

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОЦЕНОК АМПЛИТУДЫ ЭЭГ**А.П. Кулаичев ©**

Биологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Аннотация

В работе проведено метрологическое сравнение пяти показателей, оценивающих средний уровень ЭЭГ–потенциалов: по амплитудному спектру (A_c), по спектру мощности (P_c), периодометрически (A_p), по модулю ЭЭГ (A_m) и по огибающей (A_o). Получены пять основных результатов: 1) натуральные показатели A_p , A_m , A_o дают практически эквивалентные оценки, которые высокодостоверно отличаются от оценок A_c , P_c ; 2) натуральным показателям свойственна гладкая динамика изменения их значений на последовательных эпохах, тогда как косвенные спектральные оценки подвержены резким и случайным колебаниям; 3) косвенные оценки A_c , P_c в отличие от натуральных не обладают свойством аддитивности, присущим статистической операции усреднения, получаемые значения в зависимости от числа и длины усредняемых эпох могут различаться в 3 и более раз; 4) показатели A_c , P_c на модельных сигналах с известным соотношением амплитуд дают оценки в 1.4–1.55 раза отличающихся от истинного значения, тогда как натуральные показатели демонстрируют правильные соотношения средних амплитуд; 5) показатели A_c , P_c в зависимости от формы спектрального распределения могут различаться по своему соотношению для разных испытуемых более чем в 5 раз, в то время как натуральные показатели демонстрируют одинаковые соотношения значений, отличающиеся от косвенных оценок в 1.3–3.7 раз. Наихудшие результаты во всех сравнениях относятся к использованию спектра мощности. Эти выводы не позволяют метрологически квалифицировать спектральные оценки средней амплитуды и мощности ЭЭГ как аналитический инструмент, адекватный природе и специфике ЭЭГ–потенциалов. Их использование может приводить к несовместимости результатов, полученных разными исследователями.

Ключевые слова: амплитуда ЭЭГ, амплитудный спектр, спектр мощности, периодометрия, огибающая, фильтрация, метрология.

Keywords: EEG amplitude, amplitude spectrum, power spectrum, periodometric, envelope, filtration, metrology.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе мы рассмотрим важный озаглавленный вопрос из области метрологии ¹, критерии, оценки и стандарты которой в области вычислительной (количественной) ЭЭГ (quantitative EEG – QEEG) по ряду причин глобально не сформировались ². Как свидетельствует содержание специальной обзорной монографии [19] и множества журнальных публикаций по QEEG, метрологические вопросы почти не привлекают внимание исследователей ЭЭГ. Новые предлагаемые математические методы не сравниваются с аналогами, их эффективность при решении типовых физиологических задач не оценивается, не сопоставляется, статистически не верифицируется. Традиционные в практике методы критически не исследуются и не переосмысливаются. Не существует всемирной нормативной базы записей ЭЭГ, а также хранилищ записей опубликованных исследований, которые позволяли бы независимо верифицировать полученные с их использованием результаты. Действительно, если исходные материалы в химии, физике и многих других

¹ «Метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Предметом метрологии является извлечение количественной информации о свойствах объектов с заданной точностью и достоверностью; нормативная база для этого — метрологические стандарты» [БЭС].

² Некоторые из причин отмечены в историческом обзоре развития методов и средств вычислительного анализа ЭЭГ из монографии [Кулаичев, 2007].

науках, как правило, могут быть доступны в своих аналогах другим исследователям, то записи ЭЭГ часто субъективно и методически уникальны и невоспроизводимы.

Лишь редкие работы [3, 5-7, 11] затрагивают частные аспекты метрологической проблематики. Отдельную ветвь составляет длительная дискуссия об оптимальном ЭЭГ–референте, которая за 65 лет своего развития так и не выработала количественных оценочных критериев и стандартов (см. обзоры [16, 17]). Отсутствие метрологического обеспечения и стандартов приводит к несовместимости и противоречивости результатов и выводов, полученных разными исследователями (см. обзоры литературы в [8-10]).

Более благоприятная ситуация сложилась в области традиционной клинической диагностики по ЭЭГ, всецело ориентированной на визуальное изучение записей, где сформированы четкие критерии и стандарты как собственно синдроматики, так и написания клинических заключений [1, 2, 13]. Другим примером является ситуация в области анализа variability сердечного ритма, где постоянно действующая международная рабочая группа, созданная несколько десятилетий назад Европейским кардиологическим обществом и Североамериканским обществом стимуляции и электрофизиологии, осуществляет метрологическую стандартизацию и регламентирование вычислительных методов и оценочных показателей [15].

Так или иначе, но научные исследования ЭЭГ много десятилетий преимущественно следовали в фарватере физических и технических приложений математических методов анализа сигналов, которые зачастую напрямую и некритически переносились привлеченными инженерными специалистами без должного учета фундаментальной нестационарности биосигналов и негармонической природы их источников [5]. Действительно, нет ни одного известного чистого или прикладного математика, внесшего вклад в разработку специальных методов анализа ЭЭГ.

