



Методика наведения транскраниальных стимуляторов на заданные мозговые структуры по проекционным таблицам

Н.Н. Каркищенко¹, Д.Б. Чайванов^{1, 2}, Ю.А. Чудина^{1, 2}, А.А. Варганов^{1, 2}

¹ – ФГБУН «Научный центр биомедицинских технологий ФМБА России», Московская область

² – НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Контактная информация: к.ф.-м.н. Чайванов Дмитрий Борисович, chaivanov@yandex.ru

В статье описаны современные методики постановки стимулирующих электродов, дано их краткое описание и анализ. Приведена методика постановки стимулирующих электродов, разработанная на базе лаборатории нейростимуляции НИЦ «Курчатовский институт».

Ключевые слова: наведение стимулирующих электродов, стереотаксис, система «10-20», алгоритмы расчета проекций зон мозга на поверхность головы.

Известные системы наведения стимуляторов и их недостатки

В настоящее время все больший интерес вызывают методы электромагнитного воздействия на мозг и нервную систему, применяющиеся, в основном, для лечения физических и психических патологий [1, 2, 3, 9]. Область применения этих методов расширяется и включает способы оптимизации и увеличения эффективности физической и психической деятельности человека, в том числе, с учетом ее профессиональной специфики.

Различают инвазивные и неинвазивные методы стимуляции, отличающиеся

рядом особенностей: степенью нарушения целостности мозга, целевыми областями применения, ограничениями и т.п. Инвазивные методы связаны с электрической стимуляцией поверхностных и глубоких структур мозга через вживленные электроды, а неинвазивные основаны на процедурах электромагнитного воздействия без повреждения черепной коробки и обозначаются как транскраниальные. Неинвазивные методы отличаются большим разнообразием и включают ультразвуковую стимуляцию, магнитную стимуляцию, электрическую стимуляцию и микропо-

ляризацию. Ключевой проблемой для всех методов стимуляции вне зависимости от их особенностей и применения является наведение стимулирующих электродов, обеспечивающее необходимую и достаточную точность воздействия на определенные структуры мозга.

Стереотаксис. В практике применения интрацеребральной электростимуляции для вживления электродов используют специально разработанную стереотаксическую систему, которая представляет собой сложный многокомпонентный гибкий методический комплекс устройств, инструментов, методических приемов и вычислительных способов [1]. Стереотаксис является медицинской технологией, обеспечивающей доступ к глубоким структурам головного мозга, получение от них информации и осуществление локального воздействия на эти зоны. В рамках физиологической школы акад. Н.П. Бехтерева выдвинулось направление, названное «компьютерный стереотаксис», который представлял собой методику стереотаксической имплантации в мозг человека многоконтактных долгосрочных электродов. Для компьютерного стереотаксиса характерным являются следующие методические приемы: 1) преобразование стереотаксических координат в произвольно расположенных в пространстве координатных системах, что требует компьютеризации расчетов; 2) использование дополнительной, вспомогательной системы координат, которая вводится путем маркировки головы пациента [1].

Стереотаксическая система наведения может реализовываться на основе непосредственной и опосредованной локализации. Непосредственная локали-

зация имеет высокую точность и заключается в измерении координат целевой точки на основе данных МРТ-обследования каждого пациента. Опосредованная локализация предполагает определение внутримозговых ориентиров, которые служат для построения системы координат мозга, которая позволяет сравнить внутримозговое пространство пациента со стереотаксическим атласом. Опосредованная локализация применяется в том случае, если искомая структура не видна при рентгеновском интроскопическом обследовании.

