

УДК 612.014.423. + 843.7

© 1996 г. ВЕРХЛЮТОВ В. М.

МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ ДИПОЛЬНОГО ИСТОЧНИКА АЛЬФА-РИТМА  
ЗРИТЕЛЬНОЙ КОРЫ ЧЕЛОВЕКА

Предложена модель источника альфа-ритма в виде волны изменений набора элементарных диполей, перемещающейся по коре шпорной борозды и прилегающим участкам продольной борозды. Моменты элементарных диполей менялись по синусоидальному закону. Переливы различной направленности создавались выключением или депрессией волны на разных лучах крестообразной структуры, воспроизводящей анатомическое строение борозд зрительной коры затылочной области мозга человека. Дипольные волны синхронно начинали свое движение из симметричных эпицентров, располагающихся или в нижних отделах крестообразной структуры, соответствующих нижним отделам продольной борозды, или на концах боковых лучей этой структуры, которые соответствовали дну шпорной борозды. При нижнем положении эпицентров модель позволила воспроизвести перелив лоб — затылок и вращающийся перелив, а при латеральном — имитировался поперечный перелив и был обнаружен феномен нулевого поля, который может быть рассмотрен как один из механизмов десинхронизации ЭЭГ.

Организованная форма динамики пространственных распределений биопотенциалов известна достаточно давно. В отечественной литературе этот феномен получил название переливов [5], а зарубежные исследователи определяли его как «travelling wave» — движущуюся волну [17, 18]. К этому явлению относят пространственную динамику электроэнцефалограммы (ЭЭГ) в разные диапазонах частот, но лучшую выраженность и регулярность имеют альфа-переливы.

Переливы в альфа-диапазоне проявляются упорядоченными и регулярными изменениями областей электронегативности и электропозитивности при картировании многоканальной ЭЭГ. Их классифицируют по направлению движения экстремумов и изопотенциальных линий электрического поля на поверхности скальпа. Наиболее часто встречаются затылочно-лобные переливы (перемещение фронтов изопотенциальных линий и экстремумов поля по направлению от затылка ко лбу или, наоборот). Редко наблюдаются поперечные (перемещение фронтов изопотенциальных линий и экстремумов поля в поперечном направлении) и диагональные переливы (перемещение фронтов и экстремумов поля от лобно-височной области одного полушария к теменно-затылочной области другого или в обратном направлении) [8].

Альфа-переливы создаются организованным изменением потенциалов на всей поверхности головы, и поэтому их рассматривали как один из видов глобальной синхронизации биопотенциалов [6]. Однако механизм этой синхронизации до сих пор остается невыясненным.

На основании исследований траекторий движения переливов была предложена гипотеза «радиальной развертки» [3]. Было показано, что фокус электронегативности перемещается по замкнутой траектории и его линейная скорость минимальна в теменно-затылочной области головного мозга человека. Исходя из этих данных, можно было предполагать наличие единого источника, расположенного в задних отделах головного мозга, что позволяло сделать вывод о дипольном характере исследуемого явления. Однако теория токового диполя в проводящей среде получила распространение несколько позже [20]. Вместе с тем эта гипотеза помогла предсказать наличие еще одного вида альфа-переливов, такого, как вращающееся распределение (вращение нулевой изопотенциальной линии в те-

