

СРАВНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЛОСКОЙ И ЭЛЛИПСОИДНОЙ СРЕД С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТКАНЕЙ ГОЛОВЫ НА АМПЛИТУДУ ЗРИТЕЛЬНЫХ ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Л.А. Шимченко

linashimchenko@gmail.com

SPIN-код: 3824-0066

Е.Д. Осинцева

osintseva.ed@gmail.com

SPIN-код: 1397-7753

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Моделирование влияния параметров тканей головы человека (скальпа, черепа, цереброспинальной жидкости) на регистрируемые с поверхности скальпа амплитуды зрительных вызванных потенциалов. Цель настоящей работы заключалась в сравнении двух математических моделей для разных сред: «плоской» и «эллипсоидной». При сравнении моделей более точное значение амплитуды показывает математическая модель в «эллипсоидной» среде, поскольку она учитывает геометрическую кривизну головы. Средняя относительная погрешность «плоской» модели составляет 65 %. Средняя относительная погрешность влияния толщины слоя цереброспинальной жидкости (ЦСЖ) и глубины залегания диполя на амплитуду для «эллипсоидной» модели составила 13 %, а для «плоской» — 15 %; влияния толщины черепа на амплитуду для «эллипсоидной» модели составила менее 1 %, а для «плоской» — около 3 %. На основании этого можно сделать вывод, что изменение толщины ЦСЖ оказывает значимое влияние на амплитуду регистрируемого сигнала, однако при варьировании толщины черепа влияние будет минимально, т. е. увеличение глубины залегания диполя эквивалентно увеличению толщины черепа на 1 мм.

Ключевые слова

Зрительные вызванные потенциалы, рассеянный склероз, цереброспинальная жидкость, череп, скальп, токовый диполь, амплитуда, математическая модель

Поступила в редакцию 12.02.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Метод зрительных вызванных потенциалов (ЗВП) широко распространен в клинической практике для диагностики различных демиелинизирующих заболеваний, например, рассеянного склероза (РС) [1, 2]. Данный метод заключается в регистрации электрической активности головного мозга на поверхности скальпа, которая появляется как реакция на фотостимуляцию. Электроды устанавливаются на затылочной части головы по международной систе-

ме «10–20» (расстояние между электродами, которое определено как 10 или 20 % размера головы пациента) и регистрируют ответ на возбуждение зрительной системы [3]. Ответная реакция на стимуляцию обычно регистрируется электродами O1, O2, Oz [4]. Буквенные символы обозначают: O — occipitalis, C — centralis, P — parietalis, F — frontalis, A — auricularis.

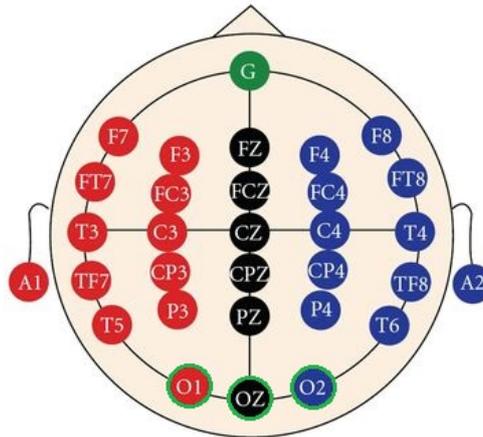


Рис. 1. Схема расположения электродов «10–20»

Рассеянный склероз — это прогрессирующее воспалительное демиелинизирующее заболевание центральной нервной системы (ЦНС) с многочисленными очагами поражения. По данным Всемирной Организации Здравоохранения, среди неврологических заболеваний рассеянный склероз (РС) является основной причиной стойкой инвалидизации групп молодых трудоспособных людей в возрасте от 20 до 40 лет и при отсутствии адекватного лечения на ранних этапах заболевания приводит к значимым нарушениям неврологических функций вплоть до невозможности самообслуживания [5]. Для данного заболевания характерна внутренняя гидроцефалия: чем запущеннее форма РС, тем больше спинномозговой жидкости накапливается в желудочковой системе головного мозга, что говорит о нарушении оттока ЦСЖ в субарахноидальное пространство и изменении его толщины, а также об увеличении внутричерепного давления [6]. По течению РС разделяют на клинически изолированный синдром (КИС), ремитирующее течение (РРС), первично-прогрессирующее течение (ППРС), вторично-прогрессирующее течение (ВПРС) [7]. Современные принципы эффективной терапии демиелинизирующих заболеваний основаны на своевременной диагностике. Однако ввиду поздних проявлений клинических признаков этих заболеваний субъективном не критическом отношении пациента к доклиническим проявлениям неврологических расстройств и вариативности клинических симптомов лечение становится малоэффективным. Даже в том случае, когда клинические проявления минимальны или они исчезли, в любое время может возникнуть рецидив заболевания (РРС). По статистическим дан-

ным, в настоящее время в мире количество больных рассеянным склерозом превышает 1 млн человек, в России — не менее 150 тыс. человек [8]. Поэтому моделирование сред головы и процессов, происходящих в ней при проведении процедуры ЗВП является важной научно-исследовательской задачей.

