

МЕТОДЫ

УДК 612.821.6

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО РЕФЕРЕНТА
ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ЭЭГ

А.П. Кулаичев

*Кафедра высшей нервной деятельности, биологический факультет,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12
e-mail: akula-@mail.ru*

Исследованы топографические различия средних амплитуд спектра электроэнцефалограммы альфа-диапазона в отведениях системы 10–20% пробы “закрытые глаза”, обусловленные использованием 13 референтных схем: верх и низ подбородка (*П1, П2*), нос (*Н*), верх и низ шеи сзади (*Ш1, Ш2*), верх спины (*С*), объединение электродов спереди и сзади основания шеи (*2Ш*), объединенные, ипсилатеральные и отдельные ушные электроды (*A12, Sym, A1, A2*), вертекс (*Cz*), усредненный референт (*AR*). Выполнено 6 экспериментов для каждого из 10 испытуемых при заземленном и незаземленном состояниях трех удаленных базовых референтов *П2, С, 2Ш*. Парные оценки топографической согласованности 13 референтных схем осуществлялись по предложенному комплексу из трех независимых показателей и основанному на них оценочному критерию с последующей разделяющей кластеризацией референтных схем и ее дискриминантной верификацией. В результате установлено: 1) наиболее высокосогласованную топографию обеспечивают референты: *A12, П1, П2, Sym*; 2) референты *A1, Ш2, A2, Ш1, AR, Cz* характеризуются индивидуально различной топографией, что может приводить к противоречивости выводов, полученных при их использовании; 3) не выявлено оснований для предпочтения заземленного (нейтрального) состояния референтов, что снижает актуальность задачи поиска или конструирования бесконечно удаленного нейтрального референта.

Ключевые слова: *ЭЭГ, референтный электрод, бесконечно удаленный референт, нейтральный референт.*

В области электроэнцефалографических исследований, несмотря на десятилетние дискуссии, не сформировалось единого мнения о месте расположения референтного электрода, относительно которого предпочтительно регистрировать электроэнцефалограмму (ЭЭГ) на скальпе [1–3]. Так, уже в начале 50-х годов прошлого века, резюмируя предшествующие обсуждения, отметили [4], что использование мочек ушей по отдельности вследствие их близости к височным отведениям вызывает там уменьшение амплитуды ЭЭГ. В случае же патологической активности в височной области она отражается на данных, получаемых с помощью ушных электродов, а через их референтность – на результатах, получаемых со всех остальных отведений. Референты на носу и лице подвержены артефактам от движения глаз. Размещение референтов на теле ведет к появлению ЭКГ-артефактов. Было предложено размещение электродов спереди и сзади основания шеи, что в отведениях от скальпа дает примерно одинаковый вольтаж, но противоположного знака, поэтому такое объединение обеспечивает малозаметный посторонний вольтаж. Позднее [2] обсуждались используемые в практике референты: вертекс (*Cz*), объединенный ушной, объединенный мастоидный, ипсилатераль-

ные или контралатеральные уши, кончик носа, биполярные референты, общий усредненный электрод (*AR – averaged reference*), взвешенный *AR*, референт исходного происхождения (*source derivation*). Отмечено, что каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, вызывая различные искажения в топографической картине распределения ЭЭГ-потенциалов. В [5, 6] обсуждались более удаленные референты, расположенные на большом пальце, локте, колене, плече, шее, груди, спине, носе. Однако надежды найти на теле потенциал, близкий к нулевому, или идеальный референт на большом удалении от нейронных источников неоднократно подвергались сомнению [1, 7].

Наряду с этим в последние годы стали разрабатываться математические методы конструирования неактивного, нейтрального референта: стандартизация бесконечно удаленного референта (*REST – reference electrode standardization technique*) [8], разделение источников (*BSS – blind source separation*) [9], ненаправленный ответ минимальной мощности (*MPDR – minimum power directionless response*) [10], извлечение плотности тока источника (*CSD – current source density derivations*) [11, 12], робастное оценивание [13] и другие. Эти методы продолжают модифицироваться и подпитывают

позитивные ожидания [14], но имеют скорее заявочное и теоретическое значение, чем реальное пространство и верификацию в практике.

Тем самым данная проблема еще далека от окончательного решения, что и определяет актуальность новых подходов к этой теме, особенно в отношении сравнения реальных физических референтов.