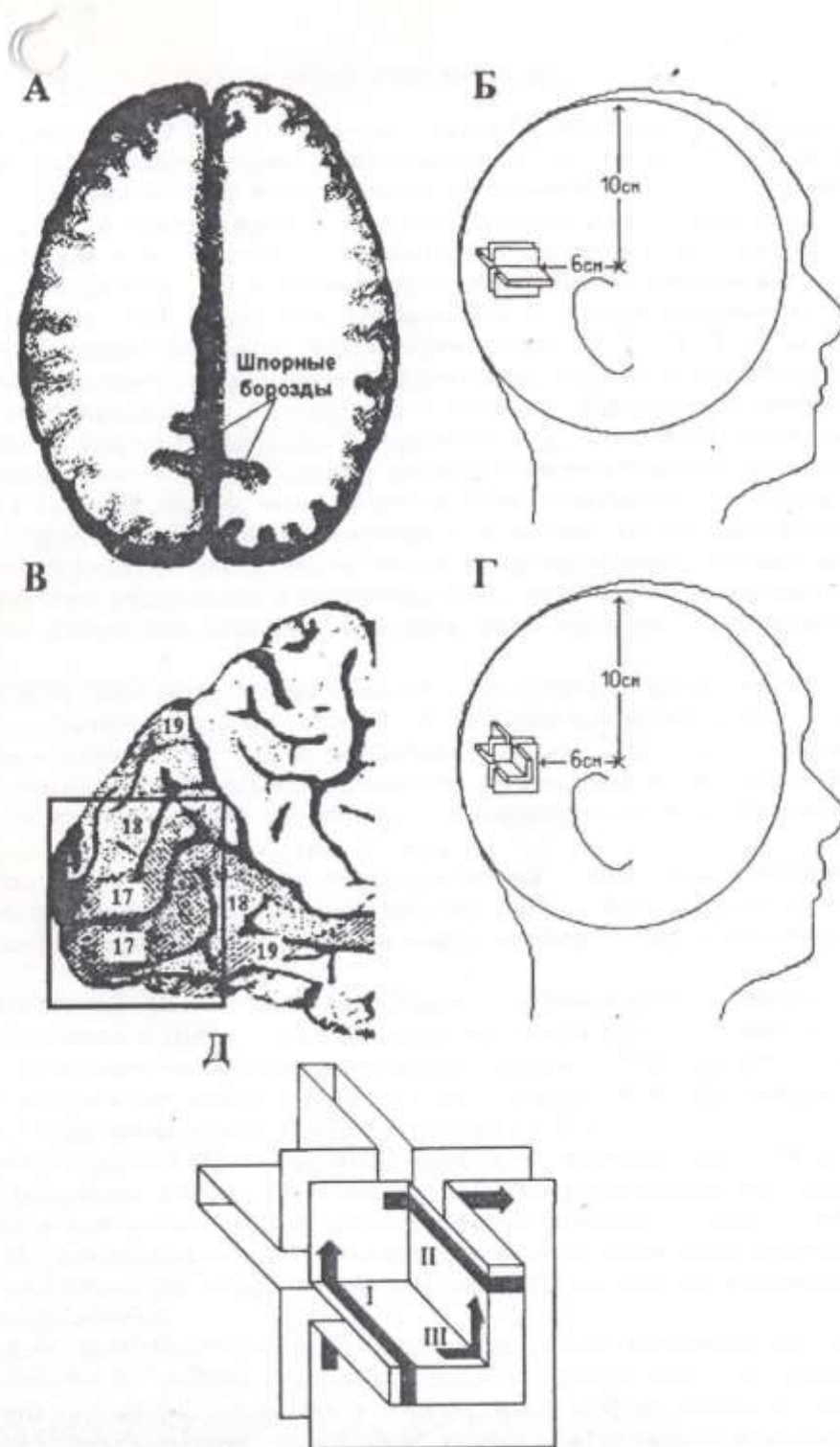


Рис. 1. Модель анатомической структуры зрительной коры. А — горизонтальный срез головного мозга человека на уровне передних отделов шпорной борозды. Б — модель зрительной коры для моделирования МЭГ-альфа-ритма в проводящей сфере. В — конфигурация шпорной борозды при «обычном типе распределения» по Саркисову. Цифрами обозначены цитоархитектонические корковые поля по Бродману. Г — модель зрительной коры для моделирования ЭЭГ-альфа-ритма в проводящей сфере. Д — траектории движения дипольной волны I—III по модели зрительной коры при нижне-заднем положении эпицентров

менно-затылочных областях). Действительно, эти перебивы были обнаружены после появления новых способов обработки электроэнцефалограммы с применением компьютерной техники картирования пространственных распределений биопотенциалов [2].



