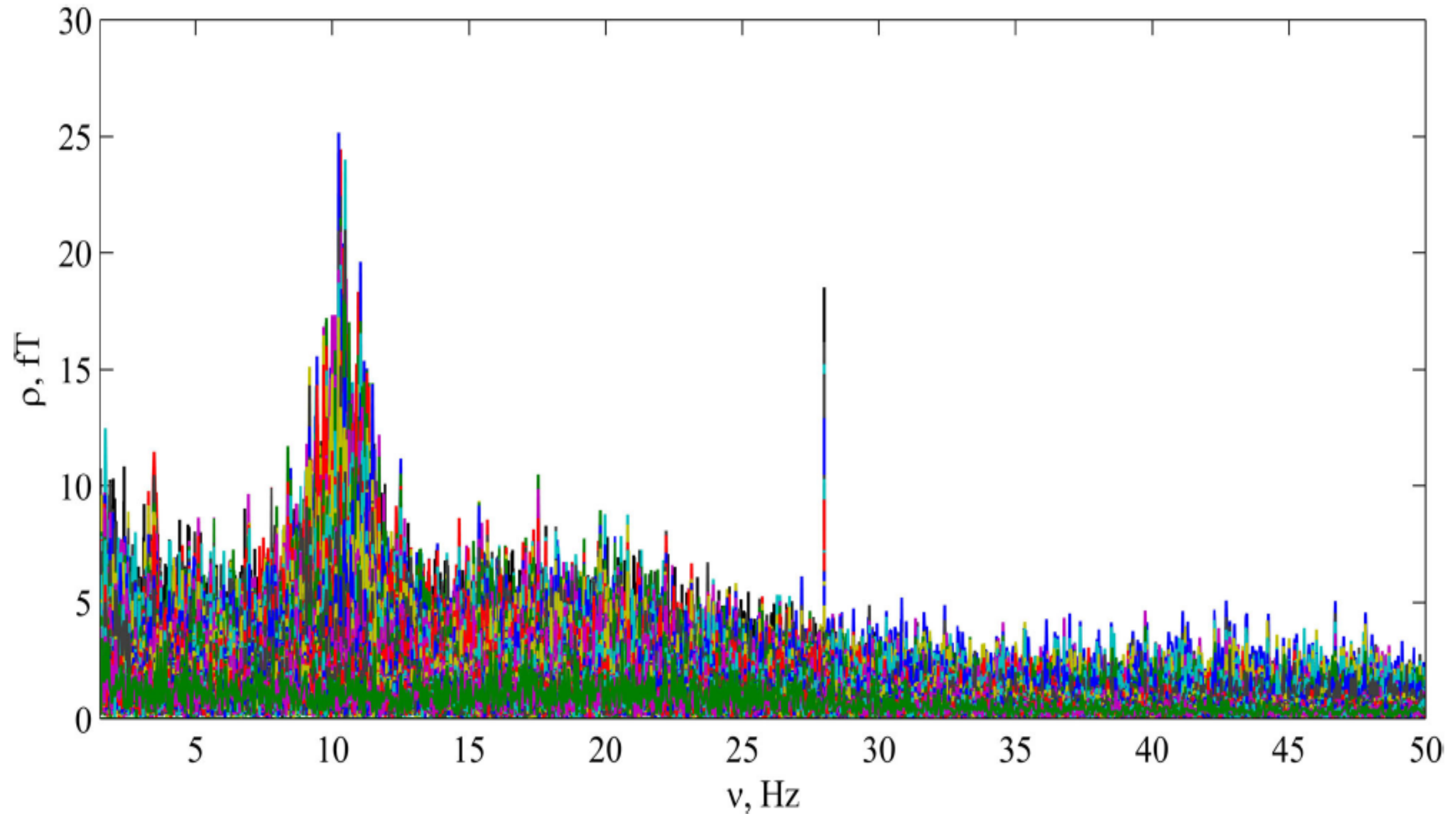
Особенности применяемых алгоритмов:

1. Точное вычисление интегралов Фурье
2. Многоканальный спектр вычисляется на всем интервале регистрации, разрешение по частоте равно

$$\Delta\nu = \nu_n - \nu_{n-1} = \frac{1}{T}$$

3. Настройка сетки частот для оптимальной аппроксимации выбранной частоты, осуществляется небольшими изменениями времени интегрирования T

Многоканальный спектр Фурье магнитной энцефалограммы



Обратное преобразование Фурье для каждой частоты во всех каналах:

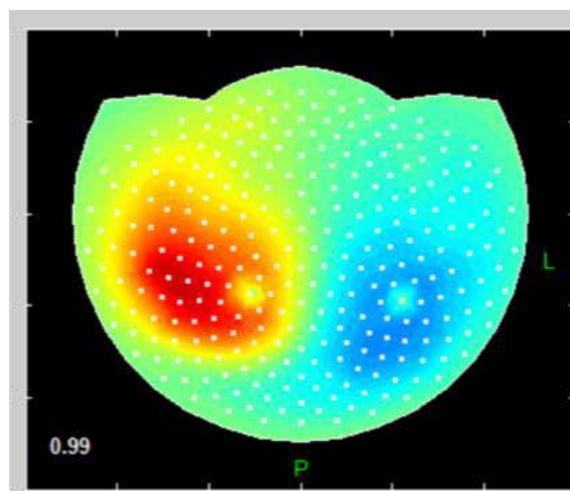
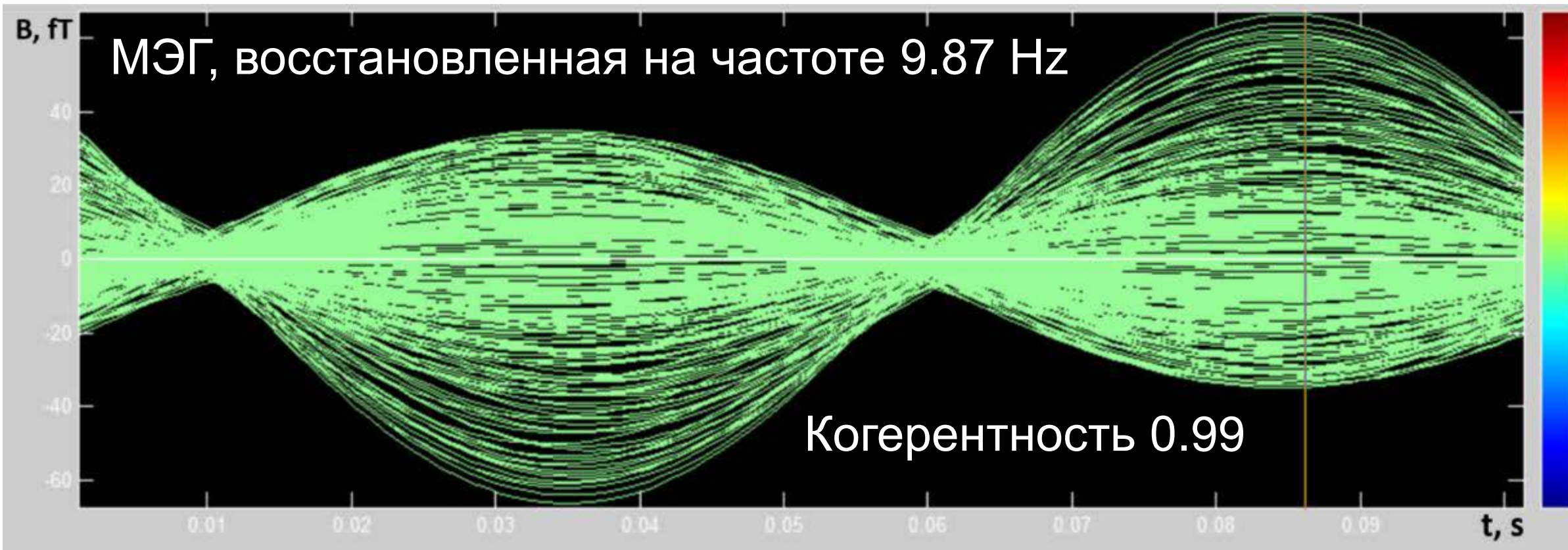
$$B_{nk}(t) = \rho_{nk} \sin(2\pi \nu_n t + \varphi_{nk}), \quad k = 1, \dots, K$$

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

Это приводит к разделению переменных:

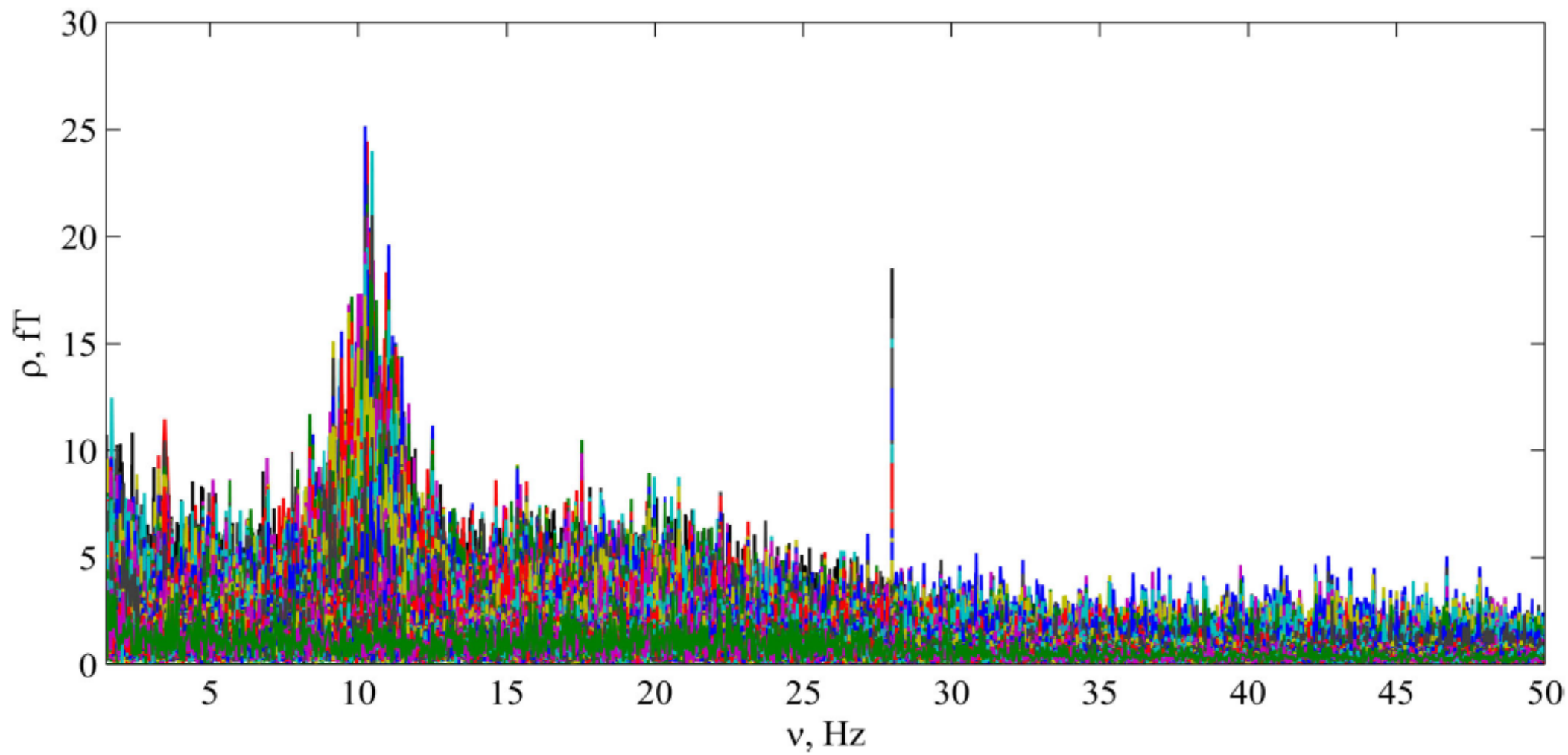
$$B_{nk}(t) = \rho_{nk} \sin(2\pi \nu_n t + \varphi_n)$$