Вместе с этим, вряд ли найдутся возражения против того, что в любой науке следует стремиться к повышению точности и адекватности измерительных и аналитических средств. Если у исследователя есть два аналитических инструмента, различающихся погрешностью измерения, то вдумчивый специалист, безусловно, выберет инструмент большей измерительной точности и надежности, иначе ответственное научное сообщество может признать его результаты и выводы недостаточно убедительными. Кроме того, фундаментальные вопросы точности и адекватности измерительных и аналитических средств, несомненно, являются методически значимыми, актуальными и первоочередными в любой научной области, включая и исследования ЭЭГ.

На основании вышеизложенного данная работа посвящена метрологическому сравнению прямых измерений средней амплитуды ЭЭГ в частотных диапазонах с косвенными оценками, полученными с использованием спектров мощности и амплитуды. Действительно, как хорошо известно, в исследованиях ЭЭГ существует крупное научное направление, связанное с выявлением по ЭЭГ межгрупповых различий (функциональных, половых, возрастных, клинических, социальных, профессиональных, географических и т.п.), где разные оценки средней амплитуды ЭЭГ в частотных диапазонах (в частности, по спектру мощности), а также разные оценки синхронности ЭЭГ [6, 7] являются одними из основных первичных показателей. И этому направлению посвящено неисчислимое множество публикаций.

ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ АМПЛИТУДЫ ЭЭГ

В эпоху ЭВМ, особенно благодаря появлению в 1965 г. алгоритма БПФ (FFT) амплитуда ЭЭГ стала оцениваться по амплитудному спектру в выбранном частотном диапазоне, а также по плотности спектральной мощности (*power spectral density*, в просторечии - по «спектру мощности» или «мощности ЭЭГ»), которая, как известно [12, 18], является квадратом амплитудного спектра. Как также хорошо известно, результатом БПФ является комплекснозначный спектр, модуль которого и называется амплитудным спектром.

Однако при отсутствии развитой профессиональной математической интуиции нелинейные соотношения между оценками спектра мощности трудны для восприятия в

сравнении с линейными соотношениями амплитудного спектра. Не так просто осознать и физиологический смысл оценок, выраженных в микровольтах в квадрате, когда исходно измеряются именно биопотенциалы, а не их квадраты, кубы или логарифмы.

Как следствие нелинейности в спектре мощности доминируют высокоамплитудные пики и нивелируются до исчезновения средние и низкоамплитудные детали. Это проявляется как в соотношениях по частотным диапазонам в конкретном отведении, так и в соотношениях по отведениям в конкретном диапазоне, но особенно зримо – гипертрофировано – на топографических картах с отображением на скальпе всего двух областей синего и красного цвета.

И наконец, давайте задумаемся, что математически означает среднее значение спектра мощности ЭЭГ в частотном диапазоне. Это есть дисперсия амплитудного спектра ЭЭГ относительно нуля в роли среднего значения [12]. Отсюда сразу же следует закономерный вопрос: какой физиологический смысл можно приписать такому показателю? Как известно, дисперсия является одной из двух характеристик, исчерпывающе определяющих форму нормального распределения вероятностей. Такой характеристике формы нормального распределения, очевидно, нельзя приписать прямой и ясный физиологический смысл, в отличие от прямого и ясного физиологического смысла амплитуды ЭЭГ [7]. То, что эта дисперсия не очень понятным образом изменяется при изменении функционального состояния является не ее физиологическим смыслом, а свойством, и таким же свойством обладает логарифм амплитуды, корень любой степени и др.

Вместе с этим, сами результаты спектрального анализа характеризуются рядом погрешностей, наиболее известным из которых является так называемое «вытекания мощности» из основных пиков, которое однако сужается с увеличением разрешения по частоте. К тому же такой эффект осмыслен для сигналов с мощными моногармоническими источниками, что не соответствует природе ЭЭГ, не имеющей такого рода генераторов. А если явления не существует, то не имеют смысла и средства борьбы с ним [14]. Менее известно влияние амплитудной модуляции, присущей именно ЭЭГ–сигналам, в результате чего в спектре появляются боковые пики, которые могут быть удалены от основного пика на значительное расстояние [5].

Так или иначе, при частотном разрешении от 0.25 Гц и лучше распределение гармоник по частоте для ЭЭГ представляется хаотичным чередованием высоко и низкоамплитудных составляющих, которые к тому же сильно варьируют по амплитуде и частоте от эпохи к эпохе (рис.1). Поэтому одиночные гармоники не представляют интереса для анализа, да и не имеют физиологического смысла. Отсюда обычно используются усредненные спектральные оценки в рамках выбранного частотного диапазона, которые являются более статистически устойчивым показателем. Эти показатели будем называть *косвенными оценками* среднего амплитудного уровня ЭЭГ в частотных диапазонах по амплитудному спектру ЭЭГ (A_c) и по спектру мощности ЭЭГ (P_c).