За нулевую фазу движения волны изменений «элементарных» дипольных моментов на угловой траектории принимали полное расположение полуволны «внутри» этой траектории (рис. 2, А). При этом суммарный или эквивалентный диполь будет ориентирован под углом  $45^\circ$  к составляющим траекторию прямым. Движение волны по траектории (рис. 2, А—З) слева направо и снизу вверх сопровождается поворотом эквивалентного диполя против часовой стрелки. Очевидно, что обратное движение волны вызовет поворот эквивалентного диполя по часовой стрелке. Полное прохождение волны по траектории будет соответствовать полному обороту эквивалентного диполя. Таким образом, можно сформулировать общее правило движения эквивалентного диполя при перемещении волны изменений дипольных моментов. Эквивалентный диполь внутри траектории вращается в направлении движения волны. Это правило можно применить для более сложных случаев.

Комбинируя две угловые траектории, получаем Т-образную структуру (рис. 3, А—Г), движение волны по которой также создает вращающийся эквивалентный диполь, согласно сформулированному выше правилу. По нижней угловой траектории волна движется снизу вверх и справа налево, эквивалентный диполь внутри траектории вращается против часовой стрелки. Верхняя угловая траектория задает продолжение движения волны, но слева направо и снизу вверх. Эквивалентный диполь вращается в ту же сторону. Суммируя верхний и нижний эквивалентные диполи, получаем вращение против часовой стрелки.

Объединение двух Т-образных структур дает крестообразную структуру (рис. 3, Д—З), которая моделирует срез мозга на уровне шпорных борозд (рис. 1, А). При движении по этой структуре двух симметричных волн снизу вверх возникает два эквивалентных диполя, вращающихся в противоположных направлениях. В случае, если эквивалентные диполи ориентированы горизонтально (рис. 3, Д, Ж), они компенсируют друг друга и суммарный диполь равен нулю. При вертикальном положении (рис. 3, Е, З) диполи суммируются. Таким образом, суммарный диполь будет ориентирован вертикально. Он будет менять свой момент, уменьшаясь до нуля, затем инвертировавшись, увеличиваться в противоположном направлении.

Рассмотрим еще один возможный вариант распространения волны. Волна движется от вершины бокового луча Т-образной структуры, переходя на верхний и нижний лучи (рис. 3, И—М). В этом случае эквивалентные диполи вращаются симметрично, но в противоположных направлениях. Когда диполи ориентированы горизонтально, они суммируются, при вертикальном положении происходит их компенсация. Результирующий диполь, ориентированный горизонтально, будет меняться по величине и инвертироваться. Этот случай для симметричной крестообразной модели показывает полную компенсацию эквивалентных диполей (рис. 3, Н—Р). При этом суммарный диполь всегда будет равен нулю.

После рассмотрения плоских моделей достаточно легко перейти к полной трехмерной модели поверхности первичной зрительной коры (рис. 1, Д). Волна потенциалов может распространяться по этой поверхности по трем возможным траекториям: I—III. Траектория I дает эквивалентный диполь во фронтальной плоскости, II — придает подвижность эквивалентному диполю в горизонтальной плоскости, а III — в сагитальной плоскости. Таким образом, имеется конфигурация поверхностей, при распространении по которым волна потенциалов создает эквивалентный диполь, удовлетворяющий требованиям гипотезы о «радиальной развертке». В симметричном случае при распространении волны из нижних или передних отделов модели диполь вращается в сагитальной плоскости. Нарушение симметрии приводит к усложнению траектории вращения эквивалентного диполя. При распространении волны от вершин боковых лучей модели, которые соответствуют дну шпорных борозд, вращение диполя в сагитальной плоскости сохраняется, но амплитуда его резко падает за счет компенсации по траекториям I и II.



Электрические поля ЭЭГ и магнитные поля МЭГ связывают с токами, продуцируемыми постсинаптическими потенциалами в апикальных дендритах пирамидных клеток коры. При этом толщина дипольного слоя коры, элементарные диполи которого ориентированы перпендикулярно к ее поверхности, около 1 мм [20], а площадь может достигать нескольких квадратных сантиметров [11].