Цель данной работы заключалась в изучении влияния параметров сред головы человека, такие как скальп, череп, цереброспинальная жидкость, на регистрируемые с поверхности скальпа амплитуды зрительных вызванных потенциалов (ЗВП) электродом Oz с помощью математического моделирования. Для того чтобы выяснить, каково влияние удельных сопротивлений и толщин слоев на амплитуду сигнала, была разработана математическая модель.

Материалы и методы. Допущения и предпосылки к разработке математических моделей. Поскольку особенностью анализа получаемых ЗВП (и ВП в целом) является учет их амплитуды, необходимо принимать во внимание параметры различных биологических сред головного мозга.

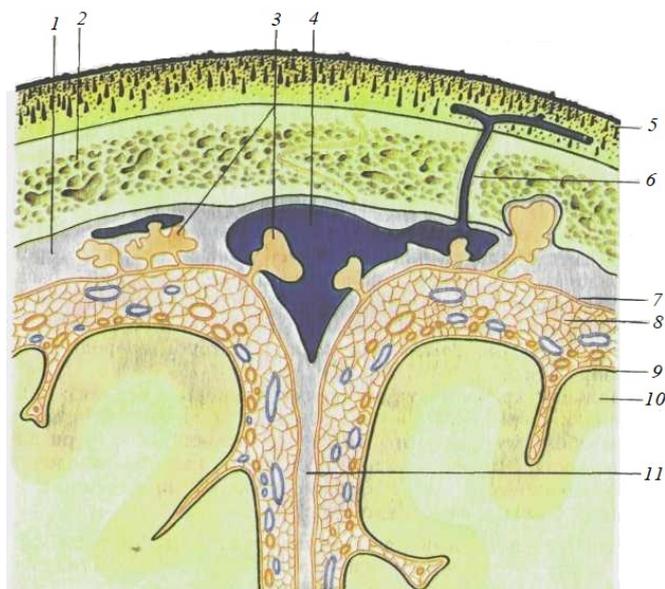


Рис. 2. Схема взаиморасположения оболочек головного мозга [13]:

1 — твердая оболочка головного мозга; 2 — свод черепа; 3 — грануляции паутинной оболочки; 4 — верхний сагиттальный синус; 5 — кожа; 6 — эмиссарная вена; 7 — паутинная оболочка головного мозга; 8 — подпаутинное (субарахноидальное) пространство; 9 — мягкая оболочка головного мозга; 10 — головной мозг; 11 — серп большого мозга

Головной мозг, как и спинной, покрыт мягкой, паутинной и твердой мозговыми оболочками. Мягкая, или, другими словами, сосудистая оболочка вплотную прилегает к поверхности мозга, где образует сосудистые сплетения. Далее, отдаляясь от мозга, располагается паутинная оболочка (рис. 4), которая тесно прилегает к коре мозга и отделяется от мягкой оболочки подпаутинным (суба-

рахноидальным) пространством, заполненным цереброспинальной жидкостью (ЦСЖ). Снаружи от паутинной оболочки находится твердая оболочка мозга, которая образована плотной соединительно-волокнутой тканью. От паутинной оболочки спинного мозга твердая оболочка отделена субдуральным пространством. Поверхность твердой оболочки, обращенная в сторону мозга, гладкая, между ней и паутинной оболочкой образуется узкое субдуральное пространство, в котором имеется небольшое количество жидкости [9, 10].

В итоге можно выделить семь слоев: мягкая (сосудистая) оболочка, подпаутинное пространство (область, где располагается ЦСЖ), паутинная оболочка, субдуральное пространство, твердая мозговая оболочка, кости черепа, скальп.

При построении математической модели были использованы параметры слоев тканей головы человека, приведенных в работе В.В. Гнездицкого [11], а также внесены некоторые допущения, связанные с количеством используемых слоев в моделировании. В зависимости от частоты удельное сопротивление тканей мозга может изменяться, но поскольку область частот ЭЭГ лежит в диапазоне $0,1 \dots 100$ Гц, влияние на проводимость будет несущественным [12].