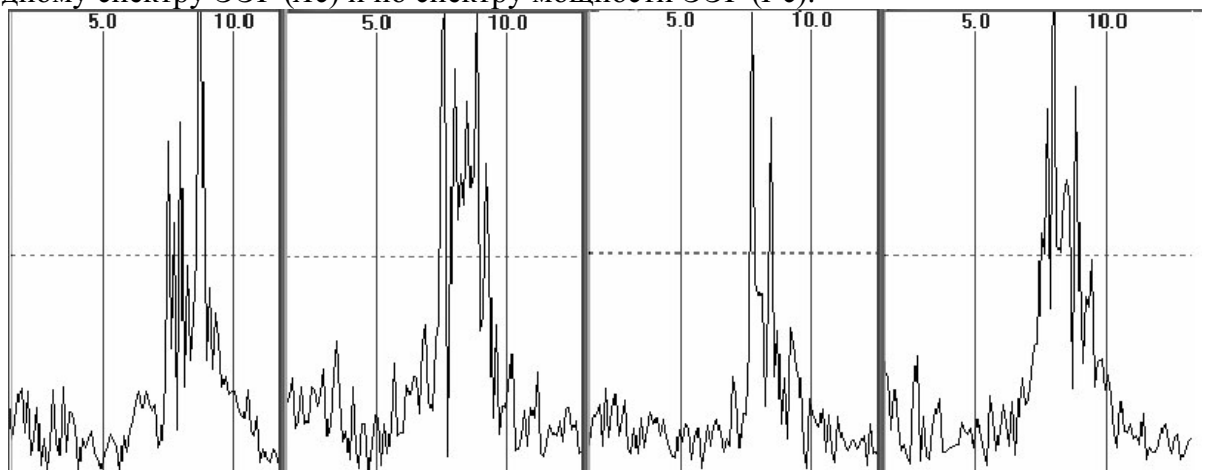


Рис.1. Амплитудные спектры на четырех последовательных 8-секундных эпохах в отведении О2 пробы «закрытые глаза»

Теперь задумаемся, что же содержательно означает «средняя амплитуда сигнала». Для моногармонических сигналов ответ очевиден – это половина разности между максимумом и минимумом колебаний. В случае полигармонического характера сигнала ответ не столь очевиден. В докомпьютерную эпоху этот вопрос решался методом *периодометрического анализа* ЭЭГ, когда проводились ручные измерения по бумажной записи амплитуд и периодов последовательных колебаний сигнала, по которым вычислялась средняя амплитуда (которую будем обозначать A_p), и другая описательная статистика. В эпоху ЭВМ этот метод реализовался с предварительной цифровой фильтрацией сигнала в заданном частотном диапазоне и последующими автоматическими измерениями восходящих и нисходящих перепадов амплитуды (рис.2Б).

Здесь, однако, имеются ряд тонкостей. В связи с амплитудной модуляцией ЭЭГ восходящие и нисходящие перепады амплитуды (абсолютные разности между ближайшими максимумами и минимумами) варьируют по величине. Поэтому по волевому решению можно усреднять только восходящие перепады, только нисходящие или же те и другие. Кроме того, временная длительность этих перепадов также варьирует, и это можно учитывать или не учитывать при усреднении. Иными словами, временная шкала измерений амплитуды неравномерная, то есть такие измерения не являются временным рядом. Далее, длительность некоторых периодов может выходить за рамки анализируемого частотного диапазона (такие периоды обычно относятся к низкоамплитудным колебаниям), и их включение/невключение в усреднение также относится к волевому выбору. Во всех этих вариантах результаты будут немного различаться, статистически насколько – никто не изучал.