Материал и методы

В экспериментах участвовало 10 праворуких мужчин (возраст 18–70 лет). Для каждого испытуемого с интервалом 2–3 мин проведено три пары экспериментов с двумя последовательными записями ЭЭГ в каждом эксперименте. В этих трех парах запись производилась от трех базовых, удаленных от скальпа и минимально подверженных артефактам референтов: низ подбородка (*П2*); первый грудной позвонок (*С*), объединенные электроды спереди и сзади основания шеи (*2Ш*). Два эксперимента в каждой паре отличались состоянием базового референта: 1) обычное состояние (*П2*, *С*, *2Ш*); 2) заземление на электрически независимую землю (*П2g*, *Сg*, *2Шg*). Электробезопасное заземление обеспечивало на референте постоянный нулевой потенциал, т.е. реализовывало концепцию бесконечно удаленного нейтрального референта. Система отведений – 10–20%, проба “закрытые глаза”, частота дискретизации 250 Гц, полоса 0,5–32 Гц, длительность записи 32,77 с, ЭЭГ-усилитель NVX-52 (МКС, Россия). Все испытуемые дали письменное согласие на участие в экспериментах.

Кроме 21-го отведения от скальпа регистрировались ближние ушные отведения (*A1*, *A2*) и дальние: нос (*H*), верх подбородка (*П1*), первый шейный позвонок (*Ш1*), седьмой шейный позвонок (*Ш2*). Далее каждая запись математически преобразовывалась к 13 референтным схемам: *П1*, *H*, *Ш1*, *Ш2*, *A1*, *A2*, *Cz*, объединенные ушные электроды (*A12*), ипсилатеральные уши (*Sym*), усредненный референт (*AR*), базовые референты (*П2*, *С*, *2Ш*). Для каждой записи и каждой референтной схемы вычислялись амплитудные спектры в отведениях от скальпа и их средние амплитуды (*Asp*) в альфа-диапазоне.

Для сравнения сходства и различия топографии ЭЭГ введены три взаимно ортогональные (независимые) показателя:

1. Для каждой пары записей, отвечающих референтным схемам *i* и *j*, вычислялись коэффициенты корреляции Пирсона r_{ij} между *Asp* в отведениях от скальпа. По полученной матрице взаимных корреляций вычислялась средняя корреляция $M_i(r_{ij})$ для каждого *i*-референта со всеми остальными референтами. Эти корреляции выступают оценками интегральных топографических различий.

2. Вычислялись разности ΔAsp_1 между *Asp* в соседних отведениях в сагиттальном направлении, после чего аналогично п.1 вычислялись средние корреляции между ΔAsp_1 .

3. Вычислялись разности ΔAsp_2 между *Asp* в симметричных отведениях (асимметрия), после чего аналогично п.1 рассчитывались средние корреляции между ΔAsp_2 .

Близкими по топографии могут быть признаны референты, имеющие высокие средние корреляции $M_i(r_{ij})$ по каждому показателю. Действительно, такие референты проявляют высокое сходство топографии с топографией большинства других референтов. А топография референта с низким $M_i(r_{ij})$ имеет малое сходство с топографией других референтов, и его использование приводит к своеобразной специфике распределения ЭЭГ-потенциалов. В тех отведениях, где у большинства референтов наблюдается увеличение амплитуды ЭЭГ, у такого референта имеет место ее уменьшение и наоборот. В конкретных исследованиях это может приводить к выводам, противоречащим исследованиям с использованием других референтов. Подчеркнем, что именно топографические соотношения принципиально важны для выявления межгрупповых различий и дифференциации функциональных состояний, патологий, половых, возрастных, профессиональных, социальных и др. различий.

Для классификации референтных схем по степени их топографической согласованности использована следующая методика:

- 1) для лучшей сравнимости оценки $M_i(r_{ij})$ приводятся к единому диапазону изменения посредством ранжирования;
- 2) для каждого испытуемого вычисляется средний ранг каждой референтной схемы;
- 3) по полученной матрице средних рангов производится кластерный анализ референтных схем методом К-средних;
- 4) полученная классификация статистически верифицируется методом дискриминантного анализа.