Поскольку мягкая мозговая оболочка имеет кровеносные сосуды, которые питают головной мозг, то можно сделать вывод, что удельное сопротивление данной оболочки будет близко к крови, т. е. $1,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [14]. Подпаутинное пространство заполнено цереброспинальной жидкостью ($\rho = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и содержит кровеносные сосуды ($\rho = 1,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), поэтому примем эквивалентное удельное сопротивление данного слоя и паутинной оболочки $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; твердой мозговой оболочки — $2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [15]. Для дальнейшего моделирования с целью упрощения модели объединим вышеуказанные оболочки в один слой цереброспинальной жидкости (ЦСЖ) с удельным сопротивлением $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. На основании вышесказанного все оболочки головного мозга можно упростить до четырех: кора, ЦСЖ, кости черепа, скальп (рис. 5).

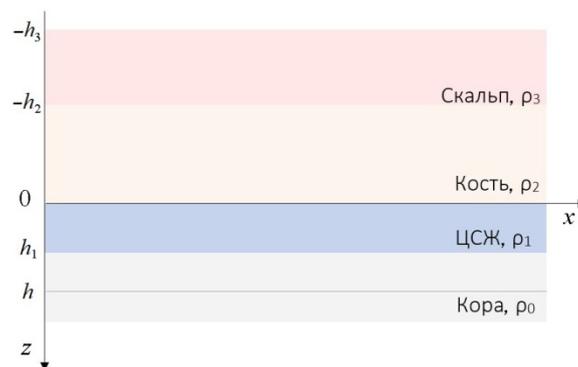


Рис. 3. Схема модели

Поскольку область проекции обработки информации находится в затылочной области (17, 18, 19 поля по Бродману), токовый диполь располагается относительно скальпа на глубине около 15 мм в зависимости от параметров модели,

можно рассматривать модель в «эллипсоидной» среде как в «плоской». Это возможно, когда генерация ответа на стимуляцию формируется на довольно близком расстоянии к поверхности раздела среды электрод — скальп. Далее будем использовать данные слои в «плоской» и «эллипсоидной» математических моделях для дальнейшего их сравнения.

Плоская четырехслойная математическая модель. Для того чтобы выяснить, каково влияние толщины слоя ЦСЖ на амплитуду регистрируемого с поверхности скальпа была разработана четырехслойная плоская математическая модель (рис. 3). Каждый из рассматриваемых слоев имеет собственные толщину и удельное сопротивление (табл. 1).

Таблица 1

Значение параметров рассматриваемых слоев

Параметр	Обозначение	Значение
Удельное сопротивление коры	ρ_0	1,5 Ом · м
Удельное сопротивление ЦСЖ	ρ_1	0,5 Ом · м
Удельное сопротивление кости	ρ_2	150 Ом · м
Удельное сопротивление скальпа	ρ_3	10 Ом · м
Глубина залегания токового генератора	h	2...8 мм
Толщина слоя ЦСЖ	h_1	1...4 мм
Толщина слоя кости	h_2	8 мм
Толщина скальпа	$h_3 - h_2$	1 мм

Распределение потенциала, создаваемого точечным источником тока I , находящемся на глубине h описывается уравнением Лапласа в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0,$$

где r — расстояние по оси x от точки A , в которой регистрируется потенциал φ , до оси z .

Поскольку потенциал U обладает цилиндрической симметрией относительно оси Z , он не зависит от угла поворота точки A , т. е. угла между осью z и прямой, соединяющей точку A с началом системы координат.

Решение уравнения Лапласа ищем в виде $U(r, \varphi, z) = R(r) \cdot \Phi(\varphi) \cdot Z(z)$.

Далее для каждой из пяти областей записываем выражения, описывающие распределение в них потенциала, создаваемого токовым диполем. Составляем граничные условия равенства потенциалов на границах различных слоев, равенства плотностей токов, а также краевое условие — отсутствие «утечки» тока за пределы поверхности головы. Подставляя выражения для заданных граничных условий находим коэффициенты.

В результате получаем следующее выражение, описывающее распределение потенциала на поверхности головы:

$$U_3(r, z) = \int_0^{\infty} e^{-n(h+h_3)} A_3(n) J_0(nr) dn + \int_0^{\infty} e^{n(h+h_3)} B_3(n) J_0(nr) dn,$$

где $J_0(nr)$ — функция Бесселя нулевого порядка (порядок нулевой в силу осевой симметрии); $A_3(n)$, $B_3(n)$ — коэффициенты, зависящие от n .

