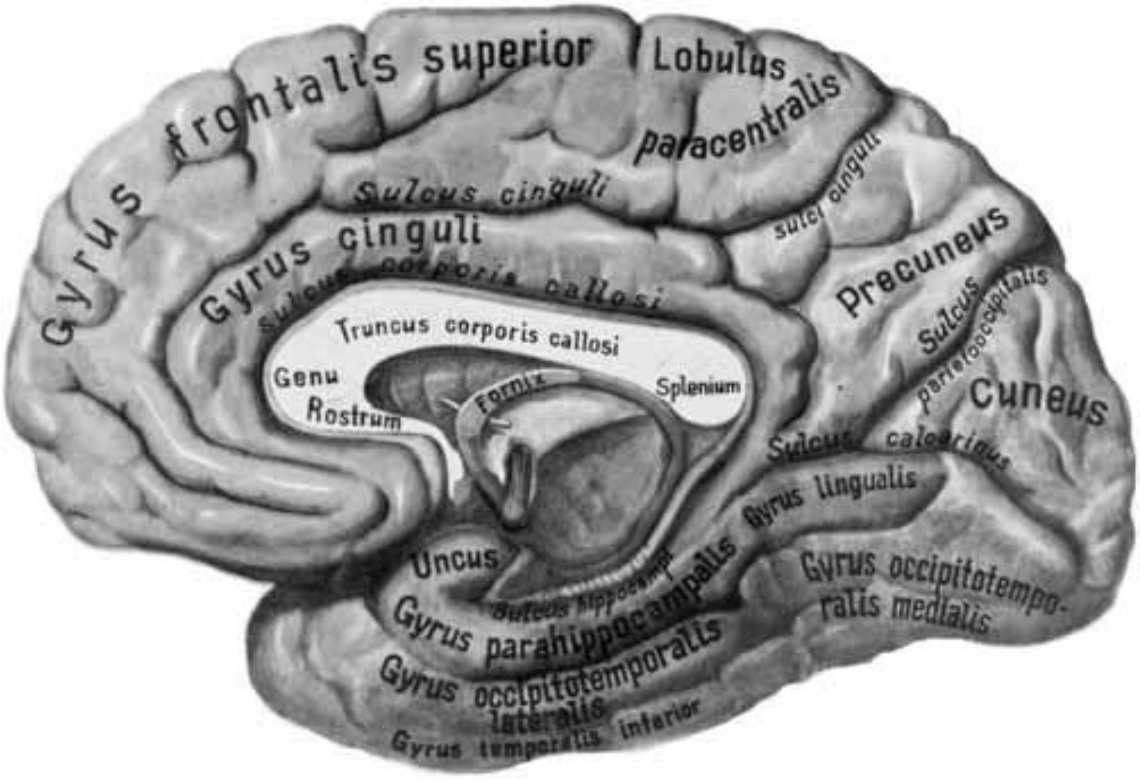
МЭГ



СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА МАГНИТНЫХ ЭНЦЕФАЛОГРАММ

МЕТОДЫ МАГНИТНОЙ ЭНЦЕФАЛОГРАФИИ

МЭГ является наиболее эффективным методом для изучения процессов, протекающих в головном мозге и трехмерной локализации нейронной активности (токовых источников магнитного поля) при решении обратной задачи. Погрешность локализации токовых источников в МЭГ, как правило, не превышает 2–3 мм и может использоваться также в клинической практике.

Магнитные поля, вызванные источниками в объеме мозга, очень слабы (в диапазоне примерно 10^{-12}–10^{-14}Тл, Табл.1), и сильно искажены фоновым шумом.

ТАБЛИЦА 1

Напряженность магнитного поля	Источник
10_{11} 10_{10} 10_{9} 10_{8} 10_{7} 10_{6} 10_{5} 10_{4} 10_{3} 10_{2} 10 1	

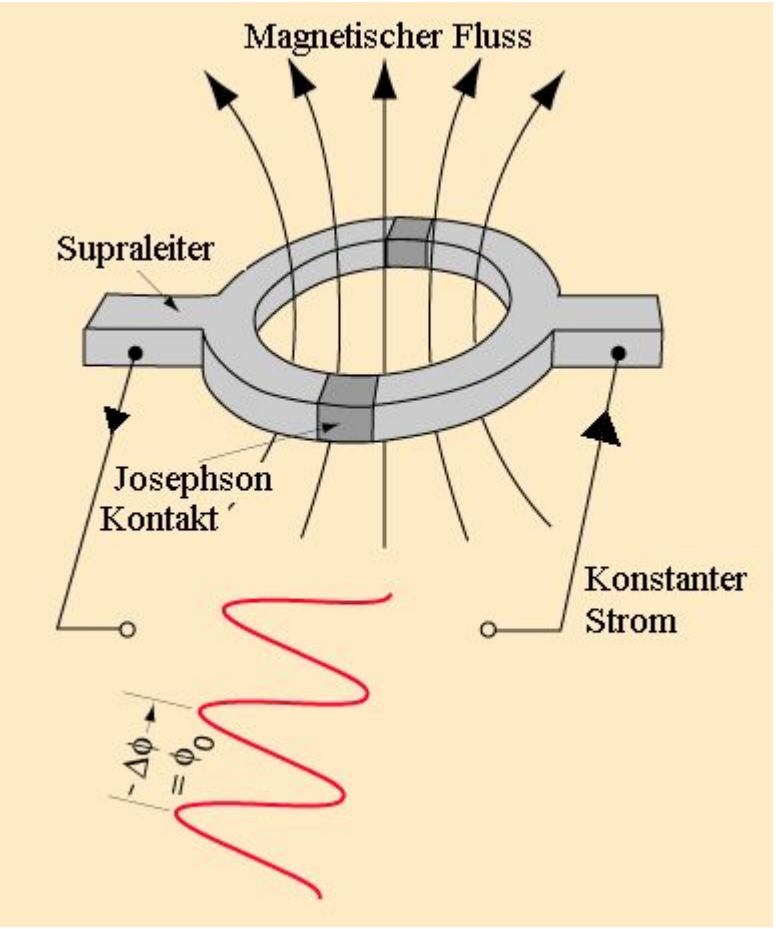
B, Тл
10^-4
10^-5
10^-6
10^-7
10^-8
10^-9
10^-10
10^-11
10^-12
10^-13
10^-14
Поле Земли
Ферромагнитные частицы в организме
Городской шум
Сетевая помеха
Геомагнитный шум
сердце
мышцы
глаза
ритмы мозга
отклики мозга
Порог чувствительности сквида
10^-2
10^-1
1
10
10^2
10^3
f, Гц