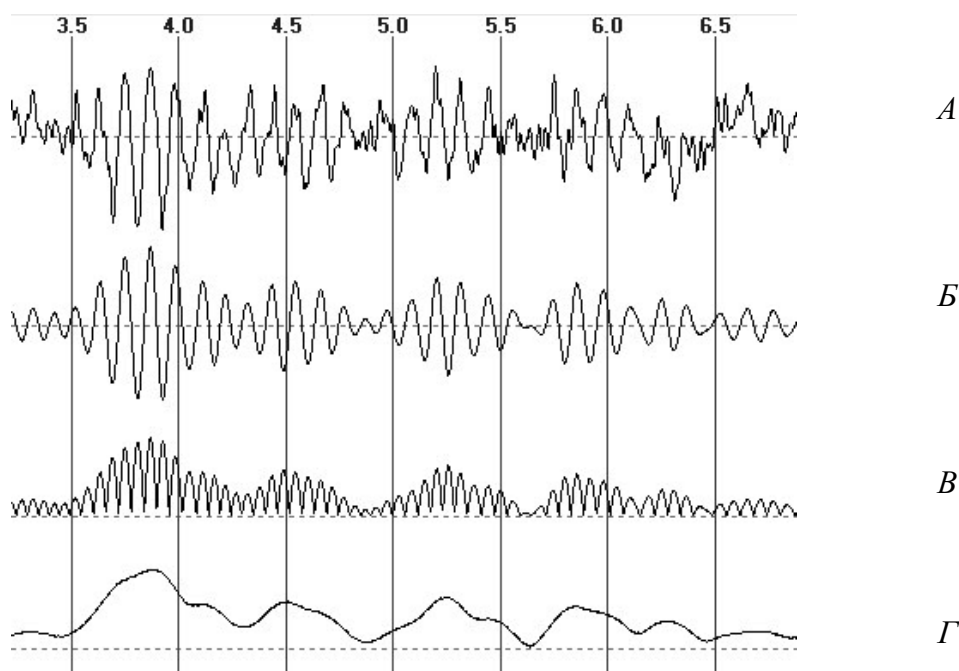


Рис.2. Фрагмент ЭЭГ (А), результат фильтрации в альфа-диапазоне (Б), модуль отфильтрованного сигнала (В), огибающая ЭЭГ (Г)

Другой, более простой в реализации метод состоит в вычислении среднего значения от абсолютной величины или модуля ЭЭГ (рис. 2В, этот показатель будем обозначать A_m). Действительно, поскольку таким измерениям предшествует фильтрация ЭЭГ в заданном частотном диапазоне, то полученная запись центрирована относительно нуля и положительные и отрицательные колебания ЭЭГ вполне симметричны, а динамика изменения их экстремумов достаточно гладкая. Поэтому простое усреднение амплитуд такого сигнала по всем временным отсчетам дает еще одну оценку средней амплитуды ЭЭГ подобно среднему значению временного ряда или представляемой им математической функции. При этом, очевидно, исключается и влияние временной вариабельности периодов и амплитуд, отмеченное выше в отношении периодометрического анализа.

Третьей альтернативной оценкой может выступать среднее значение огибающей ЭЭГ [18] (рис. 2Г), которая отражает изменение амплитудной модуляции сигнала, в связи с чем она аналогична периодометрической оценке (близка к 0.5 от A_p), но избавлена от дискретности распределения экстремумов ЭЭГ во времени и от вариабельности их периодов (этот показатель будем обозначать A_o).

Перечисленные три показателя будем называть *натуральными оценками* средней амплитуды ЭЭГ и далее рассмотрим, в каком соотношении они находятся с косвенными спектральными оценками.

МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Интегральные различия

Оценим различия показателей P_c , A_c , A_p , A_m , A_o на примере записи ЭЭГ пробы «закрытые глаза», выполненной по системе 10–20% с частотой дискретизации 256 Гц на интервале 32.77 с. На этом интервале вычислим значения пяти показателей для альфа-диапазоне в 16 нецентральных отведениях. Поскольку значения показателей различаются в 1.5–2 раза по своей величине и диапазону изменения, то для сравнимости результатов произведем Z-нормализацию значений каждого показателя по всем отведениям.

На рис. 3 приведены оценки P_c , A_c , A_o по отведениям в порядке их меридианного следования (оценки A_p и A_m по причине их близости к A_o не изображены). Как легко заметить, используемая запись демонстрирует классическое последовательное уменьшение амплитуды альфа-ритма от затылочных отведений к лобным с заметной и разнознаковой асимметрией в теменных и затылочных отведениях. Наблюдается также ряд различий между тремя показателями, изменяющихся по знаку в отдельных отведениях.