Результаты

1. Влияние заземления базового референта

На рис. 1 приведены графики изменения усредненных по скальпу *Asp* для трех базовых референтов и двух их состояний (заземленное/незаземленное) у 10 испытуемых с учетом двух последовательных записей для каждого испытуемого. Как следует из рис. 1, полученные данные подвержены сильной межиндивидуальной вариабельности (МИВ). Там же (при сопоставлении двух значений по двум последовательно выполненным записям) проявляется наличие внутрииндивидуальной вариабельности (ВИВ), которая существенно ниже по сравнению с МИВ.

При анализе различий между заземленным и незаземленным состояниями базовых референтов необходимо учесть, что исходные данные относятся к не одномоментно выполненным записям, поэтому на результаты сравнения будет оказывать влияние ВИВ и ее границы следует заранее оценить. Нали-

Таблица 1

Средние ранги оценок топографической согласованности 13 референтных схем по 10 испытуемым с результатами их разделяющей классификации и дискриминантной верификации

| Референт: | <i>П2</i> | <i>С</i> | <i>2Ш</i> | <i>П1</i> | <i>Н</i> | <i>П2</i> | <i>П1</i> | <i>A1</i> | <i>A2</i> | <i>A12</i> | <i>Sym</i> | <i>AR</i> | <i>Cz</i> |
|-----------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|
| 1 | 9,83 | 7,17 | 8,33 | 8,56 | 6,22 | 6,11 | 4,22 | 4,44 | 5,06 | 9,89 | 6,39 | 4,67 | 2 |
| 2 | 10,67 | 9,33 | 8,67 | 9,78 | 7,56 | 5,33 | 3,67 | 3,44 | 3,56 | 10,44 | 6,89 | 4,33 | 1,44 |
| 3 | 5,67 | 5,67 | 8 | 8,89 | 6,22 | 4,33 | 2,44 | 5,33 | 4,67 | 10,06 | 8,44 | 5,72 | 3,44 |
| 4 | 8,67 | 2,67 | 4,33 | 8,67 | 6,44 | 4,22 | 5,22 | 8 | 6,33 | 8,89 | 8,89 | 2,89 | 1,22 |
| 5 | 10,5 | 6,33 | 5 | 9,17 | 7,67 | 5,44 | 4,89 | 5,11 | 5 | 9,56 | 7,56 | 3 | 1,33 |
| 6 | 5,33 | 9,67 | 4,67 | 9 | 6,89 | 4,67 | 3,33 | 6,11 | 4,44 | 10,22 | 8,33 | 4,33 | 2,11 |
| 7 | 10 | 8 | 4,33 | 8 | 5,33 | 4 | 2,78 | 6,22 | 5,78 | 9,11 | 8,33 | 6,11 | 2,89 |
| 8 | 9 | 6 | 5,33 | 9,11 | 8,78 | 7 | 3,33 | 3,33 | 4,67 | 10 | 5,78 | 4,22 | 3 |
| 9 | 11 | 7,67 | 10 | 5,78 | 4,33 | 7,22 | 7,78 | 6,33 | 4,67 | 9,11 | 7,89 | 2,06 | 1,28 |
| 10 | 2,67 | 3,67 | 8 | 8,67 | 5,56 | 5,78 | 8,56 | 5,78 | 5 | 10,11 | 3,11 | 6,56 | 2,11 |
| Среднее | 8,33 | 6,62 | 6,67 | 8,56 | 6,5 | 5,41 | 4,62 | 5,41 | 4,92 | 9,74 | 7,16 | 4,39 | 2,08 |
| Класс | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| D ² Махаланобиса | 7,5 | 8,57 | 8,57 | 7,5 | 8,57 | 8,57 | 8,57 | 8,57 | 8,57 | 7,5 | 7,5 | 5 | 5 |
| P | 0,68 | 0,57 | 0,57 | 0,68 | 0,57 | 0,57 | 0,57 | 0,57 | 0,57 | 0,68 | 0,68 | 0,89 | 0,89 |