Поскольку в задаче мы считаем, что токовый диполь это проекция на поверхность скальпа, то принимаем $r = 0$, а значит, $J_0(n \cdot 0) = 1$. Тогда выражение, описывающее распределение потенциала на поверхности головы, имеет следующий вид:

$$U_3(z) = \int_0^{\infty} e^{-n(h+h_3)} A_3(n) dn + \int_0^{\infty} e^{n(h+h_3)} B_3(n) dn.$$

Эллипсоидная четырехслойная математическая модель. Для того чтобы выяснить, каково влияние толщины слоя ЦСЖ на амплитуду регистрируемого с поверхности скальпа была разработана четырехслойная эллипсоидная математическая модель, учитывающая геометрию головы (рис. 2).

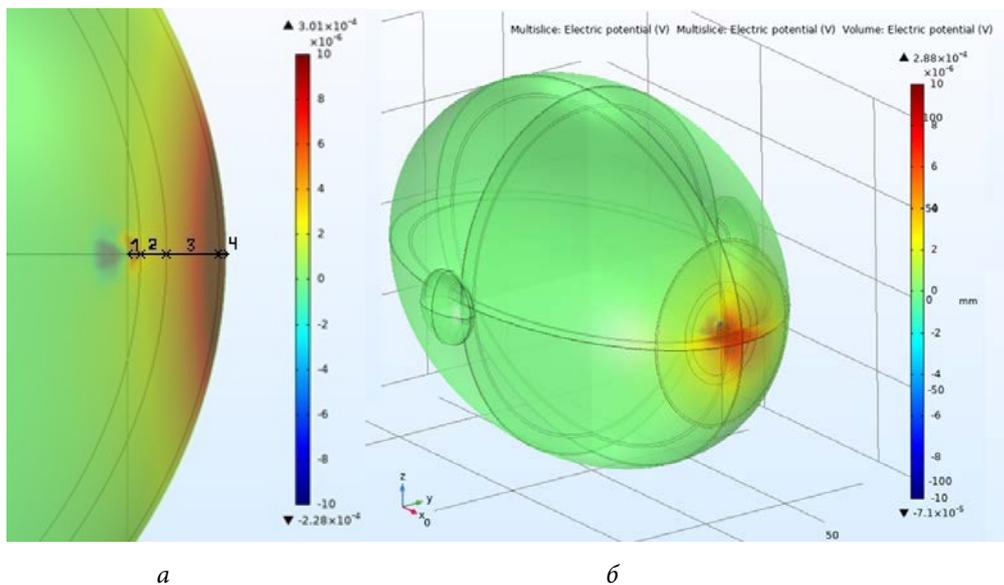


Рис. 4. Трехмерное изображение распределения потенциала:

a — увеличенное изображение слоев (1 — глубина залегания токового диполя, 2 — ЦСЖ, 3 — череп, 4 — скальп); *б* — вся модель

Уравнения, использованные в модели:

$$J = \sigma E + J_e;$$

$$E = -\nabla\varphi;$$

$$\nabla J = Q_{j,\varphi},$$

где σ — электрическая проводимость; J_e — внешний ток; φ — потенциал; Q — суммарный заряд; n — нормаль к поверхности.

Начальные условия:

1) $V = 0$, где V — значение потенциала (только в одной точке потенциал не равен нулю, а именно в точке расположения токового диполя);

2) токи распространяются по всей поверхности.

Данная модель имеет следующие допущения:

1) среда однородная (каждому слою ткани головы соответствует определенная проводимость по всему ее объему);

2) слои скальпа, черепа и ЦСЖ имеют ровную поверхность;

3) равномерное распределение в коре пирамидальных клеток, формирующих потенциал на поверхности скальпа.

Диполь располагали на варьируемом расстоянии от границы раздела кора — ЦСЖ от 2 до 8 мм и ориентировали перпендикулярно поверхности скальпа. Эквивалентный диполь изображается в виде вектора, начало которого соответствует предполагаемой локализации источника, направление говорит об ориентации диполя, модуль длины — о его интенсивности. В зависимости от глубины расположения дипольного источника и его ориентации, распределение потенциалов будет различным.

«Эллипсоидная» модель представляет собой эллипсоид, от поверхности которого сосредоточены такие слои, как ЦСЖ, кости черепа и скальп, имеющие соответствующие толщины и проводимости коры (табл. 2).