В целом, стереотаксис является довольно точным методом локализации структур мозга, но для его реализации требуется использование сложного и дорогостоящего оборудования. Так, для функционального стереотаксиса с имплантацией в ядра и проводящие пути головного мозга необходимо использовать предоперационное МРТ-обследование, для нефункционального стереотаксиса с воздействием на опухоли головного мозга, кисты, абсцессы, гематомы – РКТ-обследование, производимое перед операцией [2]. Недостатком РКТ-обследования является сложность идентификации структур мозга на полученном изображении, недостатком МРТ – большая величина ошибки по одной из 3-х координат изображения, которая может достигать 5-6 мм. Процедуры стереотаксического наведения являются довольно точными: общая погрешность стереотаксических процедур невысока и составляет 1-3 мм [2], но требуют продолжительной и трудоемкой подготовки, что оправдывается при внутримозговых вмешательствах.

Наведение по системе «10-20». Задачи транскраниальной нейростиму-

ляции можно решать более экономичными, но и менее точными методами, в силу достаточно большого размера стимулируемой области мозга относительно возможной ошибки определения местоположения этой области. Радиус области воздействия при магнитной стимуляции составляет примерно 16 мм, при микрополяризации область затекания тока не меньше размера используемых электродов и составляет 5-15 мм, при ультразвуковой стимуляции область воздействия также достаточно велика и составляет 5-10 мм [8]. В этой связи, допустимым является использование более простых и менее точных способов наведения стимулирующих электродов.

Среди современных способов наведения стимулирующих электродов, использующихся в практике транскраниальных воздействий, применяют схему Кронлейна-Брюсовой и схему расположения электродов по системе «10-20», разработанную для электроэнцефалографических обследований.

Анатомо-топографическая схема Кронлейна-Брюсовой позволяет сориентироваться относительно основных борозд головного мозга. Согласно этой схеме, на черепе проводится ряд параллельных линий: от надпереносья до выступа затылочной кости, по нижнему краю глазницы и верхней части наружного слухового прохода, по верхнему краю глазницы. Далее, к этим линиям проводятся три перпендикуляра через середину скуловой дуги, суставной отросток нижней челюсти и задний край сосцевидного отростка. При соединении точки пересечения верхней горизонтальной и передней вертикальной линий с точкой пересечения саггитальной и задней вертикальной линией эта линия

будет проходить по проекции центральной борозды. Впереди нее лежит лобная доля, а сзади – теменная и т.п. [9]. Схема Кронлейна-Брюсовой дает приблизительное представление о локализации основных корковых структур и может применяться для стимуляции довольно крупных мозговых областей, например, при магнитной стимуляции.

Схема постановки «10-20» является более точным способом определения локализации частей коры [5]. Эта схема разработана с учетом рентгенологических и патологоанатомических данных и пригодна для стимуляции структур мозга пациентов с разными размерами и формой черепа. В основе схемы «10-20» лежит измерение расстояния для определения места постановки электродов в процентах от основных размеров черепа, к которым относятся расстояния: 1 – между переносицей (nasion) и затылочным бугром (inion) в саггитальной плоскости и 2 – между наружными слуховыми проходами во фронтальной плоскости. Эти расстояния принимают за 100%. В саггитальной плоскости на расстоянии 10% выше затылочного бугра располагается линия затылочных электродов, впереди от которой на расстоянии 20% находится линия теменных электродов, далее через 20% – центральных электродов, еще через 20% – лобных электродов. Лобный полюсный электрод отстоит на 10% от переносицы и на 20% – от линии лобных электродов. Во фронтальной плоскости соблюдение процентных соотношений сохраняется. В 10% от наружных слуховых проходов с каждой стороны расположены височные электроды, в 20% от них в местах пересечения с линиями затылочных, теменных, центральных и лобных

электродов располагаются соответствующие электроды в каждом полушарии. По средней линии устанавливаются саггитальные электроды, обозначенные по названию соответствующей доли. Экспериментально было показано, что зоны мозга, выделенные с помощью схемы «10-20», соответствуют полям на гистологической карте Бродмана [11, 12]. Основным недостатком этой системы является сложность расположения стимулирующих электродов именно над теми мозговыми структурами, над которыми не предусмотрено расположение электродов, устанавливаемых системой. Иначе говоря, система «10-20» предполагает расположение электродов над центрами проекций на поверхность головы полей Бродмана, но не предусматривает способа расчета и постановки их над более локальными или протяженными областями мозга, к которым, например, относятся извилины.