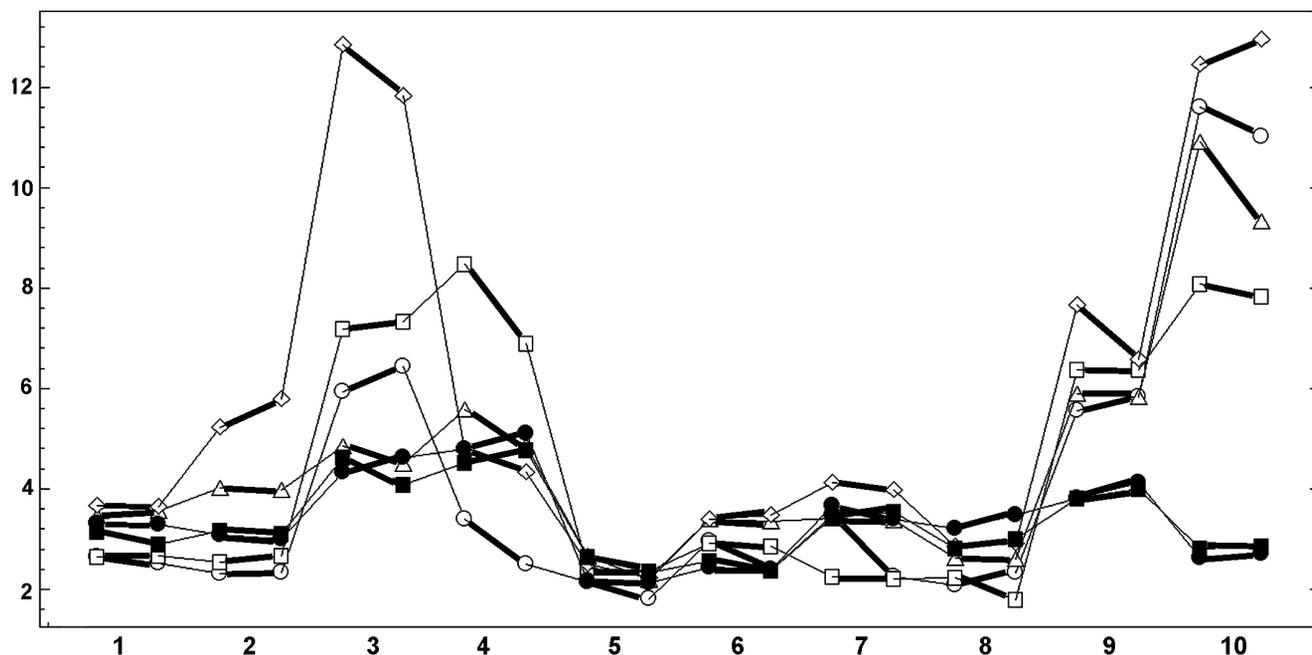


Рис. 1. Диаграммы усредненных по скальпу средних амплитуд спектра [мкВ] в альфа-диапазоне в порядке 10 испытуемых (горизонтальная ось) в 6 экспериментах с использованием трех базовых референтов при двух их состояниях (незаземленное и заземленное): подбородок (*П2*, *П2g* – круги, квадраты), шея (*С*, *Сg* – треугольники, ромбы), объединение электродов на шее (*2Ш*, *2Шg* – заливные круги, заливные квадраты). Для каждого испытуемого две соседние точки на диаграммах (соединены полужирными линиями) относятся к двум последовательно выполненным записям. Тонкие линии играют вспомогательную роль для объединения точек каждой из 6 диаграмм

чие двух последовательно выполненных записей в каждом эксперименте позволяет выделить корреляции, определенные ВИБ и влиянием фактора заземления (ФЗ). В качестве исходных данных будем использовать три вышеперечисленных пер-

вичных топографических показателя A_{cp} , ΔA_{cp_1} , ΔA_{cp_2} по отдельности. По каждому показателю и 10 испытуемым вычислим корреляции между наличием/отсутствием заземления и для двух последовательных записей, отражающих влияние ВИБ.

Если заземление действительно существенно влияет на изменение топографии, то топограммы для заземленного и незаземленного состояния будут сильнее различаться, чем в случае естественной ВИБ (выступающей как менее значимый и случайный фактор). Тогда и корреляции между одноименными первичными топографическими показателями будут систематически ниже, чем в случае ВИБ. Поэтому влияние ФЗ можно выявить сравнением по t-критерию средних значений для пар выборок, относящихся к ФЗ и ВИБ. Для этого были сформированы три пары сравниваемых выборок (корреляций по трем первичным показателям) объемом 60 значений каждая (3 базовых референта × 2 последовательно выполненные записи × 10 испытуемых).