В предыдущих работах по изучению пространственной динамики распределений потенциалов ЭЭГ переливы связывались с распространением волны потенциалов по конвексительной поверхности мозга [3, 5, 6]. В этом случае основными источниками должны быть радиальные корковые диполи (ориентированные перпендикулярно к поверхности головы). Однако при регистрации МЭГ выявляются аналогичные с ЭЭГ переливы [12], хотя МЭГ регистрирует только тангенциальные токи (создающие диполи, ориентированные параллельно к поверхности головы). Кроме этого, в результате складчатой структуры коры возникал бы эффект провалов или замирания этой волны, что не было обнаружено. Из сказанного следует вывод, что источник альфа-переливов связан с векторным суммированием радиальных и тангенциальных диполей, обусловленных распространением волны потенциалов в складках коры, имеющих преобладающую ориентацию.

Предложенная нами модель предполагает, что источник альфа-ритма располагается на относительно компактном ( $3-4 \text{ см}^2$ ) участке зрительной коры. Это подтверждается данными Ф. Лопес де Сильва с соавт. [15], полученными при хронических микроэлектродных исследованиях зрительной коры собак. В этих наблюдениях установлено, что альфа-волна распространяется из эпицентра на расстояние порядка 4 мм со скоростью 33 см/с.

Длина волны в нашей модели равна длине той траектории, которую она проходит, т. е. приблизительно 4 см. При частоте 10 Гц за одну секунду возникает 10 волн. Таким образом, скорость волны в нашей модели близка к установленной в работе [14].

В свою очередь переливы возникают в результате физического наведения поля от мощного источника в зрительной коре на поверхность головы. Таким образом, устраняется противоречие экспериментальных данных ЭЭГ, предполагающих широкое распространение альфа-ритма по коре и данных МЭГ, указывающих на определенную локализованность альфа-источника [1, 9, 11].

С. Вильямсон с соавт. [21] обнаружили прецессию эквивалентного диполя при локализации источника альфа-ритма по результатам регистрации многоканальной МЭГ, что в совокупности с другими данными привели автора к гипотезе «альфона» [22], предполагающей возникновение в зрительной коре несвязанных друг с другом пейсмекеров альфа-ритма, которые обуславливают возникновение отдельных альфа-веретен.

Наша модель предлагает большую пространственную устойчивость «альфонов» или эпицентров распространения корковых альфа-волн, а прецессию эквивалентного диполя мы связываем с воздействием афферентного притока на распространяющуюся корковую волну. Этот взгляд подтверждается ранее полученными данными об индивидуальной вариабельности пространственного распределения альфа-ритма [1], которые говорят о том, что расположение фокусов альфа-активности имеет определенную устойчивость в норме, связанную с функциональными особенностями зрительной коры индивидуума.

На основании анализа поведения эквивалентного диполя в представленной модели можно сделать вывод, что применяемые сейчас методы локализации источников тока не способны определить расположение эпицентров и пространственное распределение коркового альфа-ритма. В то же время об этом можно судить на основании моделирования и последующего динамического картирования данных ЭЭГ. В случае хорошо выраженного перелива лоб — затылок, что соответствует саггитальному вращению эквивалентного диполя, можно говорить