Таблица 2

Значения параметров рассматриваемых слоев [11, 15, 16]

Название	Значение
Полуось OX	13,5 см
Полуось OY	8,1 см
Полуось OZ	10 см
Толщина кожи	1 мм
Толщина черепа	8 мм
Толщина ЦСЖ	2 мм
Позиция диполя по оси X	122 мм
Позиция диполя по оси Y	0
Позиция диполя по оси Z	0
Направление диполя по оси X	1
Направление диполя по оси Y	0
Направление диполя по оси Z	0
Амплитуда диполя	10^{-8} А · м
Электрическая проводимость кожи	$6,6 \cdot 10^{-1}$ См/м
Электрическая проводимость черепа	$6,66 \cdot 10^{-3}$ См/м
Электрическая проводимость ЦСЖ	2 См/м

Результаты и выводы моделирования. В модели варьировались: расположение токового диполя от границы раздела электрод — скальп, толщина цереброспинальной жидкости и толщина черепа. При варьировании толщин слоев токовый диполь изменял своё расположение относительно скальпа и черепа, но по отношению к ЦСЖ оставался на той же глубине от нее.

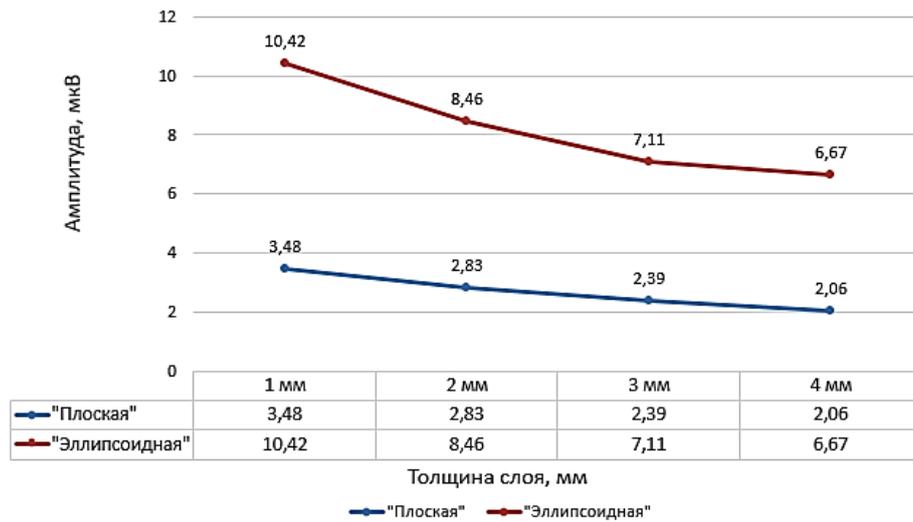


Рис. 5. Зависимость амплитуды от толщины ЦСЖ

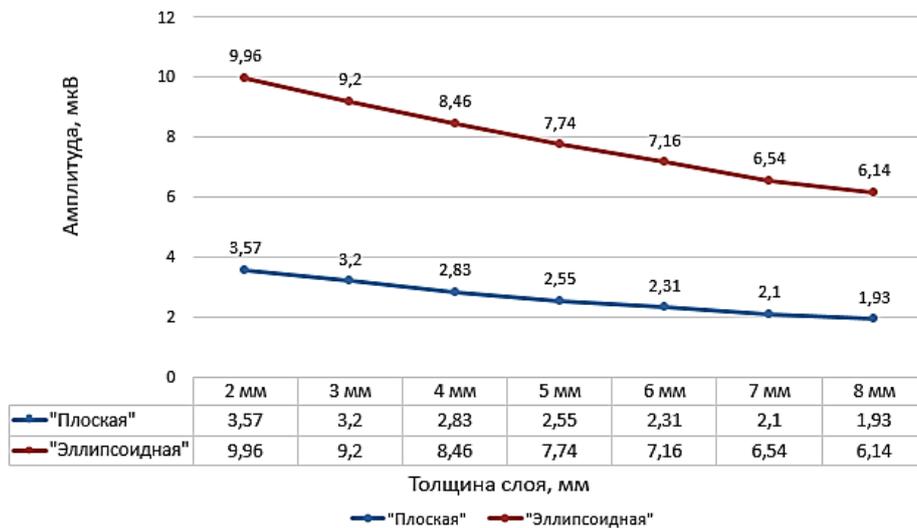


Рис. 6. Зависимость амплитуды от глубины залегания токового диполя

На рис. 5 представлены графики зависимости амплитуды от глубины залегания диполя: при увеличении глубины, амплитуда регистрируемого сигнала с поверхности скальпа уменьшалась, а на рис. 5, 7 — зависимости амплитуды от толщин ЦСЖ и черепа, при увеличении которых амплитуда уменьшалась.