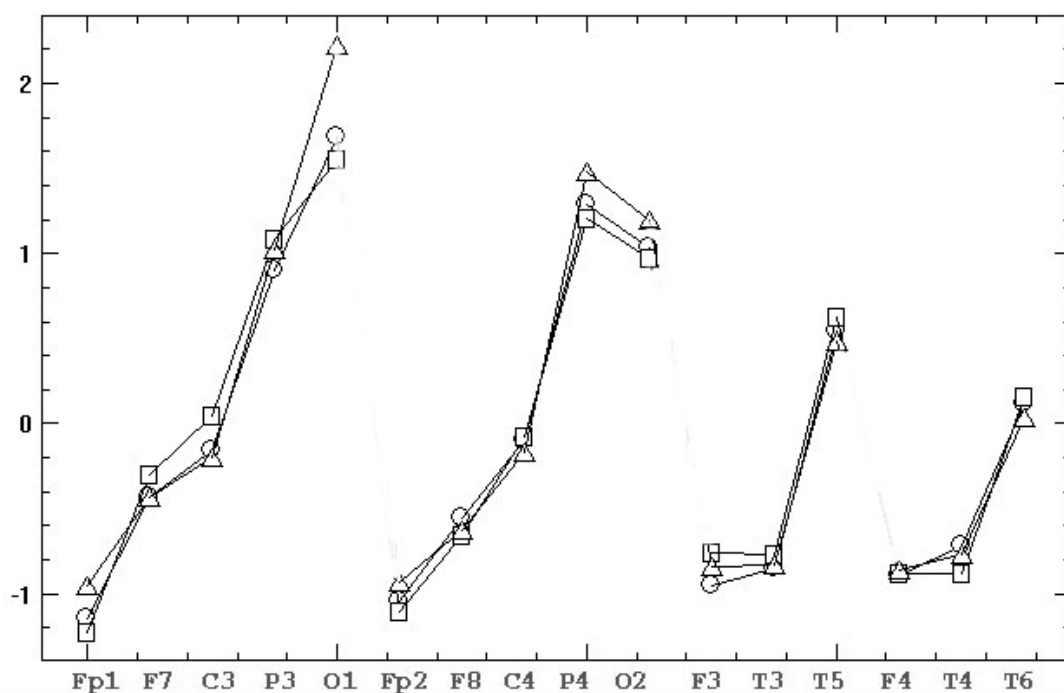


Рис.3. Z-нормализованные спектральные оценки средней амплитуды ЭЭГ (квадраты), средней мощности (треугольники) и оценки по огибающей ЭЭГ (круги)

Вычислим описательную статистику (диапазон изменения, среднее \pm стандартное отклонение) для абсолютных величин разностей по отведениям показателей A_c , A_p , A_m , относительно A_o :

$$|A_c - A_o|: 0.009 \pm 0.21, \quad 0.101 \pm 0.058;$$

$$|A_m - A_o|: 0.0001 \pm 0.012, \quad 0.0036 \pm 0.003;$$

$$|A_p - A_o|: 0.0004 \pm 0.07, \quad 0.003 \pm 0.002.$$

Наибольшая величина разности имеет место для A_c и достигает 21% от Z-отклонения, а средняя разность превышает 10%. Что же касается показателей A_p , A_m , то их различия с A_o минимальны – средняя разность не превышает 0.36% от Z-отклонения. Различия меж-

ду средними значениями $|A_c-A_o|$ и $|A_m-A_o|$, $|A_c-A_o|$ и $|A_p-A_o|$ выявляются по t -критерию с высокой достоверностью $p=0.000007$. С другой стороны, различия между $|A_m-A_o|$ и $|A_p-A_o|$ отсутствуют на уровне значимости $p=0.46$, тем самым показатели A_p и A_m могут рассматриваться как эквивалентные.

Вычислим аналогичную статистику для разностей трех натуральных показателей относительно A_c :

$$|A_o-A_c|: 0.009 \pm 0.21, 0.101 \pm 0.058;$$

$$|A_m-A_c|: 0.019 \pm 0.26, 0.12 \pm 0.066;$$

$$|A_p-A_c|: 0.004 \pm 0.21, 0.102 \pm 0.033.$$

Нулевые гипотезы отсутствия попарных различий между $|A_o-A_c|$, $|A_m-A_c|$, $|A_p-A_c|$ принимаются с высокой достоверностью $p=0.95, 0.95, 0.96$, тем самым эти три натуральных показателя могут рассматриваться как эквивалентные.

Проведем вычисления для P_c относительно A_o и A_c :

$$|P_c-A_o|: 0.003 \pm 0.54, 0.115 \pm 0.126;$$

$$|P_c-A_c|: 0.02 \pm 0.67, 0.169 \pm 0.157.$$

Таким образом, спектр мощности дает оценки, еще большие относительно вышеприведенных по диапазону изменения и средним значениям как по сравнению с амплитудным спектром, так и по сравнению с огибающей.

Вывод. Три натуральных показателя для средней амплитуды ЭЭГ практически не различаются между собой и могут рассматриваться как эквивалентные, но они высоко значимо отличаются от косвенных оценок по амплитудному спектру. Еще большие величины различий с другими четырьмя показателями имеют место для спектра мощности.

2. Дифференциальные различия

Для более детального численного исследования степени адекватности рассматриваемых показателей могут быть использованы несколько методических подходов. Поскольку выше была показана эквивалентность натуральных оценок, то среди них в дальнейших сравнениях преимущественно будем использовать оценку по огибающей.

Идея одного из подходов состоит в следующем. Если разбить запись ЭЭГ на перекрывающиеся эпохи с небольшим временным сдвигом между собой, то динамика изменения адекватных оценок по эпохам должна быть достаточно гладкой.