Рассмотрим описательную статистику (среднее ± стандартное отклонение) для этих трех пар выборок: $0,9 \pm 0,12$ и $0,92 \pm 0,09$ (корреляции по Acp); $0,82 \pm 0,2$ и $0,84 \pm 0,15$ (ΔAcp_1); $0,67 \pm 0,33$ и $0,76 \pm 0,21$ (ΔAcp_2). Как видно, средние значения корреляций, относящихся к ФЗ, как и предполагалось, во всех трех случаях несколько ниже по сравнению с ВИБ (на 2%, 2% и 14%). Однако t-критерий для корреляций с Z-нормализацией Фишера $Z(r) = 0,5 \times \ln((1+r)/(1-r))$ не выявляет достоверных различий между средними на уровнях значимости $p = 0,89$; $0,67$; $0,98$. Тем самым, для всех трех показателей не обнаружено влияния ФЗ, выходящего за пределы ВИБ.

Это подтверждают и взаимные корреляции внутри триад анализируемых выборок (относящихся к Acp и ΔAcp_1 , Acp и ΔAcp_2 , ΔAcp_1 и ΔAcp_2) по ФЗ

0,68; 0,63; 0,69 и по влиянию ВИБ 0,55; 0,31; 0,54. Как видно, первые систематически выше, т.е. сами корреляции между тремя парами выборок для ФЗ более согласованы, чем относящиеся к ВИБ. Таким образом, и в этом случае не наблюдается уменьшающее корреляции влияние фактора заземления.

На основании вышеизложенного заземленное и незаземленное состояния референтов можно считать эквивалентными в плане сохранения топографии ЭЭГ.

2. Топографические различия между референтами

На основании выявленной эквивалентности в данном подразделе используются записи при обычном незаземленном состоянии трех базовых референтов. В отличие от предыдущего раздела ниже сравнения производятся в рамках одной записи, приведенной посредством арифметических преобразований к разным референтным схемам. Это позволяет получить точные количественные оценки топографических различий, вызываемые отдельными референтами, незамаскированные влиянием ВИБ и МИВ. На рис. 2 по данным одного из испытуемых приведены графики средних амплитуд спектра для 11 референтных схем при базовом референте П2, где очевидны топографические различия при использовании некоторых референтов.

Для количественной верификации этих различий выполнена классификация референтных схем по степени их топографической согласованности.