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



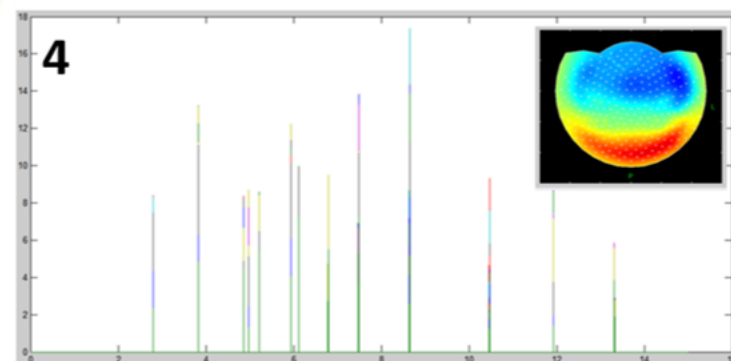
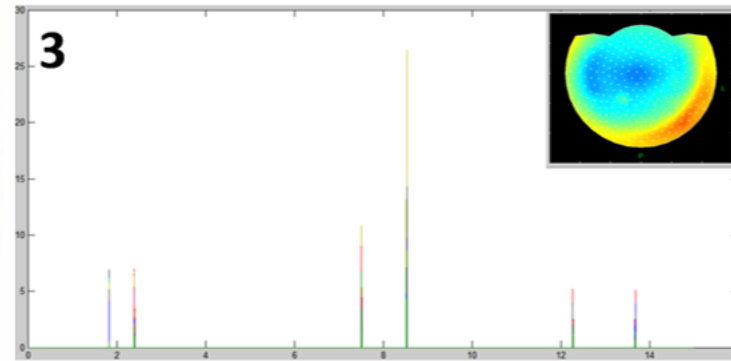
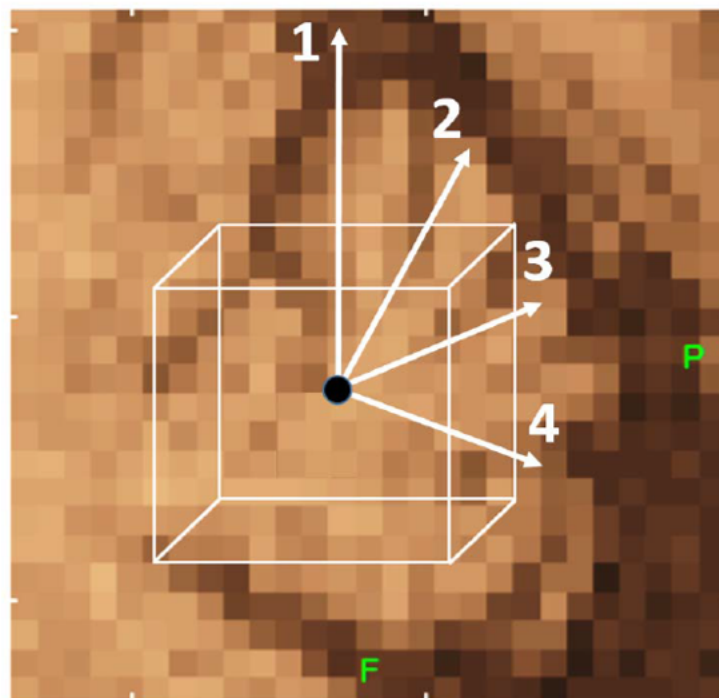
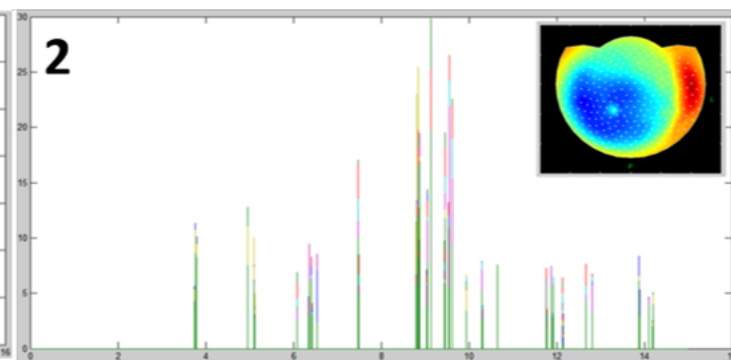
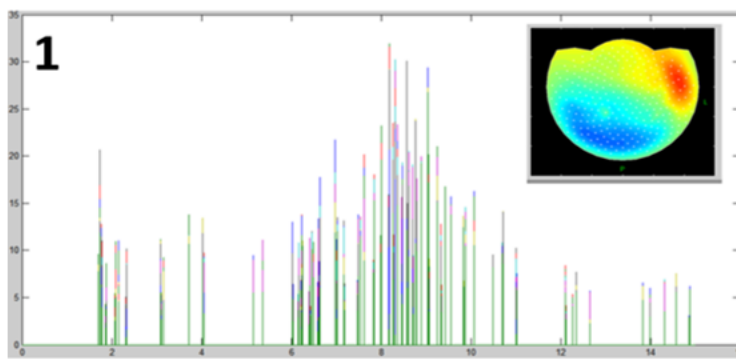
Паттерн магнитного поля на частоте 9.87 Hz