SUPERCONDUCTING QUANTUM INTERFERENCE DEVICE, SQUID

Одной из главных составляющих установки МЭГ является сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик — СКВИД.

Это петля из сверхпроводника, которое в одном или двух местах имеет джозефсоновский контакт. Именно работа при сверхнизкой температуре, когда уменьшены тепловые шумы датчика, позволяет создавать предельно чувствительные приборы. Предел чувствительности в современных сквид-магнитометрах составляет величину порядка 10^{-14} Тл. С обнаружением в 1986 оксидных высокотемпературных сверхпроводников появилась принципиальная возможность создания "азотных" сквидов, работающих при темп-ре 77 К.

Детекторы, находящиеся в жидком гелии, встроены в специальный шлем. Вся эта конструкция помещена в специальную камеру, которая экранирует систему съёма от магнитного поля Земли.



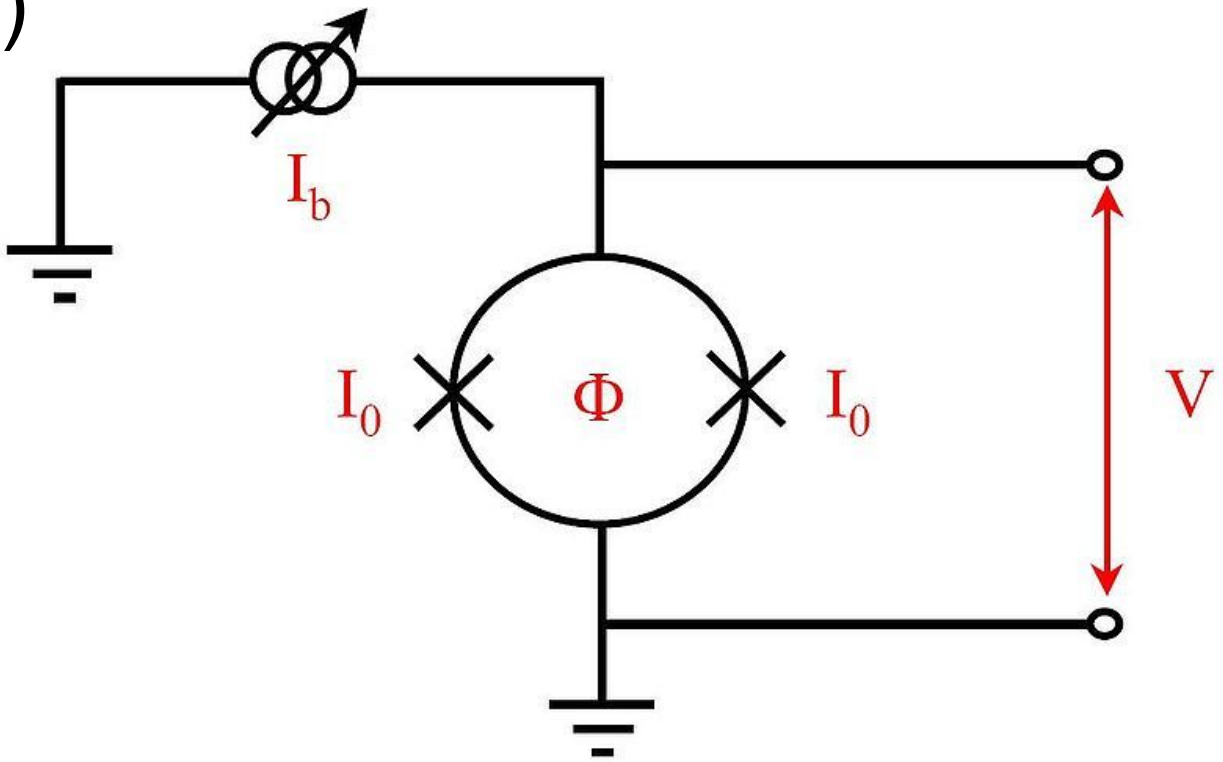
Изменение магнитного потока за счет генерации на туннельном Джозефсоновском контакте.

Принцип работы

Простейший квантовый магнитометр — СКВИД представляет собой сверхпроводящее кольцо с двумя джозефсоновскими туннельными контактами.