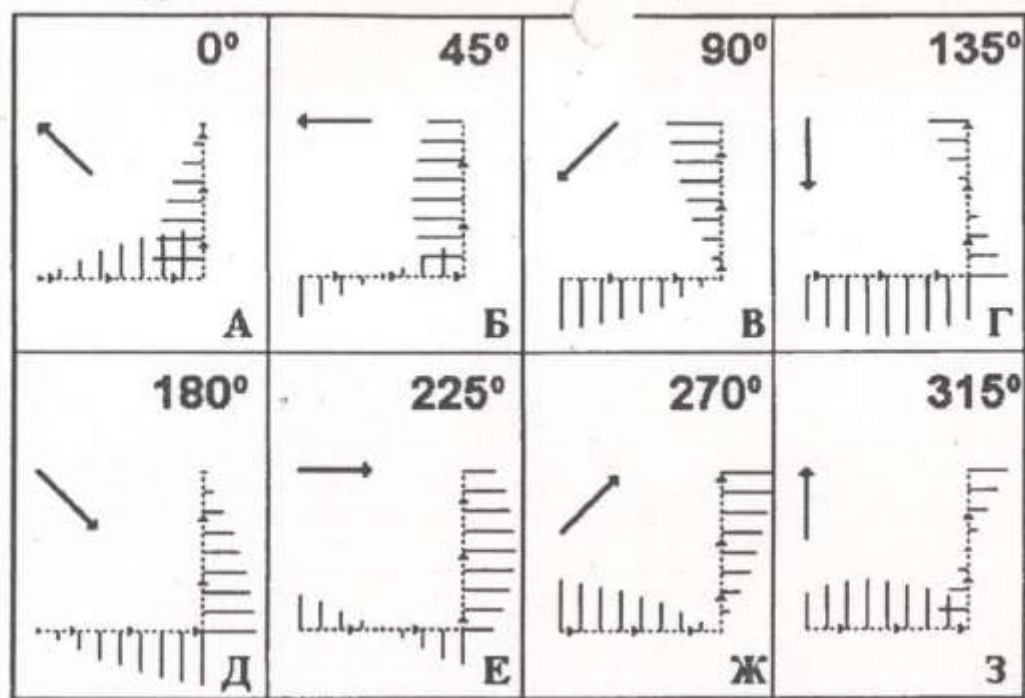


Рис. 2. Угловая траектория распространения дипольной волны обозначена пунктиром. Малыми стрелками показано направление движения волны. Сплошными линиями обозначены направления и относительная амплитуда элементарных дипольных моментов в определенных точках траектории. Большой стрелкой показана ориентация эквивалентного диполя. (А—З) Амплитудные распределения элементарных диполей и позиция эквивалентного диполя в последовательные моменты времени, соответствующие условной фазе волны от  $0^\circ$  до  $315^\circ$

Исследования по локализации альфа-ритма с применением магнитоэнцефалографических (МЭГ) и ЭЭГ методов показали дипольную структуру источника и его локализацию в затылочных областях зрительной коры [1, 9, 11].

Таким образом, феномен переливов можно представить как динамику распределения электрических полей, наведенных на скальп вращающимся токовым диполем, находящимся в шпорной борозде (рис. 1, А) и прилегающих областях зрительной коры [4]. Но в этом случае необходимо объяснить, каким образом токовый диполь может менять свою ориентацию, так как в коре головного мозга могут возникать только перпендикулярные к ее поверхности токовые диполи [20]. Для этого была разработана компьютерная модель перемещающейся по коре шпорной борозды и прилегающим участкам продольной борозды волны изменений дипольных моментов, которая создавалась констелляцией «элементарных» диполей, обусловленных электрической активностью коры.

#### МЕТОДИКА

При компьютерном моделировании вращающегося диполя первоначально использовали крестообразную модель корковых поверхностей первичных зрительных полей, предложенную Л. Кауфманом с соавт. [14] для изучения дипольных распределений МЭГ-альфа-ритма (рис. 1, В). Однако эта модель оказалась недостаточной для моделирования ЭЭГ, так как она учитывает только тангенциальные токи мозга, которые селективно регистрируются МЭГ [13]. Это ограничивало подвижность эквивалентного диполя одной плоскостью.

Для полноценного моделирования эквивалентного диполя крестообразная модель была дополнена на основании данных цитоархитектонического строения 17 поля коры головного мозга человека [7] (рис. 1, В, Г).

Таким образом, МЭГ-модель состояла из четырех соединенных поверхностей, параллельных саггитальной и горизонтальной плоскостям, для каждого полушария (рис. 1, В), а ЭЭГ-модель имела еще две дополнительные поверхности,