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.**

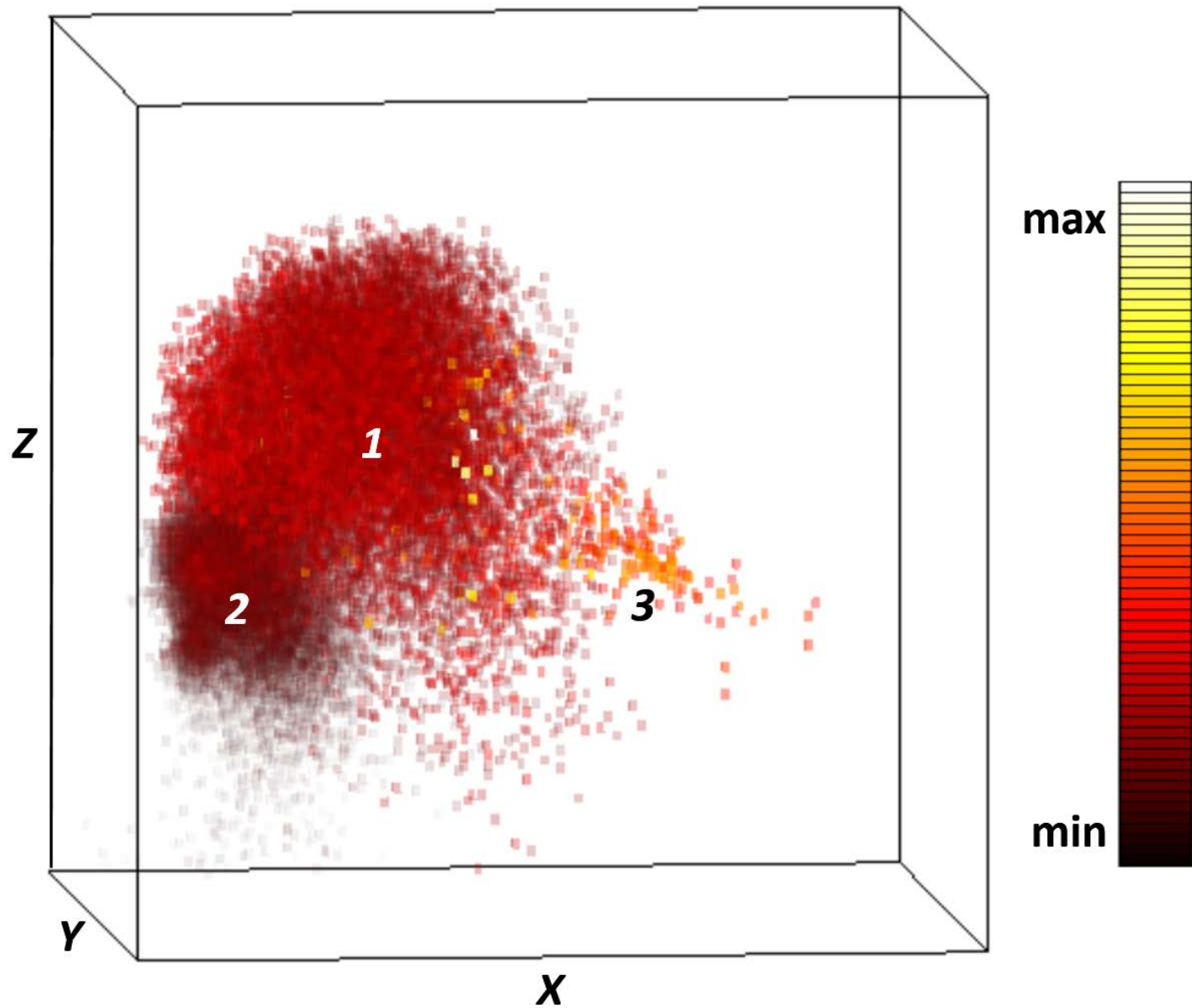


Построение набора пробных паттернов

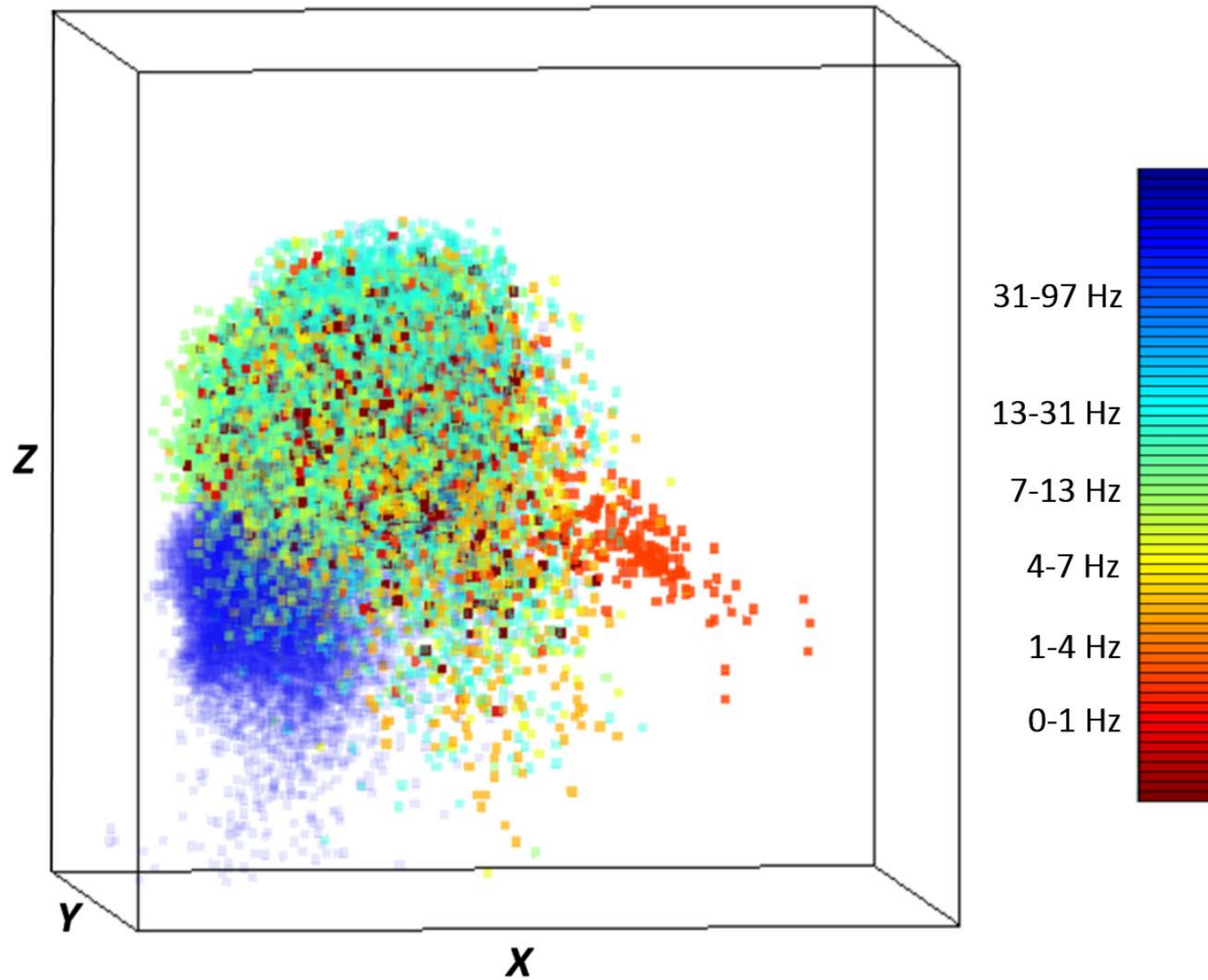
В объеме 25x25x25 куб.см. с шагом 3 мм генерируется свыше 2 млн. пробных паттернов