В связи с этим, нами была разработана методика более точной и избирательной постановки стимулирующих электродов на поверхности головы.

Новая методика наведения стимуляторов на поверхность скальпа

На базе лаборатории нейростимуляции НИЦ «Курчатовский институт» была разработана методика наведения, которая может быть использована для более точной и избирательной постановки транскраниальных стимулирующих электродов, реализованная в виде специализированных компьютерных программ. Эта методика включает три алгоритма: 1) локализации полей по Бродману [7]; 2) построения проекций средних линий извилин головного мозга

человека [6] и 3) алгоритм преобразования координат проекционных таблиц.

Алгоритм локализации полей по Бродману основан на использовании угловых криволинейных координат на поверхности головы, что позволяет учесть вариативность размеров и формы черепа различных испытуемых. Компьютерная программа, реализующая этот алгоритм, позволяет находить расчетное местоположение проекций областей мозга по Бродману на поверхности головы [4, 7]. Она использует данные электронной версии атласа Тайлераха [10] и позволяет рассчитать угловые координаты для мозга данного размера.

Более подробное описание данного алгоритма описано в работе [7], в которой также представлены расчетные значения угловых координат центров проекций полей по Бродману относительно зон из атласа Тайлераха, отдельно для правого и левого полушарий.

Алгоритм локализации извилин головного мозга человека на поверхность головы предполагает расчет проекции средней линии извилины мозга на поверхность скальпа по данным атласа Тайлераха и определение ширины извилины в каждой точке ее средней линии. Данный алгоритм позволяет рассчитать координаты проекции по всей длине извилины с учетом ее неровностей и разветвлений.

Результатом реализации этого алгоритма является средняя линия внутри извилины, описанная множеством индексов, соответствующих точкам на ней. Средняя линия характеризует геометрический «скелет» извилины как тела в пространстве. Для обеспечения достаточной степени инвариантности к размерам головы рассчитанных резуль-

татов, описанных в работе [6], в качестве системы координат использовали угловые криволинейные координаты.

Алгоритм преобразования координат проекционных таблиц рассчитывает расстояние на фронтальной и горизонтальной дугах в зависимости от угловых координат точки и в зависимости от размеров головы человека, выражаемое длиной окружности головы. Алгоритм работает в приближении, что голова в общем случае является поверхностью, получающейся из сферы аффинным преобразованием. Далее вычисляется длина дуг с учетом среднестатистического смещения начала координат и среднестатистического отношения коэффициентов растяжения по осям. То есть, по сути, решается простая геометрическая задача нахождения длины заданной дуги на поверхности сферы, подвергнутой аффинному преобразованию. Это делается в два этапа: сначала находятся точки дуги, соответствующей угловым координатам на сфере, путем пересечения плоскости, проходящей через дугу, со сферой. На втором этапе к этим точкам применяется аффинное преобразование и вычисляется длина полученной ломанной. При достаточном количестве точек мы получаем длину дуги с высокой точностью. Нами была написана компьютерная программа, реализующая данный алгоритм.

Результаты всех трех описанных алгоритмов можно использовать для построения новой, более гибкой технологии наведения стимулирующих электродов, которая также учитывает преимущества методики постановки ЭЭГ электродов по системе «10-20».

Предложенная нами методика постановки электродов включает следующую последовательность этапов:

1. **Определение положения центральной точки C_z** на поверхности головы. Для этого необходимо измерить расстояние между переносицей (N_z) и затылочным бугром (I_z) в саггитальной (медиальной) плоскости, а затем отложить от точки N_z половину полученной длины. Найденная точка и будет соответствовать центральной точке C_z (рис. 1).