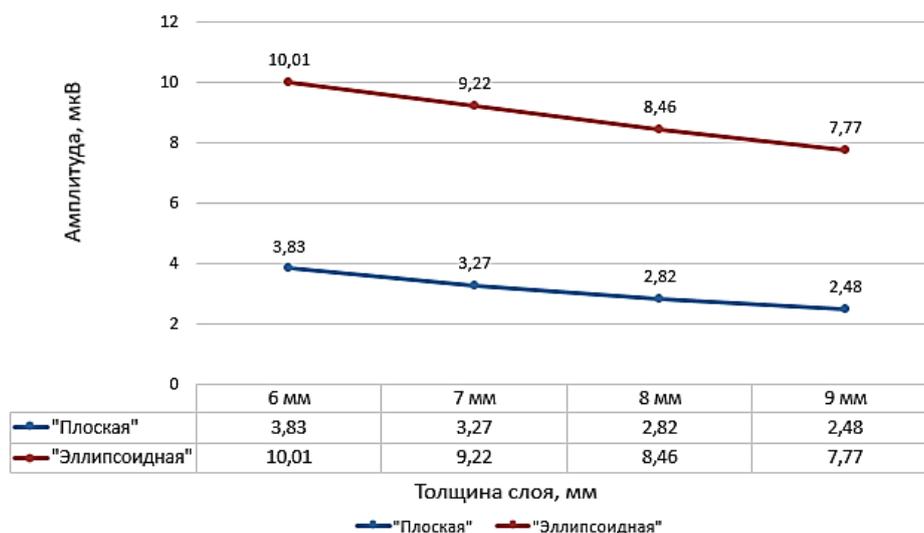


Рис. 7. Зависимость амплитуды от толщины черепа

Для изучения влияния изменения толщины ЦСЖ в сравнении с глубиной залегания токового диполя относительно ЦСЖ была рассчитана относительная погрешность «эллипсоидной» и «плоской» моделей при неизменной глубине залегания относительно скальпа. Например, сравним два случая в «эллипсоидной» модели при параметрах: толщина ЦСЖ 3 мм и глубина залегания токового диполя относительно ЦСЖ 4 мм; толщина ЦСЖ 2 мм и глубина залегания токового диполя относительно ЦСЖ 5 мм. В обоих случаях глубина залегания токового диполя относительно скальпа одинакова. Средняя относительная погрешность влияния толщины слоя ЦСЖ и глубины залегания диполя на амплитуду для «эллипсоидной» модели составила 13 %, а для «плоской» — 15 %.

Проведем такой же эксперимент для слоя черепа. Средняя относительная погрешность для «эллипсоидной» модели составила менее 1 %, а для «плоской» — около 3 %. На основании этого, можно сделать вывод, что изменение толщины ЦСЖ оказывает значимое влияние на амплитуду регистрируемого сигнала, однако при варьировании толщины черепа — влияние будет минимально, то есть увеличение глубины залегания диполя эквивалентно увеличению толщины черепа на 1 мм. В «плоской» и «эллипсоидной» моделях при увеличении толщины слоя ЦСЖ оказывает влияние на амплитуду как непосредственное увеличение толщины слоя, но и изменяющаяся глубина залегания диполя, а также более точное значение амплитуды для оценки ЗВП (численная средняя относительная погрешность «плоской» модели — 65 %) показывает «эллипсоидная» модель, поскольку она учитывает геометрическую кривизну головы.

Таким образом, приведенные в работе модели подходят как первое приближение для оценки влияния параметров тканей головы на амплитуду ЗВП, которая может служить как дополнительный показатель для диагностики и контроля терапии РС [17].