Пробные диполи в одной ячейке, паттерны поля и парциальные спектры



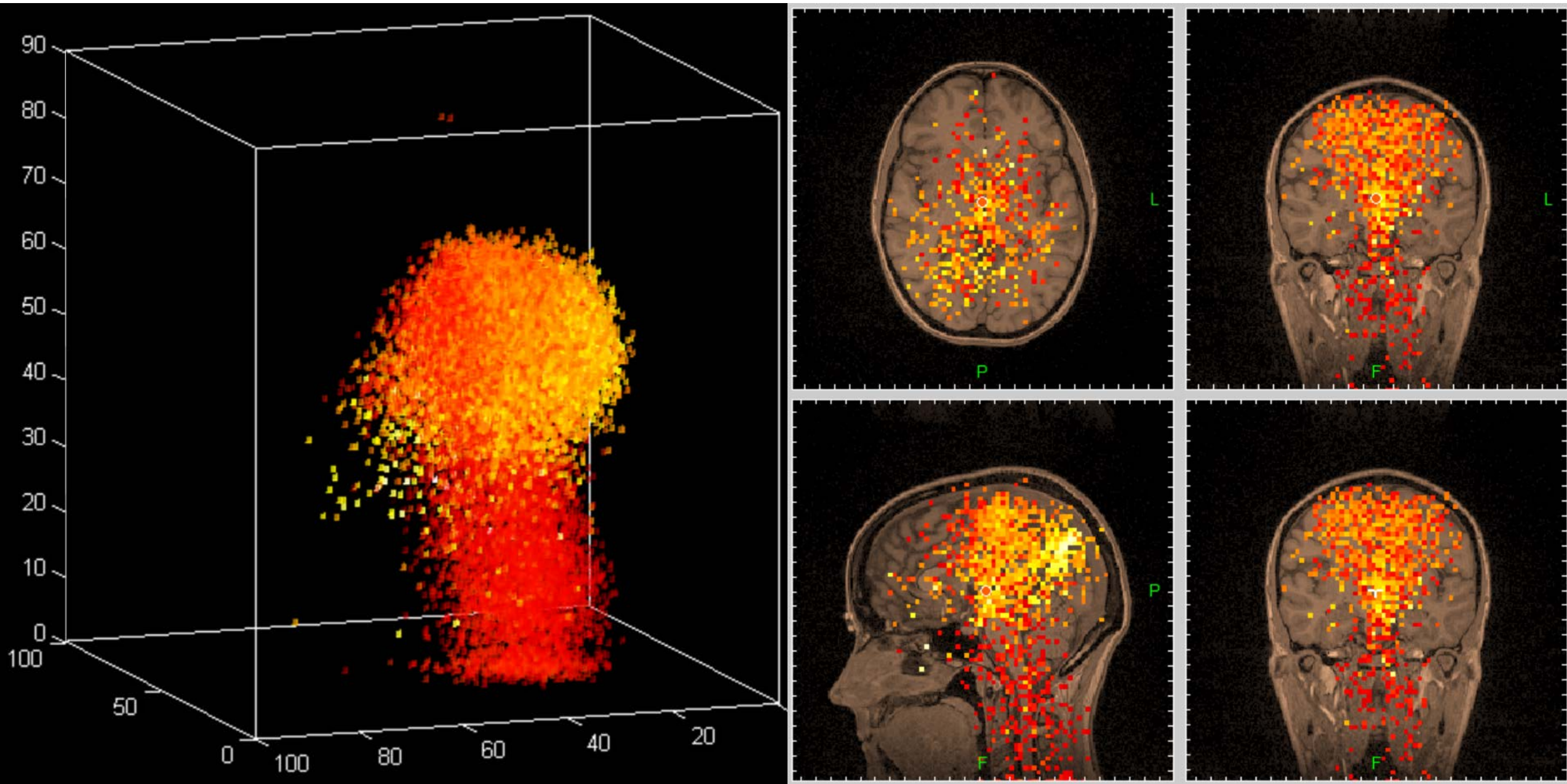
Функциональная томограмма – пространственное распределение энергии МЭГ в диапазоне частот 0.003-100 Гц. (1) – мозг, (2) – шейные мускулы, (3) – дыхательная система.