Существенным для понимания работы СКВИДа является наличие волновых свойств у электрона — в СКВИДе волна электронов разделяется на две, каждая из которых проходит свой туннельный контакт, а затем обе волны сводятся вместе. При отсутствии внешнего поля обе ветви будут эквивалентны, и обе волны придут без разности фаз. Но при наличии магнитного поля в контуре будет наводиться циркулирующий сверхпроводящий ток. Этот ток в одном из контактов будет вычитаться из постоянного внешнего тока, а во втором — складываться с ним. Теперь две ветви будут иметь разные токи, и между туннельными контактами возникнет разность фаз. Волны электронов, пройдя через контакты и соединившись, будут интерферировать, интерференция проявится как зависимость критического тока СКВИДА от приложенного внешнего магнитного поля. Ступенчатый характер зависимости позволяет чувствовать отдельные кванты потока. Ступенчатый вид зависимости возникает из-за наличия условия изменения фазы электронной волны на джозефсоновском контакте на $2\pi n$, где n — целое число.

СКВИД на постоянном токе (двухконтактный СКВИД)



Электрическая схема СКВИДа на постоянном токе, здесь Ib — внешний ток через СКВИД, I_0 — критический ток, Ф — магнитный поток, приложенный к контуру, V — падение напряжения на СКВИДе

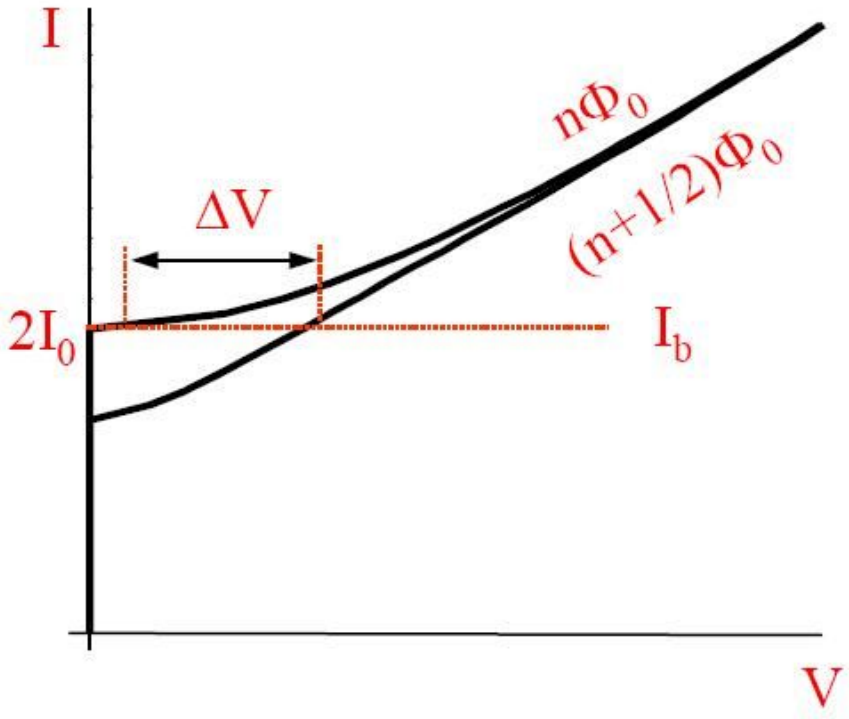
Изобретен в 1964 году физиками Robert Jaklevic, John J. Lambe, James Mercereau, и Arnold Silver

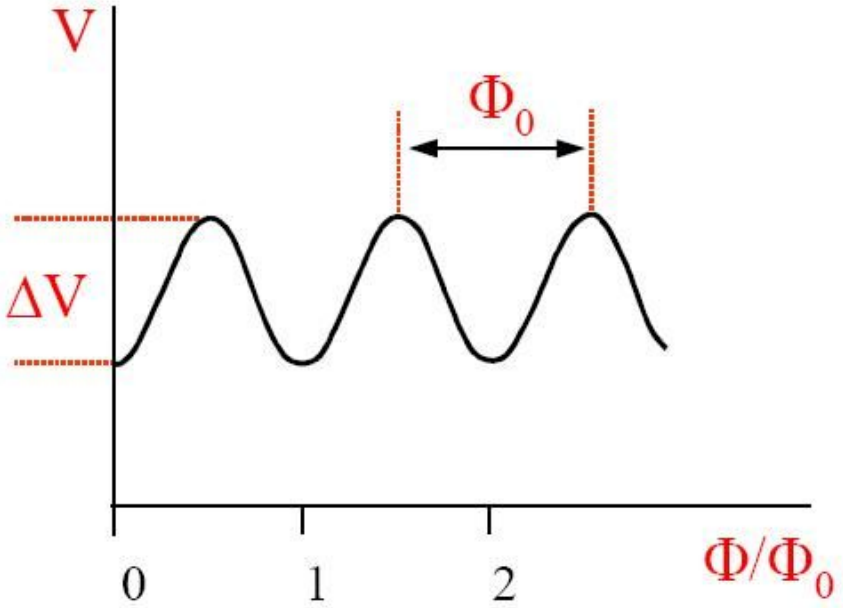
СКВИД на постоянном токе

СКВИД на постоянном токе представляет собой два джозефсоновских перехода, включенных параллельно. Включение осуществляется массивными сверхпроводниками, которые вместе с джозефсоновскими переходами a и b образуют замкнутый контур (кольцо). Внутрь этого кольца введена катушка, создающая магнитный поток.
Работа СКВИДа описывается двумя соотношениями Джозефсона:

$$I_c = I_s \sin \varphi \qquad \hbar \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 2eV$$