Литература

- [1] Janáky M., Jánossy A., Horváth G., et al. VEP and PERG in patients with multiple sclerosis, with and without a history of optic. *Doc Ophthalmol.*, 2017, vol. 134, no. 3, pp. 185–193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10633-017-9589-7>
- [2] Esen E., Sizmaz S., Balal M., et al. Evaluation of the innermost retinal layers and visual evoked potentials in patients with multiple sclerosis. *Curr. Eye Res.*, 2016, vol. 41, no. 10, pp. 1353–1358. DOI: <https://doi.org/10.3109/02713683.2015.1119283>
- [3] Klem G.H., Lüders H.O., Jasper H.H., et al. The ten twenty electrode system of the International Federation: The International Federation of Clinical Neurophysiology. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl.*, 1999, vol. 52, pp. 3–6.
- [4] Creel D.J. Visually evoked potentials. *Handb. Clin. Neurol.*, 2019, vol. 160, pp. 501–522. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64032-1.00034-5>
- [5] Гусев Е.И., Завалишин И.А., Бойко А.Н. Рассеянный склероз и другие демиелинизирующие заболевания. М., Миклош, 2004.
- [6] Лорина Л.В., Мусанатов М.А. Показатели внутренней гидроцефалии при различных типах течения рассеянного склероза. *Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова*, 2016, № 2, с. 58–63
- [7] Гусев И.Е., Гехт А.Б. Рассеянный склероз. Клинические рекомендации. М., Министерство здравоохранения РФ, 2018.
- [8] Суслина З.А., Захарова М.Н., Завалишин И.А. и др. Протокол ведения больных «Рассеянный склероз». *Проблемы стандартизации в здравоохранении*, 2006, № 2, с. 25–97.
- [9] Жадин М.Н. Биофизические механизмы формирования электроэнцефалограмм. М., Наука, 1984.
- [10] Быков М.П. Анатомия головного мозга. Фотографический атлас. М., Практическая медицина, 2009.
- [11] Гнездицкий В.В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография. М., МЕДпресс-информ, 2004.
- [12] Scherg M. Fundamentals of dipole source potential analysis. In: *Advances in audiology*. Basel, Karger, 1990, pp. 40–69.
- [13] Гаврилов Л.Ф., Татаринцов В.Г. Анатомия. М., Медицина, 1986.
- [14] Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Черноризов А.М. Психофизиология цветового зрения. М., Изд-во МГУ, 1989.
- [15] Tissue frequency chart. *itis.swiss: веб-сайт*. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/tissue-frequency-chart/> (дата обращения: 10.04.2019).
- [16] Плитниченко Б.Г., Телков В.Е. Анатомические особенности толщины костей черепа у жителей тульской области и влияние их на образование переломов. *Вестник новых медицинских технологий*, 2011, т. 18, № 3, с. 314–316.
- [17] Коваленко А.В., Бисага Г.Н., Гаврилюк Б.Л. и др. Диагностическая информативность ЗВП при РС без оптического неврита в анамнезе. *Вестник российской военной-медицинской академии*, 2013, № 2(42), с. 49–54.

Шимченко Лина Алексеевна — студентка кафедры «Медико-технические информационные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Осинцева Екатерина Дмитриевна — студентка кафедры «Медико-технические информационные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Дмитриев Александр Николаевич, ассистент кафедры «Медико-технические информационные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шимченко Л.А., Осинцева Е.Д. Сравнение математических моделей плоской и эллипсоидной сред с учетом влияния физиологических параметров тканей головы на амплитуду зрительных вызванных потенциалов. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 03(44). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-03-591>

COMPARISON OF MATHEMATICAL MODELS OF PLANAR AND ELLIPSOID MEDIA, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF PHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF HEAD TISSUES ON THE AMPLITUDE OF VISUAL EVOKED POTENTIALS

L.A. Shimchenko

linashimchenko@gmail.com

SPIN-code: 3824-0066

E.D. Osintseva

osintseva.ed@gmail.com

SPIN-code: 1397-7753

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Modeling the influence of parameters of human head tissues (scalp, skull, cerebrospinal fluid) on the amplitudes of visual evoked potentials recorded from the surface of the scalp. The purpose of this work was to compare two mathematical models for different environments: planar and ellipsoidal. When comparing models, a mathematical model in an ellipsoidal environment showed a more accurate value of the amplitude, since it takes into account the geometric curvature of the head. The average relative error of the planar model is 65%. The average relative error of the effect of the thickness of the cerebrospinal fluid (CSF) layer and the dipole depth on the amplitude was 13% for the ellipsoid model, and 15% for the planar; the effect of skull thickness on amplitude for the ellipsoid model was less than 1%, and for the planar model it was about 3%. Based on this, it can be concluded that a change in the thickness of the CSF layer has a significant effect on the amplitude of the recorded signal, however, when varying the thickness of the skull, the effect will be minimal, i.e., an increase in the dipole depth is equivalent to an increase in skull thickness by 1 mm.