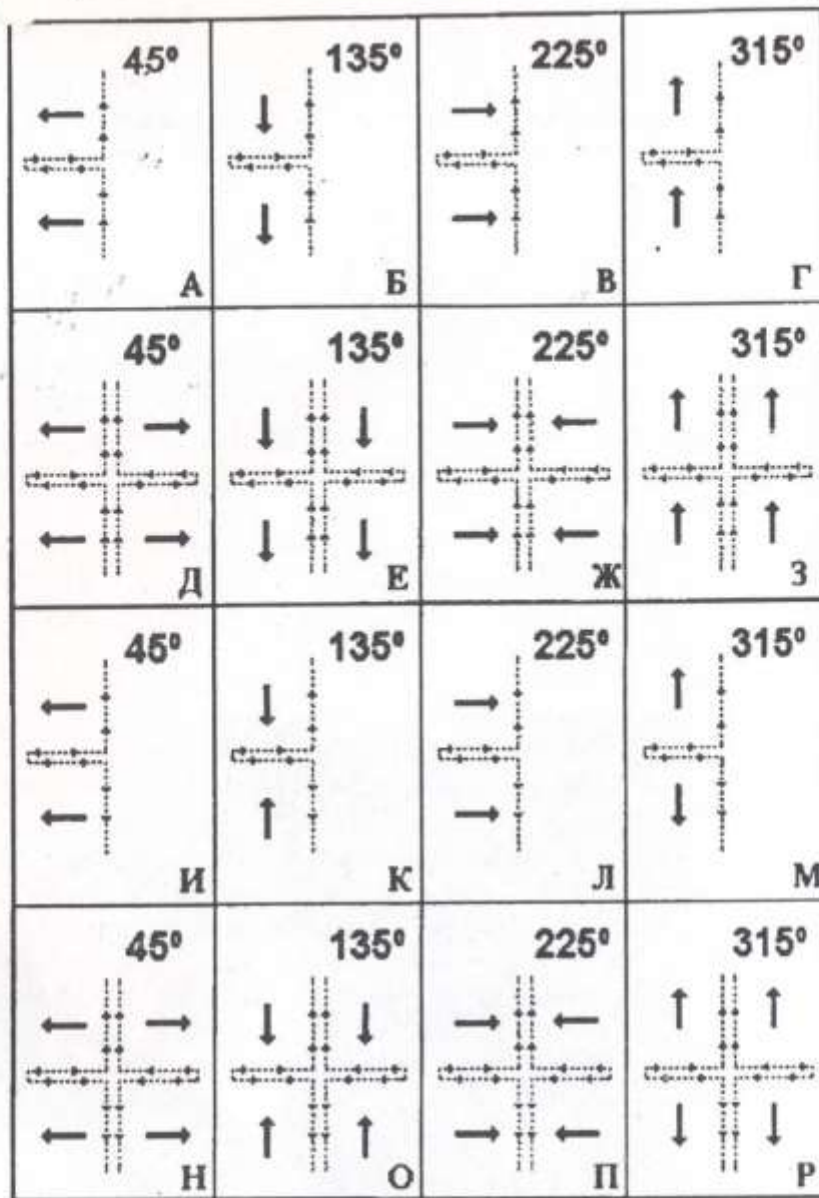


Рис. 3. Т-образные и крестообразные траектории распространения дипольной волны. Обозначения как на рис. 1. Элементарные диполи не показаны. Фазы волны соответствуют рис. 1. А—З — эпицентр находится в нижних отделах траектории. И—Р — эпицентр находится на конце боковых лучей траектории

параллельные фронтальной плоскости (рис. 1, Г, Д). Для упрощения анализа параметров эквивалентного диполя модель разлагали на более простые элементы. Элементарной единицей данного анализа являлась угловая траектория (рис. 2, А—З) движения волны потенциалов. Срез модели (рис. 1, Д) во фронтальной и горизонтальной плоскостях представляет собой крест (рис. 3, Д—З), который в свою очередь делится на две симметричных Т-образных структуры (рис. 3, А—Г). Волну образовывали «элементарные» диполи, которые не могли менять свою ориентацию, перпендикулярную к предполагаемой корковой поверхности, но меняли дипольный момент от  $+1$  до  $-1$  по задаваемому синусоидальному закону. При этом длину волны рассчитывали таким образом, чтобы на одной поверхности укладывалась четверть волны.

При моделировании волны поля потенциалов мы исходили из данных, полученных в работе [15] о распространении альфа-волны из точки генерации вдоль коры. В каждый условный момент времени, соответствующий прохождению волны от одного «элементарного» диполя до другого, рассчитывали положение и дипольный момент эквивалентного токового диполя как векторную сумму «элементарных» диполей.