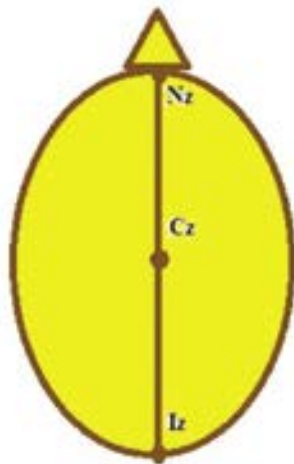


Рис. 1. Определение положения центральной точки и нахождение длины горизонтальной дуги.

2. **Нахождение длины горизонтальной дуги.** Горизонтальная дуга – это дуга, проходящая через точки N_z и I_z в горизонтальной плоскости. Нужно измерить длину окружности головы по этой дуге.

3. **Вычисление расстояния на горизонтальной дуге,** соответствующее искомой структуре мозга, которое рассчитывается с помощью компьютерной программы, реализующей алгоритм преобразования координат. На входе программа получает длину окружности

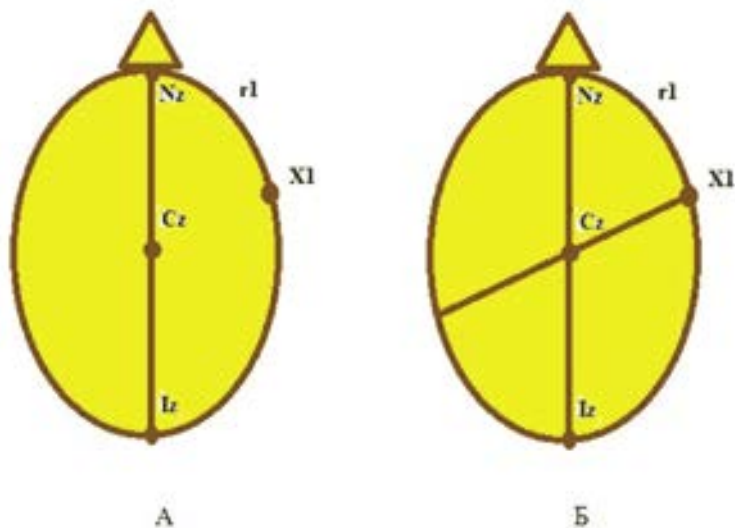


Рис. 2. Определение положения первой угловой координаты (А) и нахождения длины горизонтальной дуги (Б).

головы и угловые координаты точки. Обозначим это расстояние как « $r1$ ».

4. Определение положения первой угловой координаты на поверхности головы. Для этого найденное расстояние $r1$ откладываем от точки Nz или Cz в зависимости от расположения искомой структуры и обозначаем полученную точку $X1$ (рис. 2А).

5. Нахождение длины дуги во фронтальной плоскости. Для этого необходимо провести дугу через точки Cz и $X1$ в плоскости, перпендикулярной горизонтальной плоскости, и измерить длину полученной дуги. Обозначим длину дуги во фронтальной плоскости $R2$ (рис. 2Б).

6. Вычисление расстояния на фронтальной дуге, соответствующее искомой структуре мозга, рассчитывается с помощью компьютерной программы, также как и расстояние по фронтальной дуге. Обозначим это расстояние как « $r2$ ».

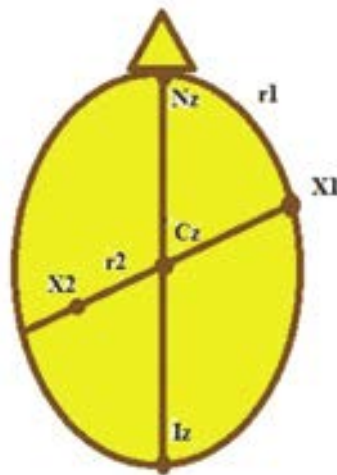


Рис. 3. Определение положения искомой структуры мозга.