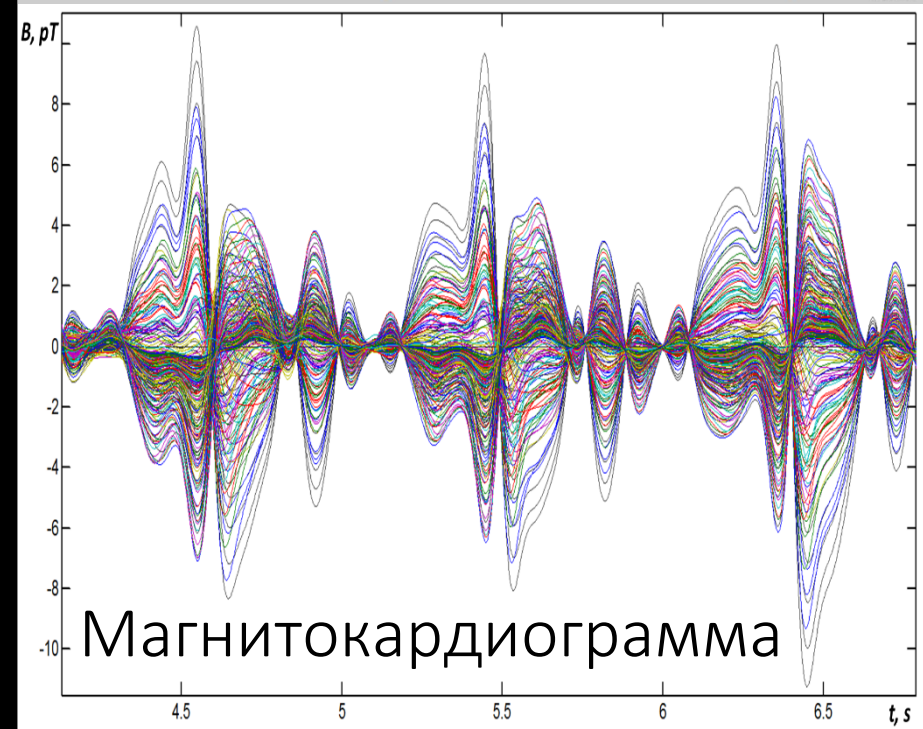
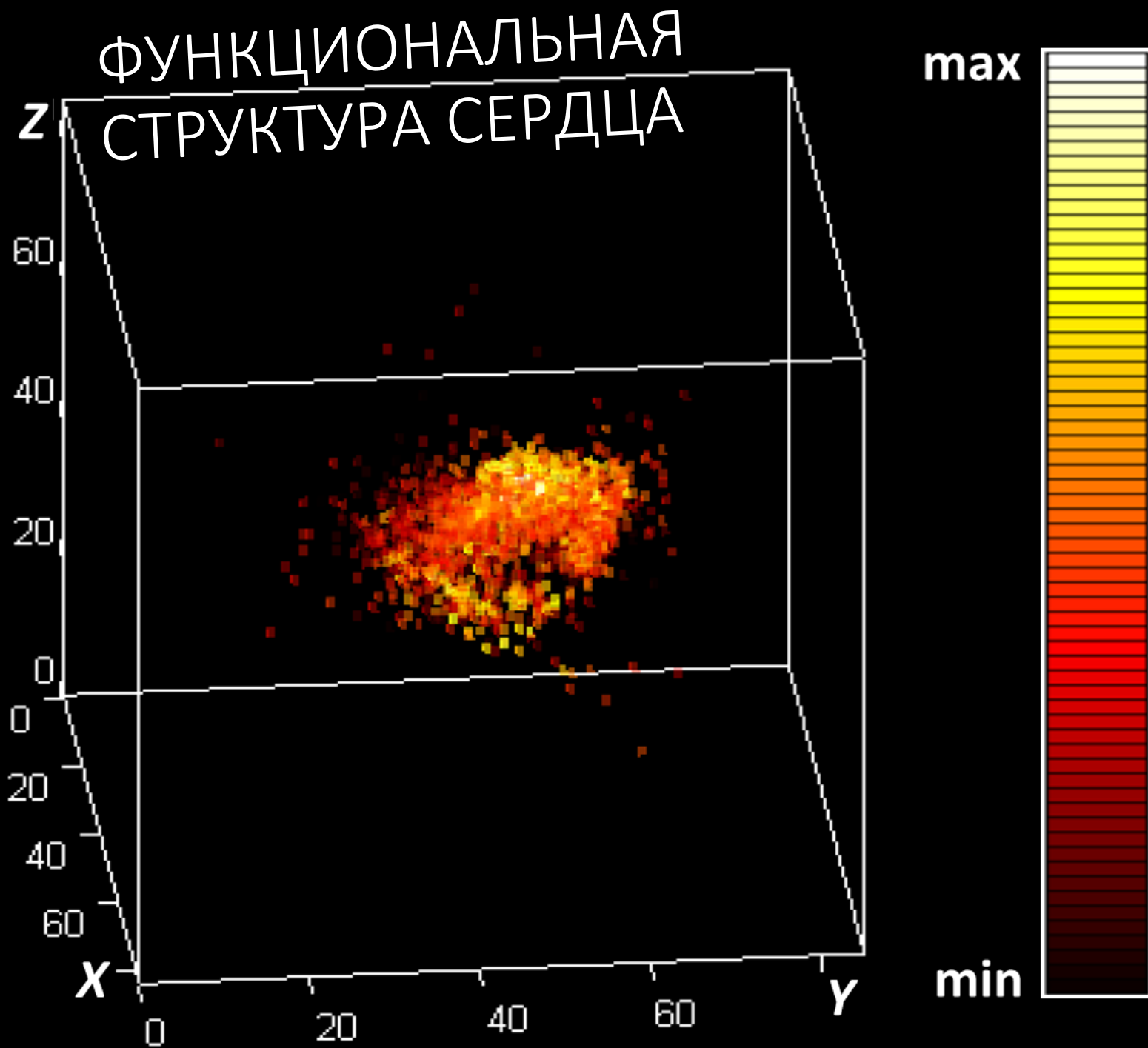
Функциональная томограмма – пространственное распределение различных диапазонов частот.