о симметричных эпицентрах в задне-лжних отделах корковой поверхности первичной зрительной коры. Вращение диполя в обратную сторону говорит о расположении эпицентра в передне-верхних отделах. Снижение амплитуды поля связано с перемещением эпицентра в глубину шпорных борозд. При межполушарной асимметрии в первом случае возникает вращающийся, а во втором — поперечный переливы.

Основные виды экспериментально обнаруженных в диапазоне альфа-ритма переливов ЭЭГ воспроизводятся нашей моделью путем выключения или частичной депрессией волны на разных лучах крестообразной структуры, воспроизводящей анатомическое строение борозд зрительной коры затылочной области мозга человека. Таким образом, на основании подобного моделирования можно судить о функциональном состоянии отдельных участков первичной зрительной коры.

В свою очередь положение эпицентров выхода волны потенциалов может оказать существенное влияние на амплитуду суммарной ЭЭГ. При расположении этих эпицентров в глубине шпорных борозд дипольное поле самокомпенсируется и эквивалентный диполь равен нулю. Можно предположить, что десинхронизация ЭЭГ может быть связана с подобным механизмом.

Для подтверждения этих выводов интересно проанализировать гипотезу Мак-Коллаха и Питца [18], которые рассматривали альфа-ритм, как распространяющийся по зрительной коре волновой процесс. Они предполагали, что считывающая зрительную информацию корковая альфа-волна движется из центра зрительного анализатора к периферии, что соответствует в нашей модели низкоамплитудному продольному переливу. Однако наиболее часто наблюдаются высокоамплитудные переливы, обусловленные движением корковой волны от периферии к центру. Действительно, проведенные психофизиологические эксперименты коррелируют с этими данными [10, 19].

#### ВЫВОДЫ

1. Моделирование распространения синусоидальной волны потенциалов в виде дипольного слоя по поверхности первичной зрительной коры воспроизводит вращающийся эквивалентный диполь, создающий на поверхности головы поле, соответствующее основным видам экспериментально обнаруженных в диапазоне альфа-ритма переливов ЭЭГ.

2. Анализ переливов ЭЭГ на основании исследуемой модели позволяет определить положение эпицентров выхода распространяющейся вдоль коры дипольной волны и функциональное состояние различных участков этой корковой поверхности.

3. В рамках рассматриваемой модели находит свое объяснение феномен десинхронизации альфа-ритма на ЭЭГ.

4. Исследуемая модель может быть рассмотрена с точки зрения гипотезы о роли альфа-волн как считывающего механизма в зрительной коре.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верхлютов В. М.* Пространственная и временная вариабельность альфа-ритма магнитоэнцефалограммы у человека в норме // Журн. высш. нерв. деят. 1990. Т. 40. № 5. С. 944.
2. *Горбач А. М.* Магнитографическое картирование электрической активности мозга человека: Дисс. ... канд. биол. наук. М.: ИВНД и НФ АН СССР, 1989. 232 с.
3. *Дубикайтис Ю. В., Дубикайтис В. В.* О потенциальном поле и альфа-ритме на поверхности головы человека // Биофизика. 1962. Т. 7. № 3. С. 345.
4. *Коньшев В. А., Верхлютов В. М.* Пространственно-временная динамика альфа-активности ЭЭГ человека // 1-е совещание по картированию мозга. М. 1991. С. 29.
5. *Ливанов М. Н., Ананьев В. М.* Электроэнцефалоскопия. М.: Медгиз, 1960. 108 с.
6. *Монахов К. К.* О пространственном распределении биоэлектрической активности в коре больших полушарий головного мозга человека и животных // Бюл. эксперим. биол. и мед. 1960. Т. 50. № 10. С. 23.