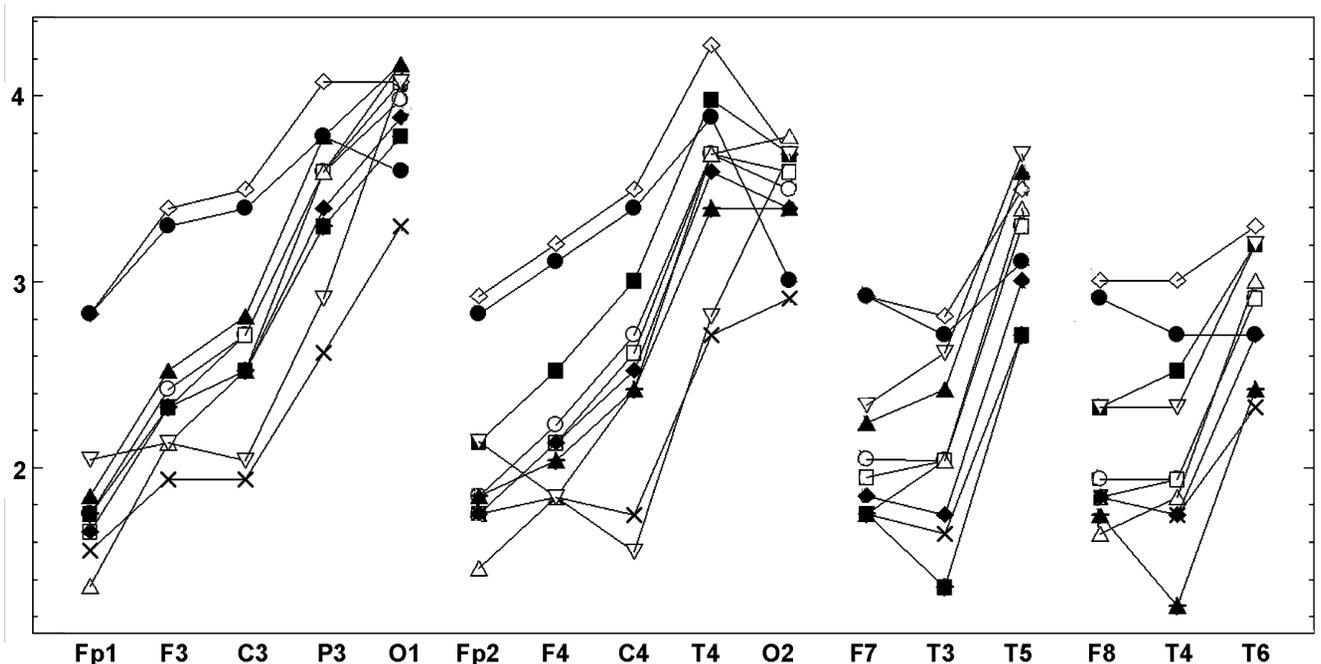


Рис. 2. Средняя амплитуда спектра [мкВ] в альфа-диапазоне Acp в отведениях от скальпа (горизонтальная ось) для избранного испытуемого в эксперименте с использованием незаземленного базового референта внизу подбородка (П2). Эта запись математически преобразована к 11-ти референтным схемам, Acp для которых и представлены на 11 диаграммах рисунка: базовый референт (круги); верх подбородка П1 (квадраты), нос Н (треугольники вверх), низ шеи Ш1 (ромбы), верх шеи Ш2 (черные круги), ушные электроды А1 (черные квадраты) и А2 (черные треугольники), объединенные ушные электроды А12 (черные ромбы), ипсилатеральные ушные электроды Sum (кресты), усредненный электрод AR (косые кресты), вертекс Cz (треугольники вниз). Точки на диаграммах соединены линиями в порядке сагиттально-меридианного расположения электродов

Были опробованы кластерные разбиения на 2, 3, 4 и 5 классов. Единственная статистически достоверная ($p = 0$) классификация включала три класса (табл. 1) в порядке возрастания топографической несогласованности референтных схем. В нижних строках табл. 1 приведены значения расстояния Махаланобиса D^2 каждой референтной схемы до центра своего класса и значимость p нулевой гипотезы " $D^2 = 0$ ", означающей "референтная схема принадлежит данному классу". Все нулевые гипотезы принимаются на высоком уровне значимости. Для количественного сопоставления референтных схем в табл. 1 приведены и усредненные по 10 испытуемым значения их рангов.

Тем самым достоверно выделены три класса референтных схем:

1) референты: *A12, П1, П2, Sym* (средние ранги 9,7; 8,6; 8,3; 7,2) характеризуются самым высоким сходством топографии со всеми референтами;

2) референты *2Ш, С, Н, А1, Ш2, А2, Ш1* (ранги 6,7; 6,6; 6,5; 5,4; 5,4; 4,9; 4,6) характеризуются менее согласованной топографией;

3) референты *AR* и *Cz* (ранги 4,4; 2,1) характеризуется наименее согласованной топографией.

Обсуждение результатов

Среди множества публикаций по рассматриваемой тематике имеется достаточно мало работ, всецело посвященных сравнению реальных референтных схем, используемых в научно-исследовательской и клинической практике (отчасти этому посвящены работы [15, 16]). Большинство работ посвящено общей характеристике проблемы и обсуждению мнений предшествующих авторов, а также изложению новых математических методов расчета виртуальных референтов, имеющих скорее теоретико-исследовательское значение, чем реальное использование и верификацию в практике. В них предлагаемые методы сравниваются с другими вычислительными аналогами и избранными реальными референтами, преимущественно *AR*, реже *A12* [6, 10, 13, 17, 18], на примерах имитационных сигналов и избранных ЭЭГ-записей. Полученные результаты иллюстрируются примерами ЭЭГ-записей, амплитудных спектров, спектров мощности и топографических карт, которые в свою очередь сопоставляются и оцениваются на базе их визуального изучения с чисто качественными словесными оценками и выводами [4, 6, 9, 10, 12, 16, 18, 20]. В некоторых исследованиях к этому добавляются количественные оценки корреляций, средних значений, отношений сигнал/шум, иллюстрируемые временными графиками, диаграммами рассеяния,

столбиковыми диаграммами со стандартными ошибками [8, 21], также обсуждаемые, преимущественно, с качественными оценками. И лишь в отдельных публикациях присутствуют проверки статистических гипотез, парные сравнения по критерию Стьюдента и однофакторный дисперсионный анализ [13, 17, 22], которые, однако, касаются не комплексных различий референтных схем, а лишь их локальных аспектов. Тем самым, несмотря на 65-летнее обсуждение рассматриваемой проблемы, не выработаны количественные критерии для сопоставления и оценки преимуществ использования различных референтов ЭЭГ.