Эти соотношения описывают соответственно стационарный и нестационарный эффект Джозефсона. Видно, что наиболее устойчиво сверхпроводящее состояние кольца по отношению к внешнему току будет в случаях, когда полный магнитный поток через интерферометр будет равен целому числу квантов потока Фо. Наоборот, случай, когда полный поток равен полуцелому числу квантов потока, соответствует неустойчивому сверхпроводящему состоянию: достаточно приложить к интерферометру ничтожный ток, чтобы он перешел в резистивное состояние и чтобы вольтметр обнаружил напряжение на интерферометре.





Вольт-амперная характеристика СКВИДа.

Верхняя кривая соответствует n Φ_0 – устойчивое сверхпроводящее состояние, а нижняя — $(n + 1/2)\,\Phi_0$ неустойчивое сверхпроводящее состояние

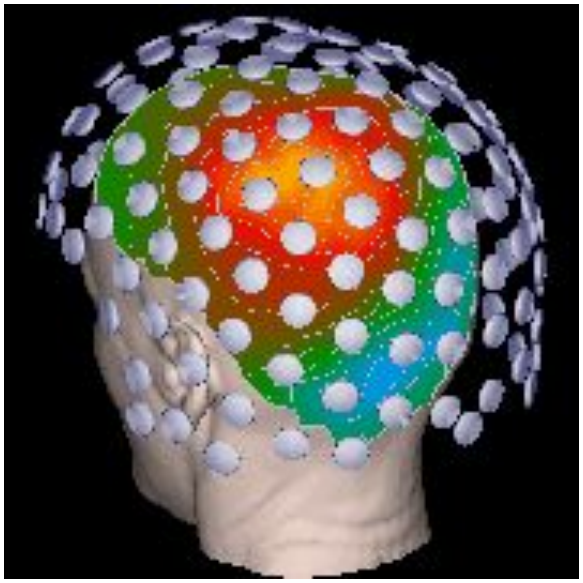
Зависимость напряжения на контакте от магнитного потока через контур. Период колебаний равен одному кванту потока Φ_0

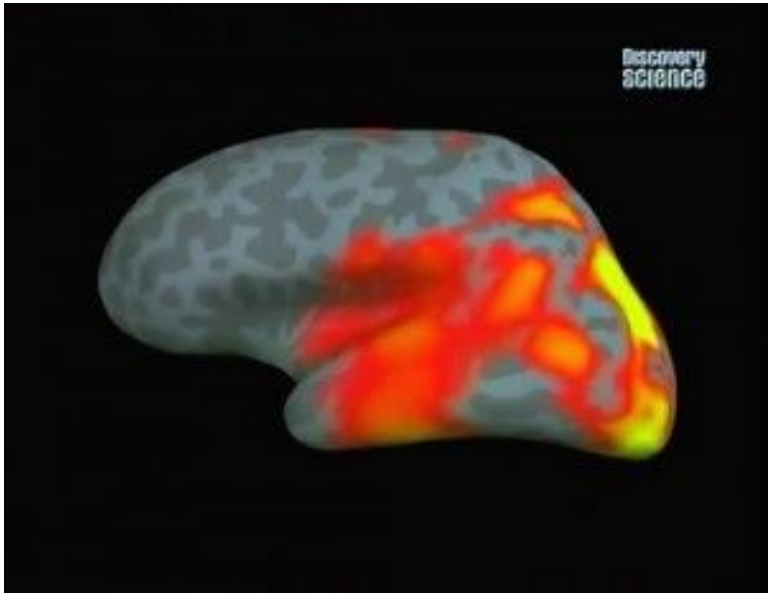
СКВИД на переменном токе (ВЧ-СКВИД)

Работа СКВИДа на переменном токе основана на нестационарном эффекте Джозефсона и использует только один джозефсоновский контакт. ВЧ-СКВИД в измерительной технике демонстрирует обычно более высокую чувствительность за счет более высокой трансформации потока от измерительного объёма (образца). Он дешевле и проще в производстве в малых количествах. Значительная часть экспериментов в фундаментальной физике и измерений в биомагнетизме, включая измерение сверхмалых сигналов, были выполнены с использованием СКВИДов на переменном токе. При пропускании через контакт тока, величина которого превышает критическую, на контакте возникает падение напряжения U, и контакт при этом начинает излучать электромагнитные волны. При этом частота такого излучения: $\omega = \frac{2eU}{\hbar}$ Излучение связано с тем, что объединённые в пары электроны, создающие сверхпроводящий ток, при переходе через контакт приобретают избыточную по отношению к основному состоянию сверхпроводника энергию ~2eU, которую и излучают: $\hbar\omega = 2eU$

Изобретен физиками Robert Jaklevic, John J. Lambe, James Mercereau, Arnold Silver совместно с Джеймсом Эдвардом Циммерманом

Измеряемый сигнал представляет собой пространственно-временную структуру: 148-мерный вектор измерений в 148 точках на поверхности головы, развернутый во временной ряд с частотой опроса датчиков 500 Гц.