Рассмотрим затылочное отведение O_2 , в котором наиболее выражен альфа-ритм, и лобное отведение F_3 с малым представителем альфа-ритма. Разобьем общий временной интервал 32.77 с на 154 эпохи, длительностью 2.048 с со сдвигом 0.2 с между собой. На каждой i -ой эпохе вычислим две оценки средней амплитуды ЭЭГ спектральную A_{c_i} и по огибающей A_{o_i} , $i=1-154$, а для их сравнимости проведем Z -нормализацию каждой из двух оценок по всем 154-м эпохам. Поскольку временной сдвиг между эпохами составляет 10% от их длительности, то временная динамика изменения оценок, адекватных природе ЭЭГ, по эпохам должна быть достаточно гладкой без резких и разнознаковых колебаний.

На рис.4 приведена динамика измерения A_{c_i} и A_{o_i} , выявляющая значительные различия между двумя показателями при более гладкой динамике для A_o и многими эпизодами случайных высокоамплитудных флуктуаций для A_c . Кроме того, при сопоставлении графиков по отведениям O_2 и F_3 выявляется целый ряд эпизодов противоположных тенденций по двум рассматриваемым оценкам, то есть имеют место и различия в топографических соотношениях: оценки A_{c_i} и A_{o_i} в O_2 существенно различны, а в F_3 они одинаковы или же их соотношение меняется на противоположное. Такие топографические различия крайне тревожны, поскольку они могут приводить к различиям в результатах и выводах по межгрупповым сравнениям, оценивающим влияние различных факторов (возраста, пола, профессии, патологии, функционального состояния, мотивации, социальной или профессиональной группы и т.п.).

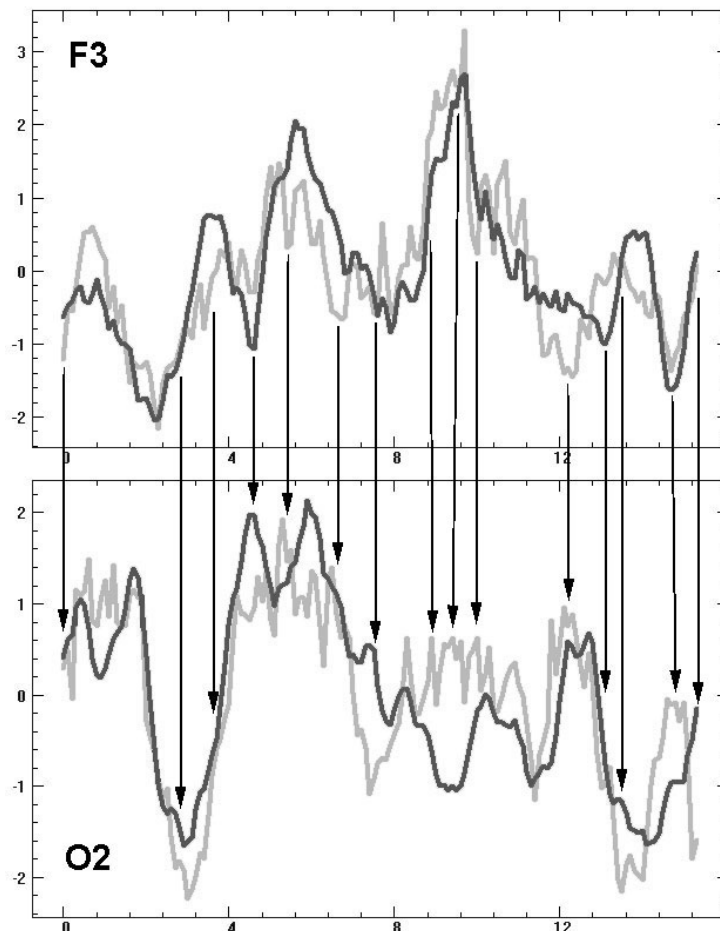


Рис.4. Динамика изменения оценок средней амплитуды ЭЭГ в альфа-диапазоне на 154-х 2-секундных эпохах, со сдвигом 0.2 с друг относительно друга в отведениях F3 и O2, серое – оценки по амплитудному спектру, черное – оценки по огибающей, стрелками отмечены характерные эпизоды топографических различий

Численную оценку степени «гладкости» амплитудных изменений можно произвести по производной или по модулю средних разностей ΔA_i между соседними эпохами $\Delta A_i = |A_{i+1} - A_i|$. Результаты количественного сравнения приведены в табл.1, где указаны отведение, частотный диапазон, показатель A_c или A_o , средняя абсолютная разность $|A_{c_i} - A_{o_i}|$ между показателями каждой эпохи \pm ее стандартное отклонение, среднее \pm стандартное отклонение ΔA_{c_i} , и ΔA_{o_i} , уровень значимости нулевой гипотезы об отсутствии различия средних ΔA_c , и ΔA_o .