В отличие от этого нами поставлена задача оценки влияния на топографию ЭЭГ именно физических, реальных референтов, используемых в научно-исследовательской и клинической практике. Для сравнения топографической близости референтных схем предложены три ортогональных показателя и методика классификации. На этой основе исследуемые референты были разделены на три класса по степени близости и различия топографии распределения средней амплитуды спектра на скальпе. Достоверность такой классификации статистически обоснована. В работе также впервые исследовалось влияние заземленных (электрически нейтральных) референтов с целью выявления преимуществ их использования.

Основные результаты и выводы:

1. Не выявлено преимуществ использования заземленного или незаземленного состояния базовых референтов. Эти состояния можно считать эквивалентными в плане сохранения топографии ЭЭГ-потенциалов, что снижает актуальность задачи поиска или математического конструирования бесконечно удаленного нейтрального референта.

2. Референты *A1, Ш2, А2, Ш1, AR, Cz* (в порядке уменьшения рангов) характеризуются высокими топографическими различиями, поэтому их использование может приводить к противоречивости получаемых результатов и выводов.

3. В число наиболее согласованных по топографии ЭЭГ вошли референты *A12, П1, П2, Sym*. С учетом результата 1 можно полагать, что эти референты обеспечивают и наиболее адекватную топографию ЭЭГ. Что касается наиболее распространенной в практике схемы *A12*, то корреляции ЭЭГ с близлежащими к *A1* и *A2* отведениями *T3, T4* достаточно велики, порядка 0,75–0,8. Однако корреляции между *A1–A2* существенно ниже, порядка 0,35–0,45, а для *T3–T4* – порядка 0,17–0,2. Поэтому объединение ушных электродов не вносит существенных искажений в "истинную" топографию ЭЭГ-потенциалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Nunez P.L. Electric fields of the brain: the neurophysics of EEG. NY.: Oxford Univ. Press, 1981. 640 p.
Teplan M. Fundamentals of EEG measurement // Meas. Sci. Rev. 2002. Vol. 2, Sect. 2. P. 1–11.
Schiff S.J. Dangerous phase // Neuroinformatics. 2006. Vol. 3. N 4. P. 315–318.

Stephenson W.A., Gibbs, F.A. A balanced non-cephalic reference electrode // Electroenceph. Clin. Neurophysiol. 1951. N 3. P. 237–240.

Wolpaw J.R., Wood C.C. Scalp distribution of human auditory evoked potentials. Evaluation of reference electrode

sites // *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 1982. Vol. 54. N 1. P. 15–24.

Hu S., Cao Y., Chen S., Kong W., Zhang J., Li X., Zhang Y. Independence verification for reference signal under neck of human body in EEG recordings // *Proceedings of the 31-th Chinese Control Conference, Hefei (July 25–27, 2012)*. 2012. P. 4038–4042.

Geselowitz D.B. The zero of potential // *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* 1998. Vol. 17. N 1. P. 128–132.

Yao D. A method to standardize a reference of scalp EEG recordings to a point at infinity // *Physiol. Meas.* 2001. Vol. 22. N 4. P. 693–711.

Madhu N., Ranta R., Maillard L., Koessler L.A. Unified treatment of the reference estimation problem in depth EEG recordings // *Med. Biol. Eng. Comput.* 2012. Vol. 50. N 10. P. 1003–1015.

Hu S., Cao Y., Chen S., Zhang J., Kong W., Yang K., et al. A comparative study of two reference estimation methods in EEG recording // *Proc. Brain. Inspir. Cogn. Syst.* 2012. P. 321–328.

Hjorth B. An on-line transformation of EEG scalp potentials into orthogonal source derivations // *Electroenceph. Clin. Neurophys.* 1975. Vol. 39. N 5. P. 526–530.

Carvalhoes C.G., Suppes P. A spline framework for estimating the EEG surface Laplacian using the Euclidean metric // *Neural. Comput.* 2011. Vol. 23. N 11. P. 2974–3000.