МАГНИТНАЯ ЭНЦЕФАЛОГРАФИЯ

Функциональная томограмма 0-100 Гц, показана совместно с МРТ

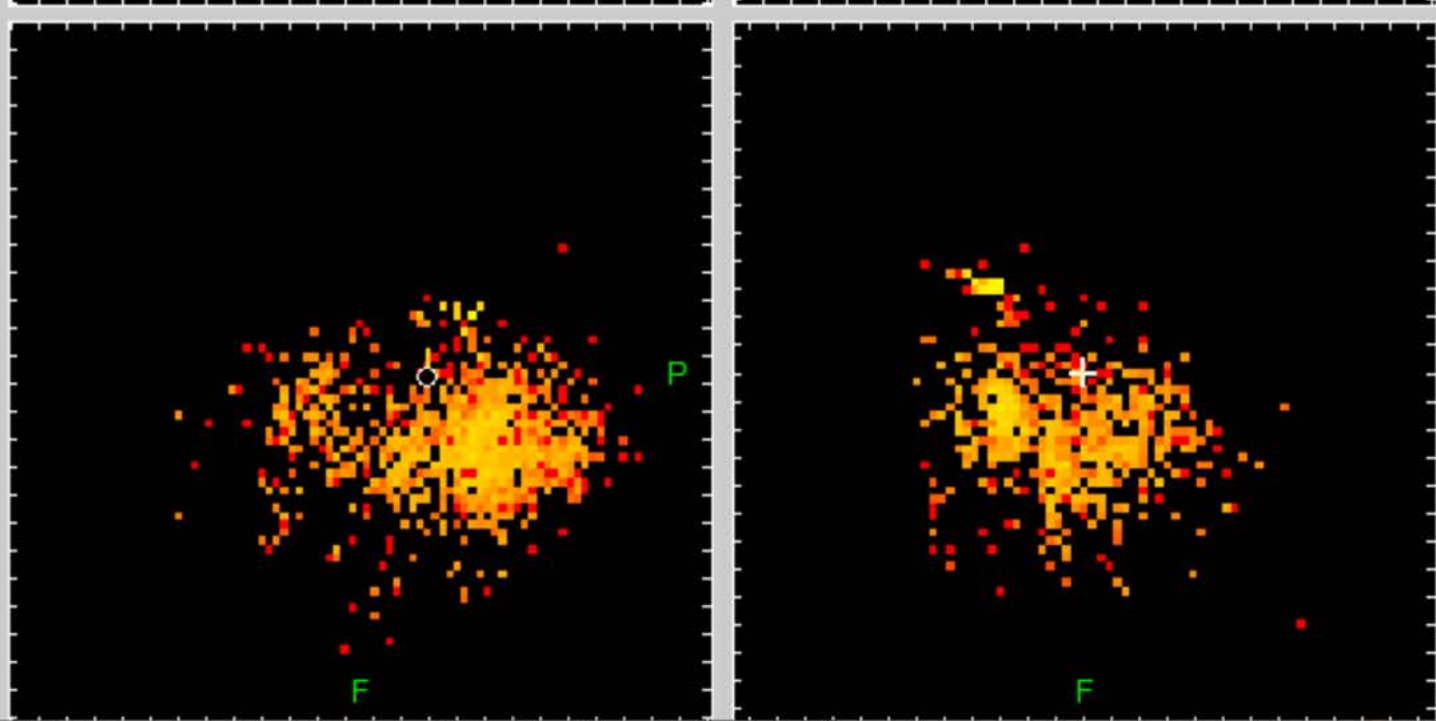
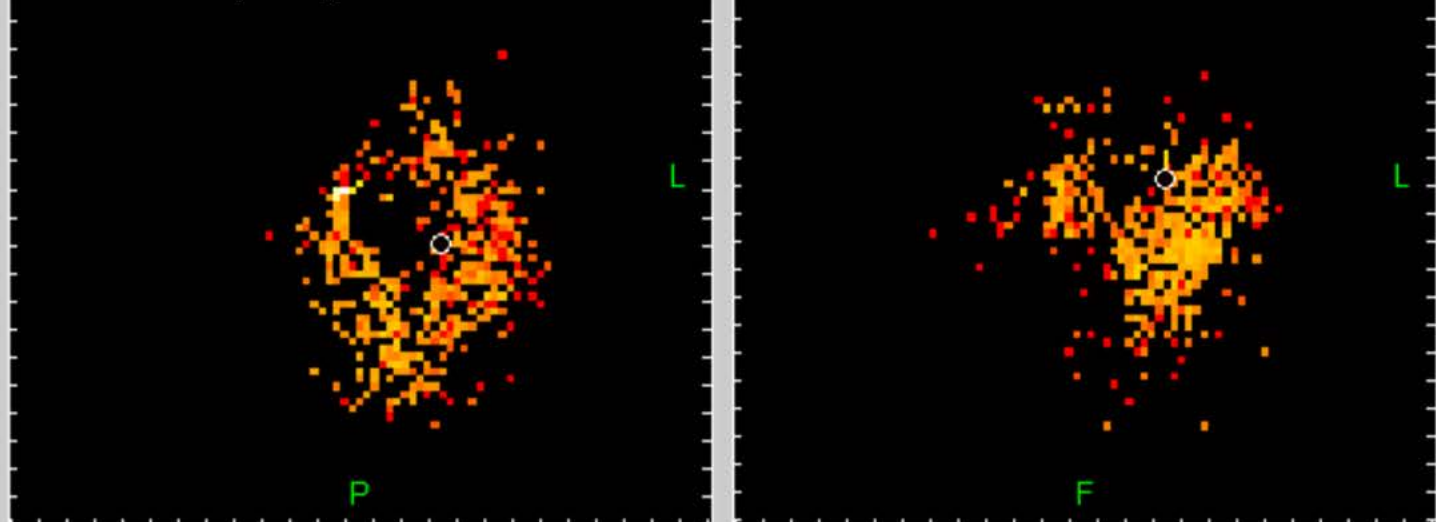