7. Определение положения искомой структуры мозга на поверхности головы осуществляется путем отложения расстояния $r2$ по найденной фронтальной дуге, образованной точками Cz и $X1$, от точки Cz , которую обозначим $X2$ (рис. 3).

Данная методика позволяет определить положение на поверхности головы структуры любой формы и протяженности. Для постановки стимулирующих электродов по данной методике можно использовать расчетные угловые координаты не только для полей Бродмана, приведенные в работе [7], но также координаты средней линии определенной извилины, приведенные в работе [6].

Список литературы

1. *Аничков А.Д., Полонский Ю.З., Низковолос В.Б.* Стереотаксические системы. - СПб.: Наука. 2006. 142 с.
2. *Бехтерева Н.П., Аничков А.Д., Гурчин Ф.А., Дамбинова С.А., Илюхина В.А. и др.* Лечебная электрическая стимуляция мозга и нервов человека / под ред. Н.П. Бехтеревой. - М.: АСТ; СПб.: Сова. Владимир: ВКТ. 2008. 464 с.
3. *Вальтер Х.* Функциональная визуализация в психиатрии и психотерапии - М.: АСТ. Астрель. Полиграфиздат. 2004 г.
4. *Вартанов А.А., Чайванов Д.Б., Вартанов А.В.* Локализация на скальпе проекций поверхностных структур мозга по атласу Тейлераха. - М.: Припринт НИЦ «Курчатовский институт». ИАЭ-6687/14. 2011.
5. *Гнездицкий В.В.* Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография. - М.: «МЕДпресс-информ». 2004. 624 с.
6. *Каркищенко Н.Н., Вартанов А.А., Чайванов Д.Б.* Алгоритм построения проекций средних линий извилин головного мозга человека на поверхность скальпа // Биомедицина. 2012. № 2. С. 105-108.
7. *Каркищенко Н.Н., Вартанов А.А., Вартанов А.В., Чайванов Д.Б.* Локализация проекций полей Бродмана коры головного мозга человека на поверхность скальпа // Биомедицина. 2011. № 3. С. 40-45.
8. *Каркищенко Н.Н., Чайванов Д.Б., Вартанов А.А.* Выбор оптимальной технологии локализации транскраниальных нейростимуляторов на скальпе человека // Биомедицина. 2012. № 1. С. 6-9.
9. *Пинчук Д.Ю.* Транскраниальные микрополяризации головного мозга: клиника, физиология. - СПб: Человек. 2007. 496 с.
10. *Чайванов Д.Б., Вартанов А.А.* Результаты расчета проекций средних линий извилин головного мозга человека на поверхность скальпа // Вестник психофизиологии. 2012. № 4.
11. *Tailorah J., Tournoux P.* Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain, George Thieme Verlag Stuttgart. - New York. Thieme Medical Publishers. Inc. New York. 1988.
12. *Towle V.L., Bolaños J., Suarez D., Tan K., Grzeszczuk R., Levin D.N., Cakmur R., Frank S.A., Spire J.P.* The spatial location of EEG electrodes: locating the best-fitting sphere relative to cortical anatomy / EEG and Clin. Neuropsychol. 1993. V. 86. P. 1-6.
13. *Homan R.W., Herman J., Stewart C., Purdy P.* Cerebral location of international «10-20» system electrodes placement / EEG and Clin. Neuropsychol. 1987. V. 66. P. 377-382.

Targeting technique of transcranial stimulators on the set brain structures according to projective tables

N.N. Karkischenko, D.B. Chayvanov, Yu.A. Chudina, A.A. Vartanov

The article describes modern methods of production stimulating electrodes, here is given its description and analysis. The method of production stimulating electrodes is shown here. This method is developed on the basis of laboratory RSC "Kurchatov Institute".

Key words: guidance stimulating electrodes, stereotaxy, the system "10-20", projection algorithms for areas of the brain to the surface of the head.