Lepage K.Q., Kramer M.A., Chu C.J. A statistically robust EEG re-referencing procedure to mitigate reference effect // *J. Neurosci. Methods.* 2014. Vol. 235. N 30. P. 101–116.

Kayser J., Tenke C.E. In search of the Rosetta Stone for scalp EEG: Converging on reference-free techniques // *Clin. Neurophysiol.* 2010. Vol. 121. N 12. P. 1973–1975.

Ng S.C., Raveendran P. Comparison of different montages on to EEG classification // 3rd Kuala Lumpur international conference on biomedical engineering 2006, Biomed 2006, 11–14 December 2006 Kuala Lumpur, Malaysia. Springer Berlin Heidelberg, 2007. P. 365–368.

Alhaddad M.J. Common average reference (CAR) improves P300 speller // *Int. J. Eng. Technol.* 2012. Vol. 2. N 3. P. 451–463.

Qin Y, Xu P, Yao D. A comparative study of different references for EEG default mode network: the use of the infinity reference // *Clin. Neurophysiol.* 2010. Vol. 121. N 12. P. 1981–1991.

Wang B., Wang X., Ikeda A., Nagamin T., Shibasaki H., Nakamura M. Automatic reference selection for quantitative EEG interpretation: Identification of diffuse/localised activity and the active earlobe reference, iterative detection of the distribution of EEG rhythms // *Med. Eng. Phys.* 2014. Vol. 36. N 1. P. 88–95.

Tenke C.E., Kayser J. Reference-free quantification of EEG spectra: combining current source density (CSD) and frequency principal components analysis (fPCA) // *Clin. Neurophysiol.* 2005. Vol. 116. N 12. P. 2826–2846.

Marzett L., Nolte G., Perrucci M.G., Romani G.L., Del Gratta C. The use of standardized infinity reference in EEG coherency studies // *Neuroimage.* 2007. Vol. 36. N 1. P. 48–63.

Essl M., Rappelsberger P. EEG coherence and reference signals: experimental results and mathematical explanations // *Med. Biol. Eng. Comput.* 1998. Vol. 36. N 4. P. 399–406.

Hagemann D., Naumann E., Thayer J.F. The quest for the EEG reference revisited: A glance from brain asymmetry research // *Psychophysiol.* 2001. Vol. 38. N 5. P. 847–857.

Поступила в редакцию 04.04.2016 г.
Принята в печать 26.05.2016 г.

METHODS

THE PROBLEM OF CHOICE OF OPTIMUM REFERENT FOR EEG REGISTRATION

A.P. Kulaichev

*Department of Higher Nervous Activity, School of Biology, Lomonosov Moscow State University;
Leninskiye Gory 1-12, Moscow, 119234, Russia
e-mail: akula-@mail.ru*

The problem to find the optimal EEG reference is the actual topic for discussion for over 60 years. In this work we studied topographical distinctions of averaged spectral amplitudes in alpha domain in 10–20%–system destinations at “closed eyes” test for 13 references: top and bottom of chin (P1, P2), tip of nose (N), top and bottom behind of neck (Sh1, Sh2), top of back (C), united front and back of neck (2Sh), united, ipsilateral and separate ears (A12, Sym, A1, A2), vertex (Cz), averaged reference (AR). Six experiments have been performed for 10 examineers with grounded and ungrounded conditions of three distant basic references P2, C, 2Sh. Pairwise estimates of topographic consistency 13 references were carried out using the proposed complex of three independent indicators and assessment criterion followed by K-means classification of reference schemes and its discriminant verification. The main results are: 1) the highly coherent topography is provided by references: A12, P1, P2, Sym; 2) A1, Sh2, A2, Sh1, AR, Cz references are characterized by considerably less coordinated and various topography that can lead to contradictory conclusions obtained by their use; 3) we didn’t find significant reasons to prefer the grounded (neutral) or ungrounded condition of basic references, that reduces the relevance of problem to search or calculate an infinitely far neutral reference. So the problem to search or mathematical construct an infinitely remote neutral reference may be no really actual.

Keywords: *EEG, reference electrode, reference at infinity, neutral reference.*

Сведения об авторе:

Кулаичев Алексей Павлович — докт. биол. наук, вед. науч. сотр. кафедры высшей нервной деятельности биологического ф-та МГУ. Тел. 8-495-939-50-05, e-mail: akula-@mail.ru