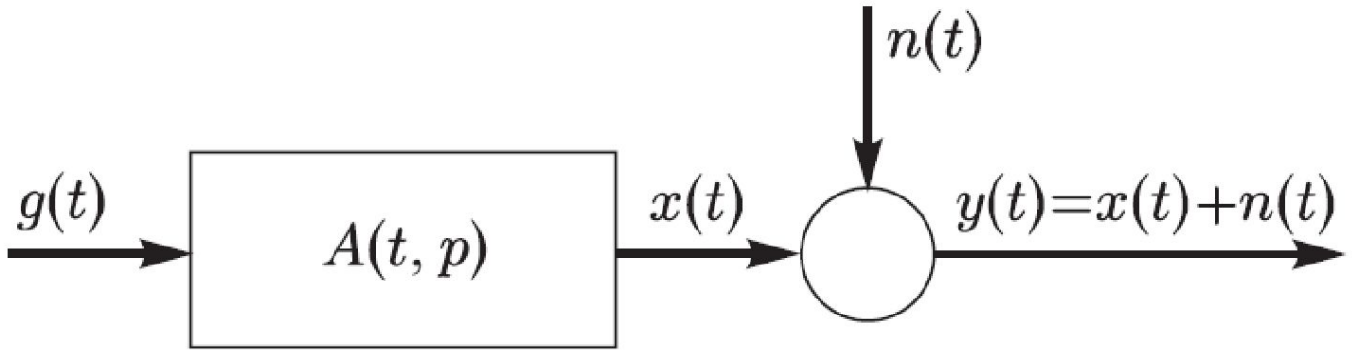




ОБЩАЯ ЗАДАЧА АНАЛИЗА МЭГ

Общая задача анализа МЭГ сводится к задаче параметрической идентификации изучаемой системы.

На рис. 1 представлены g(t)**— входной тестовый сигнал, A(t,p) — оператор опознаваемой системы, x(t) — выходной сигнал, n(t)— внешний шум, y(t) — наблюдаемый сигнал.**



АНАЛИЗ ДАННЫХ

В последнее время интенсивно развивается подход к распознаванию, использующий спектральное представление сигнала ортогональными функциональными разложениями.

При этом элементами признакового пространства являются векторы коэффициентов Фурье. Для распознавания типа активности сигнала предлагается следующий метод:

- **Векторизация данных МЭГ.**
- **Их представление в сферической системе координат в виде ряда по ортонормированным сферическим функциям**

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} P_l^{|m|}(\sin\theta) e^{im\phi}.$$

Наличие простой аналитической связи между коэффициентами разложения при применении к аргументу функции преобразования SO(2) позволяет построить быструю процедуру перебора функций в заданном классе.

Соответственно, исходная функция $f(\theta, \phi)$ определяется формулой:

$$f(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{N} \sum_{m=-l}^{l} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi),$$

где коэффициенты разложения

$$a_{lm} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} f(\theta, \phi) Y_{im}(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi.$$

Выделение трех наиболее информативных коэффициентов разложения. На вход подается матрица, состоящая из полученных 35 коэффициентов для каждого момента времени, т. е. $A \in R^{35 \times N}$ **— количество отсчетов.**

В качестве критерия выбора коэффициентов разложения рассматривается требование максимальности отношения математического ожидания к дисперсии:

$$IN = \max_{i \in [0,35]} \left(\frac{E_i}{D_i} \right).$$

Математическое ожидание для вектора коэффициентов a_i, где i — номер столбца, считается как:

$$Ea_i = \frac{1}{N}(a_{i,1} + a_{i,2} + \ldots + a_{i,N}).$$

- Удаление шума из выбранных гармоник. Используется дискретное вейвлет-преобразование. В качестве материнского вейвлета берется вейвлет Хаара. Данный вейвлет образует ортонормированный базис, обладает свойством симметричности.
- Локализация источника повышенной биомагнитной активности для моментов времени, соответствующих определенному кластеру. Для решения этой задачи используется программа MRIAN.
- Анализ стохастической динамики сигнала. В качестве входных данных используются значения исходной функции для сгруппированных моментов времени.

НАХОЖДЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ИЗВЕСТНЫМ ИСТОЧНИКАМ

Источники магнитной активности головного мозга моделируются точечными токовыми диполями. Каждый такой диполь характеризуется радиус-вектором диполя r_0 и Q — моментом диполя.

Для вычисления магнитной индукции на поверхности головы используется модель токового диполя в проводящей сфере. Для датчика магнитного поля в точке r и имеющего направление n, уравнение записывается следующим образом:

$$B\left(\mathbf{r}_0,\ \mathbf{Q}\right) = \frac{\mu_0}{4\pi F^2}\left(\left(F\left(\mathbf{Q}\times\mathbf{r}_0\right) - \left(\mathbf{Q}\times\mathbf{r}_0,\ \mathbf{r}\right)\nabla F\right),\ \mathbf{n}\right).$$

Здесь

$$F = a(ar + r^2 - (\mathbf{r}_0,\ \mathbf{r})),$$

$$\nabla F = (a^2 r^{-1} + a^{-1}(\mathbf{a},\ \mathbf{r}) + 2a + 2r)\mathbf{r} - (a + 2r + a^{-1}(\mathbf{a},\ \mathbf{r}))\mathbf{r}_0,$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0,\ a = |\mathbf{a}|,\ r = |\mathbf{r}|,\ |\mathbf{n}| = 1,\ \mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7},\ \mathbf{r}_0$$

Токовый диполь представляется функцией плотности тока в виде $\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \mathbf{Q}\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r_0}),$

$\delta(r)$ — функция Дирака.