7. Саркисов ..., Филимонов И. Н. Цитоархитектоника коры большого мозга человека. М.: Медгиз, 1949. 450 с.
8. Свидерская Н. Е. Значение синхронных корковых биоэлектрических процессов для оценки активности мозга в норме и патологии: Дисс. ... докт. биол. наук. М.: ИВНД и НФ АН СССР, 1985. 432 с.
9. Холодов Ю. А., Горбач А. М., Верхлютов В. М. Магнитные поля головного мозга человека//Проблемы электромагнитной нейрофизиологии. М.: Наука, 1988. С. 99.
10. Шевелев И. А., Костелянец Н. Б., Каменкович В. М., Шараев Г. А. Оpoznание движения и альфа-волна ЭЭГ//Сенсорные системы. 1991. Т. 5. № 3. С. 54.
11. Chapman R. M., Ilmoniemi R. J., Barbanera S., Romani G. L. Selective localization of alpha brain activity with neuromagnetic measurements//EEG and Clin. Neurophysiol. 1984. V. 58. P. 569.
12. Gurtovoy K. G., Kajola M. J., Vvdensky V. L. Distribution of phase for alpha-rhythm measured by multichannel magnetometer over occipital head//Advances in biomagnetism. N. Y.: Plenum Press, 1989. P. 249.
13. Hamalainen M., Hari R., Ilmoniemi R. J. et al. Magnetoencephalography-theory, instrumentation and applications to noninvasive studies of the working human brain//Rev. Modern Physics. 1993. V. 65. P. 413.
14. Kaufman L., Kaufman J. H., Wang J. Z. On cortical folds and neuromagnetic fields//EEG and Clin. Neurophysiol. 1991. V. 79. P. 211.
15. Lopes da Silva F. N., Storm L. W. The cortical source of alpha rhythm//Neurosci. Lett. 1977. V. 6. P. 237.
16. Motokawa K., Tsujiguchi K. Die Phasendifferenzen der Alpha-Wellen und Lokalunterscheide der electrischen Aktivitat der Grosshirnrinde des Menschen//Jap. J. Med. Sci., Part III Biophys. 1944. No. 10. P. 23.
17. Petsche H., Marko A. Das Photozellentoposkop, eine einfache Methode zur Bestimmung der Feldverteilung und Ausbreitung hirnelektrischer Vorgange//Arch. Psychiat. Nervenkr. 1954. V. 192. P. 447.
18. Pitts W., McCulloch W. S. How we know universals. The perception of auditory and visual forms//Bull. Math. Biophys. 1947. V. 9. P. 127.
19. Shevelev I. A., Kostelianetz N. B., Kamenkovich V. M., Sharaev G. A. EEG alpha-wave in the visual cortex: check of the hypothesis of the scanning process//Int. J. Psychophysiol. 1991. V. 11. P. 195.
20. Wikswo J. P. Biomagnetic sources and their models//Advances in biomagnetism. N. Y.: Plenum Press. 1989. P. 1.
21. Williamson S. J., Wang J.-Z., Ilmoniemi R. J. Method for locating sources of human alpha activity//Advances in biomagnetism. N. Y.: Plenum Press. 1989. P. 257.
22. Williamson S. J., Lu Z.-L., Wang J.-Z., Karon D. Support for the alphon hypothesis as an organizing principle for occipital alpha rhythm//Abstracts International Conference on Alpha Processes in the Brain. Germany, Lubeck. 1994. P. 55.

Институт высшей нервной  
деятельности и нейрофизиологии  
РАН, Москва

Поступила в редакцию  
27. VI. 1995  
Принята в печать  
6. IX. 1995

## A MODEL OF THE ALPHA-RHYTHM DIPOLE SOURCE IN THE VISUAL CORTEX OF A MAN

VERKHLYUTOV V. M.

*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology,  
Russian Academy of Sciences, Moscow*

The model of the alpha-rhythm was studied which consisted of a set of elementary dipoles. The dipoles were fixed normally to the surfaces of a cruciform structure which imitated the structure of the visual cortex. The magnitude of dipole moments varied according to the sinusoidal law. Thus, the effect was produced of the waves leaving the epicenters which in one case were located in the lower parts of the cruciform structure and at the ends of the side rays of this structure in the other case.

The model enabled imitation of all experimentally found phenomena of the alpha-wave travelling (fronto-occipital travelling, rotatory travelling, diagonal and transverse forms). Additionally, the phenomenon was found which enabled simulation of the flat EEG with remaining cortical alpha activity. The possible velocity of the alpha-wave propagation in the visual cortex was calculated. The model can be applied for testing the hypothesis that the alpha-rhythm is a scanning mechanism in the visual cortex.