Таблица 1. Результаты анализа дифференциальных различий оценок средней амплитуды ЭЭГ по амплитудному спектру и по огибающей

Отведение	Диапазон	Эпоха	Показатель	ABS.разность	Абс.производная	Значимость
F3	альфа	2 с	спектр	0.53 ± 0.11	0.31 ± 0.30	P=0.0001
			огибающая		0.21 ± 0.16	
O2	альфа	2 с	спектр	1.0 ± 0.54	0.30 ± 0.26	p=0.000001
			огибающая		0.16 ± 0.13	
F3	beta1	2 с	спектр	0.45 ± 0.36	0.46 ± 0.43	p=0.000003
			огибающая		0.24 ± 0.21	
O2	альфа	4 с	спектр	0.31 ± 0.24	0.23 ± 0.21	p=0.000005
			огибающая		0.12 ± 0.08	
O2	альфа	8 с	спектр	0.39 ± 0.27	0.20 ± 0.20	p=0.000001
			огибающая		0.08 ± 0.05	

Как видно из табл.1, абсолютная средняя разность между спектральными оценками и оценками по огибающей достигает величин 31÷100% от Z-отклонения, что значительно больше разностей, усредненных по всем отведениям на большой эпохе в предыдущем

разделе. Такая ситуация достаточно тревожна, поскольку исследователь вследствие случайных факторов может провести регистрацию ЭЭГ в неблагоприятной по величине погрешностей спектрального анализа временной период.

Средние значения и стандартные отклонения в 1.5–2 раза ниже для ΔA_0 по сравнению с ΔA_c , и эти различия высоко достоверны при низких уровнях значимости нулевых гипотез. Аналогичное соотношение имеет место и в более высокочастотном β_1 –диапазоне, а также на более протяженных эпохах анализа в 4 и 8 с, сдвигаемых также на 0.2 с. Таким образом, выявленные закономерности стабильны и воспроизводимы не зависимо от отведения, частотного диапазона и длительности эпохи анализа.

Рассмотрим оценки по спектру мощности P_c для альфа–диапазона в отведении O2 для эпохи 2 с, средняя абсолютная разность которых с A_0 достигает 0.54 ± 0.45 , а с A_c составляет 0.29 ± 0.25 . Статистика по производной $\Delta P_c = 0.25 \pm 0.21$ достоверно отличается от ΔA_0 $p = 0.0001$, а по статистической тенденции отличается и от ΔA_c $p = 0.02$.

Вывод. Натуральные оценки средней амплитуды ЭЭГ обеспечивают более гладкую динамику изменения на соседних эпохах, тогда как спектральные амплитудные и мощностные оценки подвержены резким и случайным колебаниям, кроме того, они не совпадают между собой по статистической тенденции.

3. Свойство аддитивности результатов усреднения

Статистическая операция усреднения обладает свойством аддитивности, а именно: среднее значение выборки равно результату усреднения средних значений ее последовательных непересекающихся подвыборок равного размера. Натуральные оценки средней амплитуды ЭЭГ по самому своему определению этим свойством обладают. Выясним наличие этого свойства у спектральных оценок.

Возьмем те же самые отведения F3 и O2 и частотные диапазоны альфа и β_1 . Вычислим A_c и P_c по всему интервалу наблюдения, а затем этот интервал будем разбивать на 2, 4, 8 эпох, вычислим по ним A_{c_i} , P_{c_i} и усредним полученные оценки. Результаты приведены в табл. 2, откуда следует последовательное возрастание оценок A_c и P_c в зависимости от числа и размера усредняемых эпох.

Таблица 2. Изменение спектральных оценок средней амплитуды и мощности ЭЭГ в зависимости от числа и размера усредняемых эпох

Отведение	Диапазон	Показатель	Эпоха 32 с	2 эпохи 16 с	4 эпохи 8 с	8 эпох 4 с
O2	Альфа	амплитуда	3.5	4.96	6.9	10.11
F3	Альфа	амплитуда	2.43	3.4	4.76	6.9
O2	β_1	амплитуда	1.46	2.04	2.82	4.16
F3	β_1	амплитуда	1.07	1.56	2.24	3.21
O2	альфа	мощность	26.46	48.09	81.05	169.8

Такое положение также является достаточно тревожным, поскольку разные исследователи анализируют записи ЭЭГ различной протяженности, поэтому их результаты и выводы могут быть несопоставимы и противоречивы. При этом данное свойство присуще не конкретной частотной характеристике (амплитудному спектру, спектру мощности и др.), а собственно методам ДПФ и БПФ применительно к ЭЭГ–сигналам. При увеличении эпохи анализа и частотного разрешения в спектрах ЭЭГ появляется все больше гармоник с низкой амплитудой, что само по себе не несет физиологического смысла. В результате систематически уменьшаются средние оценки по закону, близкому к линейному (табл. 2).

Вывод. Косвенные спектральные оценки средней амплитуды и мощности ЭЭГ не обладают свойством аддитивности, присущим статистической операции усреднения, получаемые оценки в зависимости от числа и длины усредняемых эпох могут различаться в 3 и более раз.