Магнитная индукция при этом зависит линейно от величины момента Q и нелинейно от положения источника. Можно переписать для величины магнитного потока через поперечную площадь катушки индуктивности: $B = (\mathbf{K}, \mathbf{Q}),$

где

$$\mathbf{K} = \frac{\mu_0}{4\pi F^2}\left(F(\mathbf{r_0} \times \mathbf{n}) - \mathbf{Q} \times \mathbf{r_0} \cdot \mathbf{r}(\nabla F, \mathbf{n})(\mathbf{r_0} \times \mathbf{r})\right).$$

При этом заметим, что $\mathbf{K} \perp \mathbf{r_0}$.

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА МАГНИТНОЙ ЭНЦЕФАЛОГРАФИИ

Если известны приближенные положение и направление токового диполя, можно вычислить величину магнитного поля на всей поверхности головы. Функцию невязки можно записать в виде

$$f = \sum_{i=1}^{N} w_i \left(B_i - B_i^0\right)^2 \to \min.$$

Обратная задача магнитной энцефалографии состоит в нахождении искомых параметров r_0 и Q, минимизирующих функцию невязки. Источники магнитного поля должны, естественно, находиться внутри головы.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА СИГНАЛА ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ ПАРКИНСОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

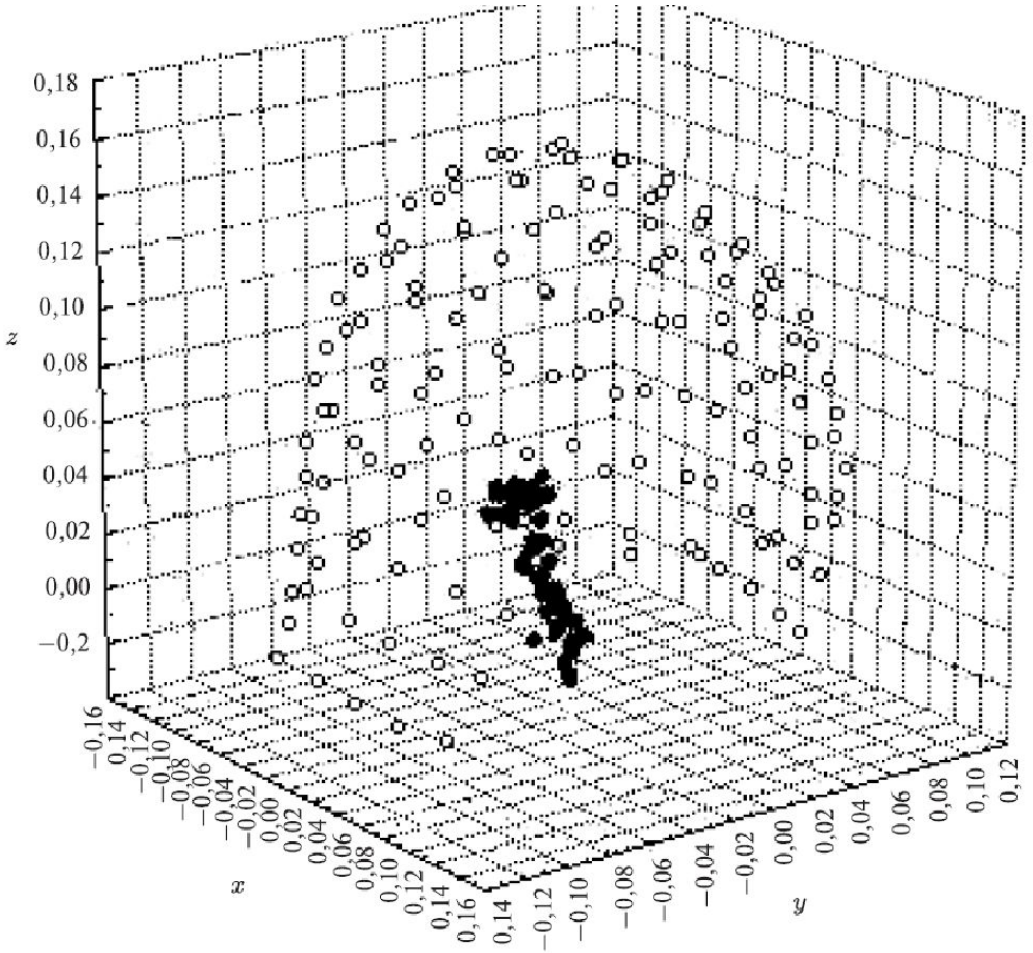
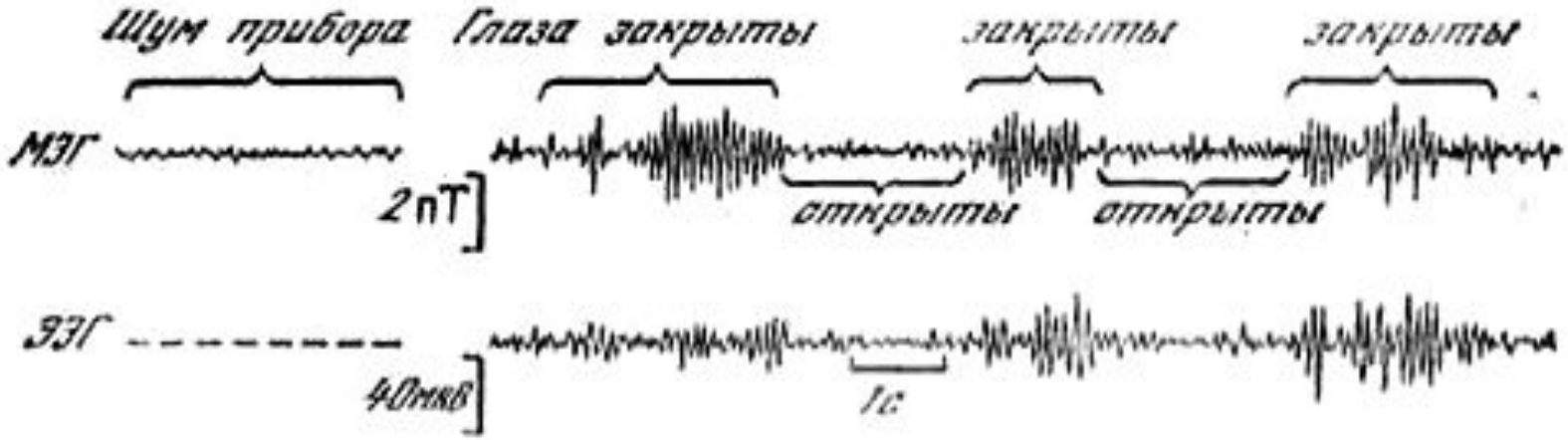