Keywords

Visual evoked potentials, multiple sclerosis, cerebrospinal fluid, skull, scalp, current dipole, amplitude, mathematical model

Received 12.02.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Janáky M. Jánossy A., Horváth G., et al. VEP and PERG in patients with multiple sclerosis, with and without a history of optic. *Doc Ophthalmol.*, 2017, vol. 134, no. 3, pp. 185–193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10633-017-9589-7>
- [2] Esen E., Sizmaz S., Balal Moscow, et al. Evaluation of the innermost retinal layers and visual evoked potentials in patients with multiple sclerosis. *Curr. Eye. Res.*, 2016, vol. 41, no. 10, pp. 1353–1358. DOI: <https://doi.org/10.3109/02713683.2015.1119283>
- [3] Klem G.H., Lüders H.O., Jasper H.H., et al. The ten twenty electrode system of the International Federation: The International Federation of Clinical Neurophysiology. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl.*, 1999, vol. 52, pp. 3–6.
- [4] Creel D.J. Visually evoked potentials. *Handb. Clin. Neurol.*, 2019, vol. 160, pp. 501–522. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64032-1.00034-5>

- [5] Gusev E.I., Zavalishin I.A., Boyko A.N. Raseyannyy skleroz i drugie demieliniziruyushchie zabolevaniya [Multiple sclerosis and other demyelinated diseases]. Moscow, Miklosh Publ., 2004 (in Russ.).
- [6] Lorina L.V., Musanapov M.A. Parameters of internal hydrocephalus in different types of disseminated sclerosis. *Rossiyskiy mediko-biologicheskiy vestnik imeni akademika I.P. Pavlova* [I.P. Pavlov Russian Medical Biological Herald], 2016, no. 2, pp. 58–63 (in Russ.).
- [7] Gusev I.E., Gekht A.B. Raseyannyy skleroz. Klinicheskie rekomendatsii [Disseminated sclerosis. Clinical guidelines]. Moscow, Ministerstvo zdravookhraneniya RF Publ., 2018 (in Russ.).
- [8] Suslina Z.A., Zakharova M.N., Zavalishin I.A., et al. Protocol for patients' management "disseminated sclerosis". *Problemy standartizatsii v zdravookhranении* [Health Care Standardization Problems], 2006, no. 2, pp. 25–97 (in Russ.).
- [9] Zhadin M.N. Biofizicheskie mekhanizmy formirovaniya elektroentsefalogramm [Biophysical mechanisms of electroencephalogram formation]. Moscow, Nauka Publ., 1984 (in Russ.).
- [10] Bykov M.P. Anatomiya golovnoy mozga. Fotograficheskiy atlas [Cerebrum anatomy. Photographic atlas]. Moscow, Prakticheskaya meditsina Publ., 2009 (in Russ.).
- [11] Gnezditskiy V.V. Obratnaya zadacha EEG i klinicheskaya elektroentsefalografiya [Inverse problem of electroencephalogram and clinical electroencephalography]. Moscow, MEDpress-inform Publ., 2004 (in Russ.).
- [12] Scherg M. Fundamentals of dipole source potential analysis. In: *Advances in audiology*. Basel, Karger, 1990, pp. 40–69.
- [13] Gavrilov L.F., Tatarinov V.G. Anatomiya [Anatomy]. Moscow, Meditsina Publ., 1986 (in Russ.).
- [14] Izmaylov Ch.A., Sokolov E.N., Chernorizov A.M. Psikhofiziologiya tsvetovogo zreniya [Psychophysiology of color vision]. Moscow, MSU Publ., 1989 (in Russ.).
- [15] Tissue frequency chart. *itis.swiss: website*. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/tissue-frequency-chart/> (accessed: 10.04.2019).
- [16] Plitnichenko B.G., Telkov V.E. Anatomical features of the thickness of cranial bones at the Tula region residents and their influence on fracture formation. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy* [Journal of New Medical Technologies], 2011, vol. 18, no. 3, pp. 314–316 (in Russ.).
- [17] Kovalenko A.V., Bisaga G.N., Gavrilyuk B.L., et al. Diagnostic value of visual evoked potentials study in multiple sclerosis patients without a history of optic neuritis. *Vestnik rossiyskoy voennoy-meditsinskoy akademii*, 2013, no. 2(42), pp. 49–54 (in Russ.).

Shimchenko L.A. — Student, Department of Medical and Technical Information Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Osintseva E.D. — Student, Department of Medical and Technical Information Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Dmitriev A.N., Assis. Professor, Department of Medical and Technical Information Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Shimchenko L.A., Osintseva E.D. Comparison of mathematical models of planar and ellipsoid media, taking into account the influence of physiological parameters of head tissues on the amplitude of visual evoked potentials. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 03(44). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-03-591.html> (in Russ.).