МАГНИТНАЯ КАРДИОГРАФИЯ

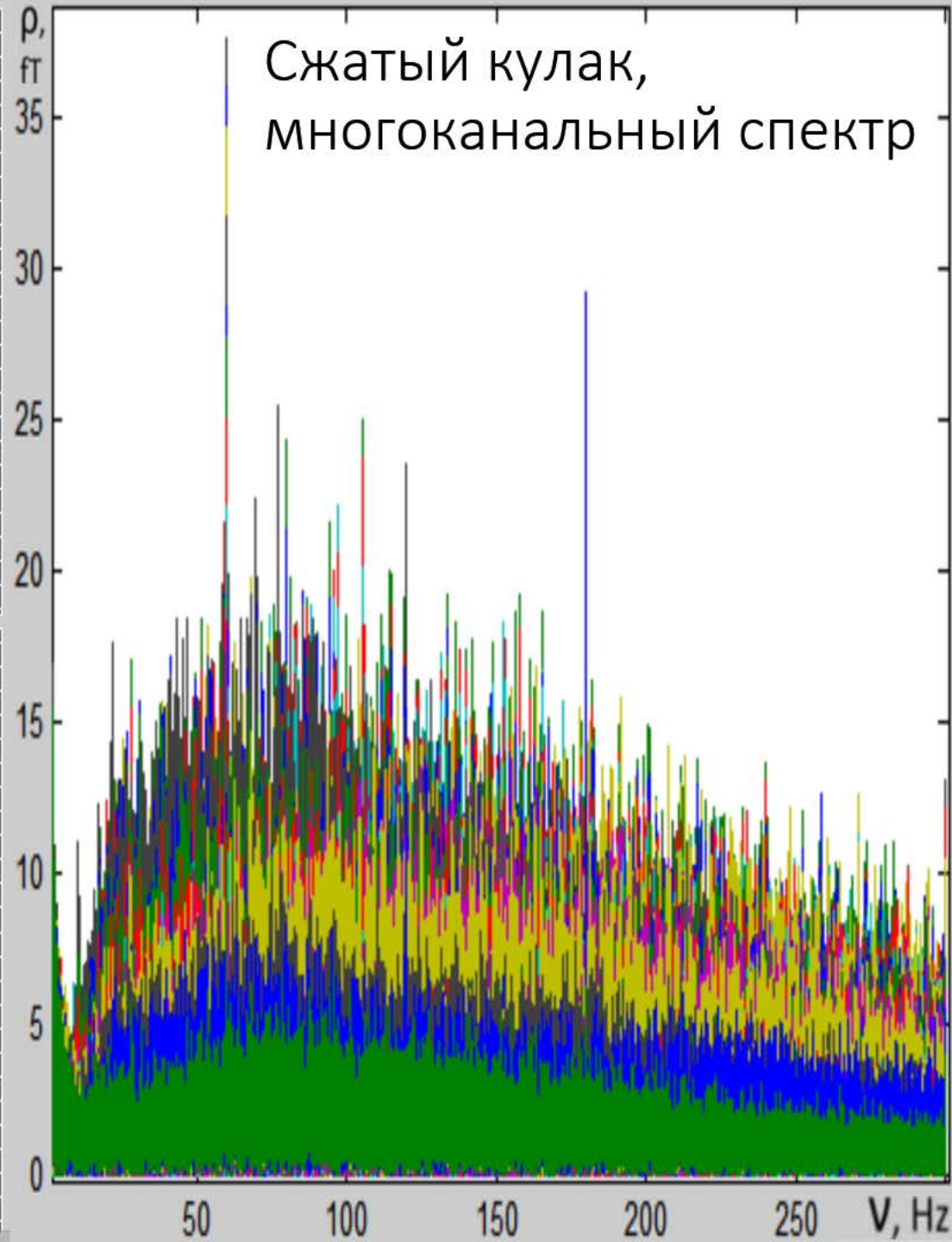


МАГНИТНАЯ МИОГРАФИЯ

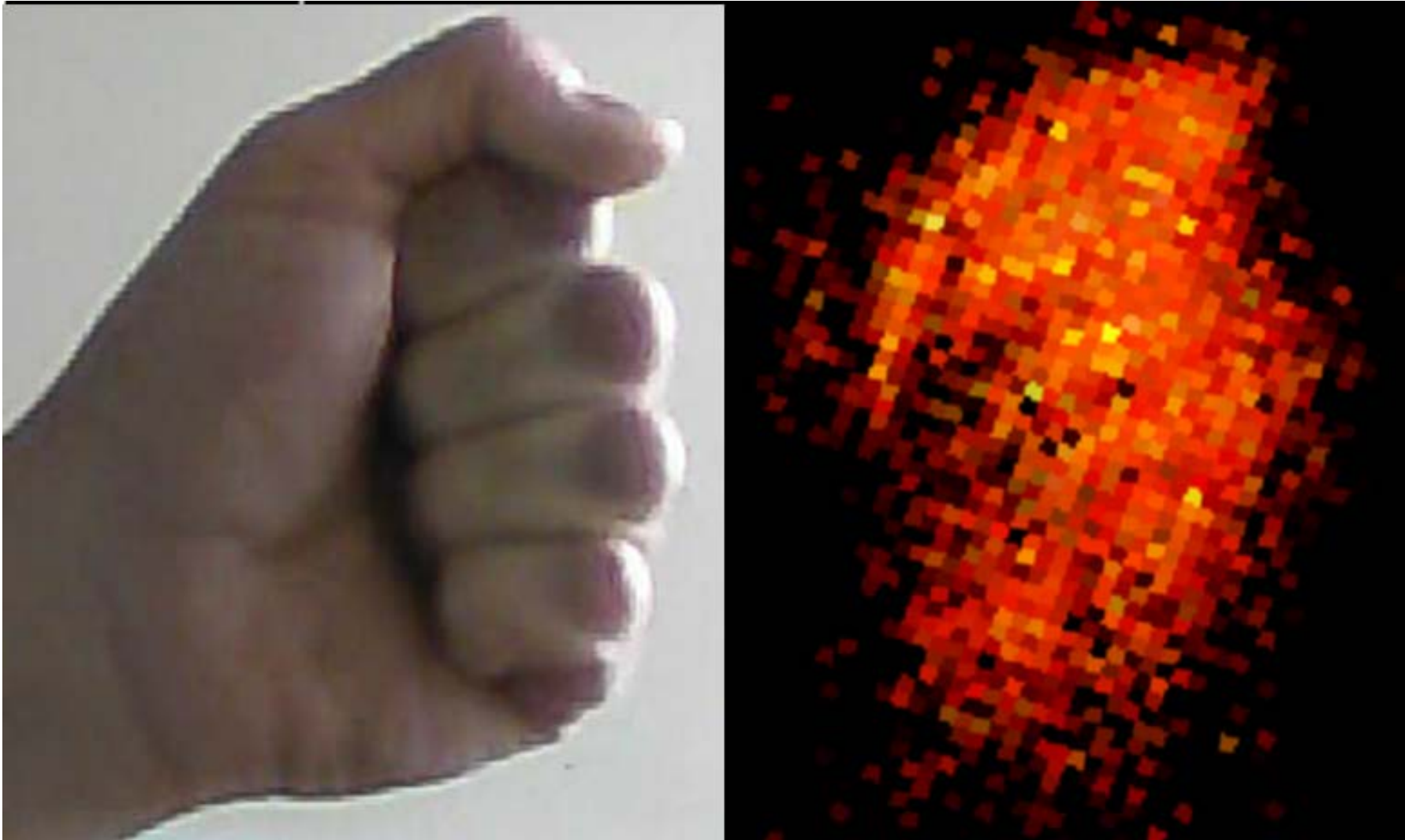
Сжатый кулак, функциональная структура
Томографические сечения



Сжатый кулак, многоканальный спектр



Сжатый кулак, функциональная структура



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

- Ustinin M.N., Sychev V.V., Walton K.D., Llinás R.R. New Methodology for the Analysis and Representation of Human Brain Function: MEGMRIAn. *Mathematical Biology & Bioinformatics*. 2014. V. 9. № 2. P. 464-481.
- Llinás R.R., Ustinin M.N. Frequency-pattern functional tomography of magnetoencephalography data allows new approach to the study of human brain organization. *Front. Neural Circuits*. 2014. V. 8. P. 43.
- Llinás R.R., Ustinin M.N. *Precise Frequency-Pattern Analysis to Decompose Complex Systems into Functionally Invariant Entities*: U.S. Patent. US20140107979 A1. 2014.
- Korshakov A.V., Polikarpov M.A., Ustinin M.N., Sychev V.V., Rykunov S.D., Naurzakov S.P., Grenbenkin A.P., Panchenko V.Ya. Registration and Analysis of Precise Frequency EEG/MEG Responses of Human Brain Auditory Cortex to Monaural Sound Stimulation with Fixed Frequency Components. *Mathematical Biology & Bioinformatics*. 2014. V. 9. № 1. P. 296-308.

Исследование выполняется при поддержке:

Российского фонда фундаментальных исследований

Российской академии наук

Американского фонда гражданских исследований и развития