Рис. 3. Распределение альфа-ритмического магнитного поля вокруг головы (*а*) и проявление альфа-ритма на магнито- и электроэнцефалограммах (*б*)

Хорошо видна активность мозга при закрытых глазах и ее подавление при открывании глаз



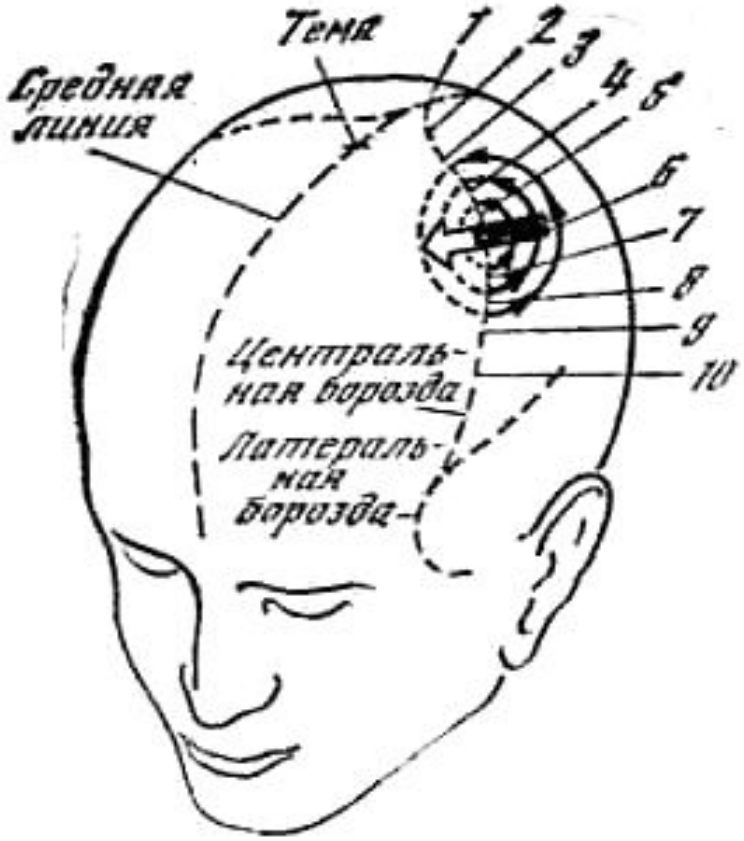
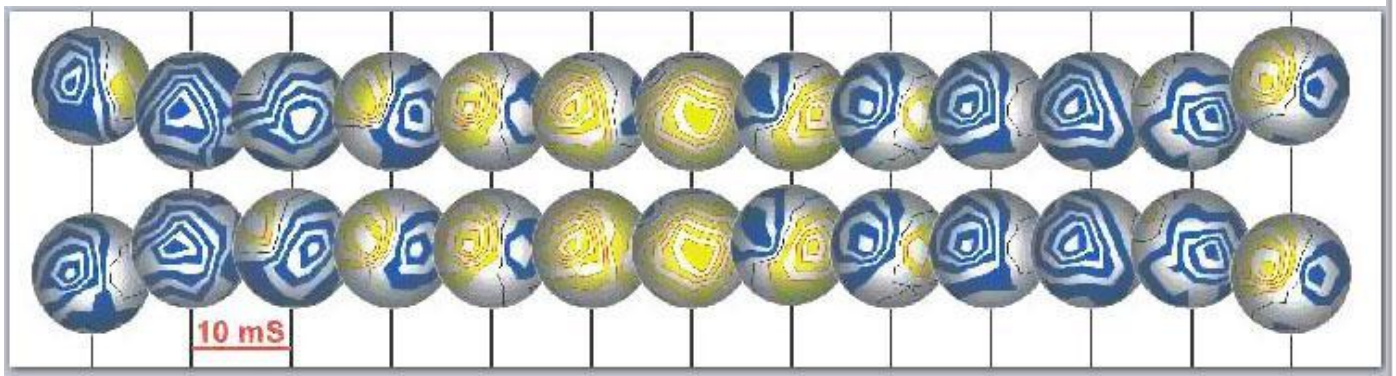


Рис. 4. Проекционные зоны чувствительных рецепторов некоторых других частей тела: 1 - нога; 2 - туловище; 3 - рука; 4 - запястье; 5 - кисть; 6 - мизинец; 7 - большой палец; 8 - лицо; 9 - губы; 10 - язык

Точное измерение положения области нервной активности, сопровождающей раздражение того или иного органа чувств, позволяет строить карты активности коры головного мозга: «соматотопическую» для осязания, «тонотопическую» для слуха, «ретинотопическую» для зрения.
Такие карты могут служить основой для понимания процессов переработки поступающей в головной мозг информации и постановки более сложных нейрофизиологических экспериментов на базе полученных результатов.
Причем исследования можно проводить на вполне здоровых людях без какого-либо оперативного вмешательства и существенных неудобств для испытуемого.
Если же учесть, что пока мы рассматриваем лишь простейшие проявления нервной активности и что более сложные процессы и мозге, которые тоже картируются магнитографически, будут иметь, скорее всего, ярко выраженные индивидуальные черты, то подобное применение бесконтактных методов магнитометрии представляется чрезвычайно перспективным.

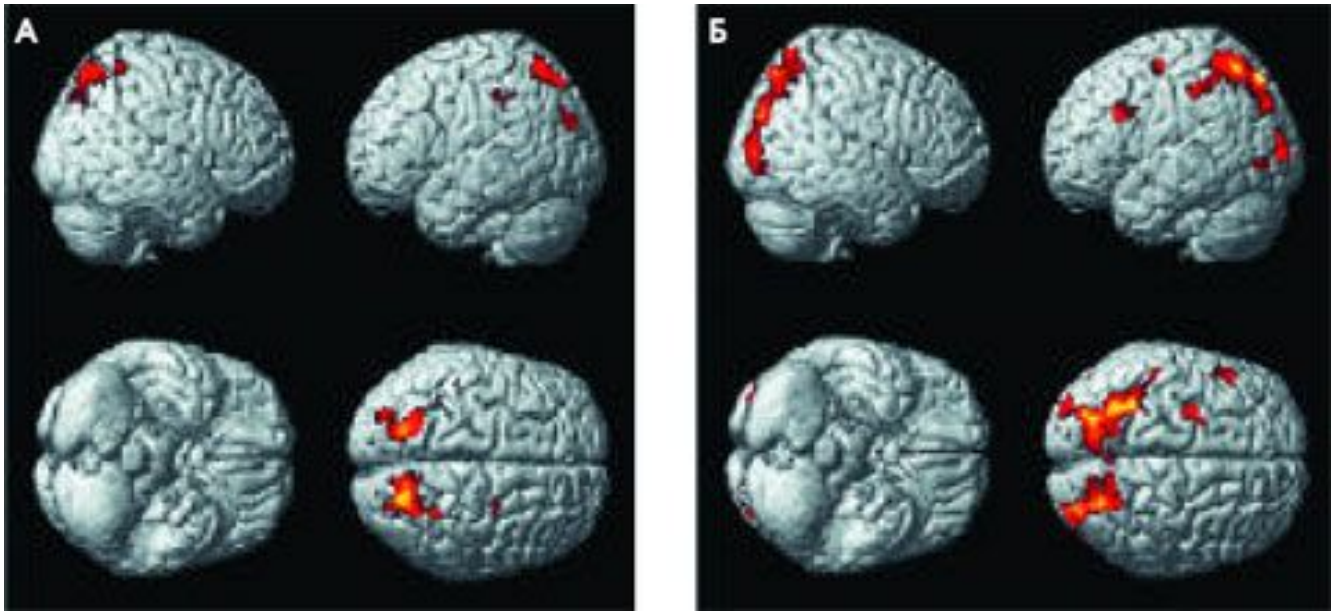
КАРТРИРОВАНИЕ

Точное измерение положения области нервной активности, сопровождающей раздражение того или иного органа чувств, позволяет строить карты активности коры головного мозга: «соматотопическую» для осязания, «тонотопическую» для слуха, «ретинотопическую» для зрения.
Такие карты могут служить основой для понимания процессов переработки поступающей в головной мозг информации и постановки более сложных нейрофизиологических экспериментов на базе полученных результатов. Причем исследования можно проводить на вполне здоровых людях без какого-либо оперативного вмешательства и существенных неудобств для испытуемого.



Два разных участка многоканальной магнитоэнцефалограммы с одинаковым ходом изменения карты магнитного поля, обнаруженные с применением нейро-сетевого алгоритма. Карта в виде линий равной напряженности поля, наложена на сферу. В области, окрашенной желтым цветом, силовые линии выходят из головы, а в области синего цвета направлены внутрь. Последовательность шариков отражает изменение картины нейромагнитного поля с шагом 10 миллисекунд. Использование методик, распознающих характерные события внутримозговой активности в реальном времени, позволяет реализовать принципиально новые способы изучения когнитивной функции мозга.

фМРТ



Снимки функциональной магнитно-резонансной томографии мозга при выполнении задачи, не задействующей лобные доли (А), и при выполнении задачи, задейсвующей лобные доли (Б).