4. Сравнение на модельных сигналах

Проведем сравнение натуральных и косвенных оценок средней амплитуды ЭЭГ на двух модельных сигналах (рис. 5).

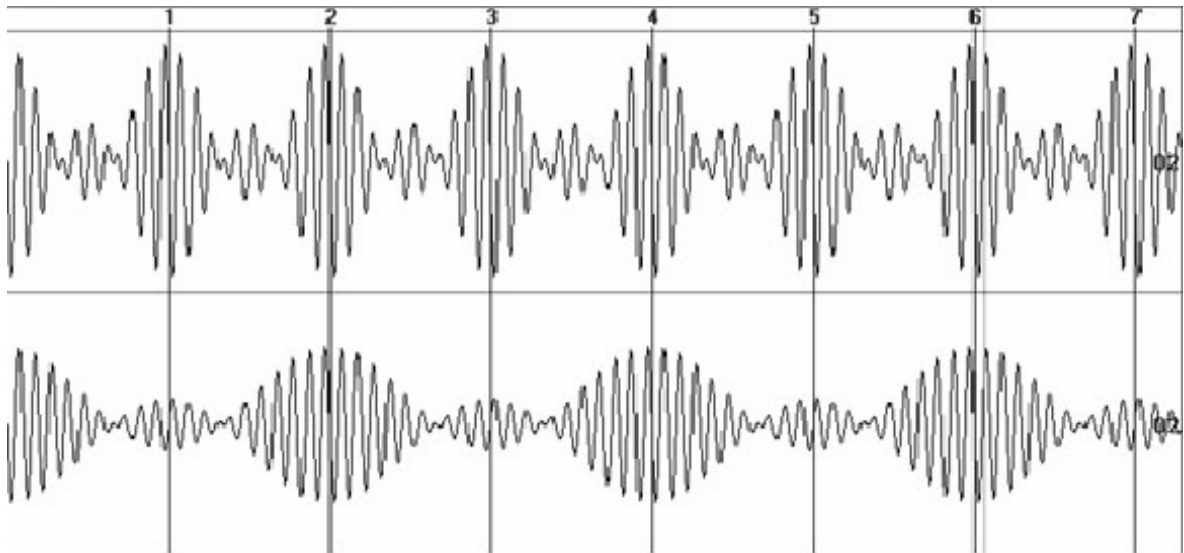


Рис. 5. Два модельных сигнала на эпохе 32 с: 1) сумма 3-х гармоник амплитудой 184 мкВ и частотой 9, 10, 11 Гц; 2) сумма 3-х гармоник амплитудой 122 мкВ и частотой 9.5, 10, 10.5 Гц

Как мы видим, отношение амплитуд исходных суммируемых гармоник двух сигналов составляет $184/122=1.508$. Подобное соотношение имеет место и для средних от диапазона изменения суммарных сигналов: $(548.3+19.2)/2=283.8$ мкВ, $(367.4+6.3)/2=186.8$ мкВ, отношение 1.512. Очевидно, что адекватная оценка средней амплитуды ЭЭГ должна давать такое же соотношение значений:

- A_c : 8.64 и 4.1 мкВ, отношение 2.11;
- P_c : 492.2 и 220.2 мкВ², отношение 2.34;
- A_p : 249.5 и 168.1 мкВ, отношение 1.48;
- A_m : 83.1 и 55.5 мкВ, отношение 1.5;
- A_o : 132.1 и 88.04 мкВ, отношение 1.5.

Вывод. Косвенные спектральные оценки средней амплитуды и мощности ЭЭГ на модельных сигналах с известным соотношением амплитуд дают оценки в $2.11/1.511=1.4$ и $2.34/1.511=1.55$ раза отличающихся от корректного значения, в то время как натуральные показатели демонстрируют правильные соотношения средних амплитуд.

5. Влияние формы спектрального распределения

Как только что показано, натуральные показатели дают корректные оценки амплитуды модельных сигналов. Поэтому, базируясь на них, как на точке отсчета, продолжим сравнение на реальных испытуемых, различающихся формой распределения амплитуд спектральных гармоник (рис. 6).

Как мы видим, два испытуемых сильно различаются формой спектрального распределения. Если у одного из них частотный диапазон преобладающих амплитуд альфа-ритма достаточно узок 9.2–10 Гц, то у другого испытуемого он более широк 8–12 Гц. Результирующие оценки в стандартном альфа-диапазоне 8–13 Гц:

- A_o : 31.3 и 118 мкВ, отношение 0.26;
- A_m : 20 и 75.3 мкВ, отношение 0.267;
- A_p : 60.4 и 227.1 мкВ, отношение 0.266;
- A_c : 4.1 и 11.29 мкВ, отношение 0.36;
- P_c – 25 и 351.3 мкВ², отношение 0.07.

Отметим, что последний результат является, главным образом, следствием резкого (квадратичного) подавления гармоник на боковых частотах у первого испытуемого.

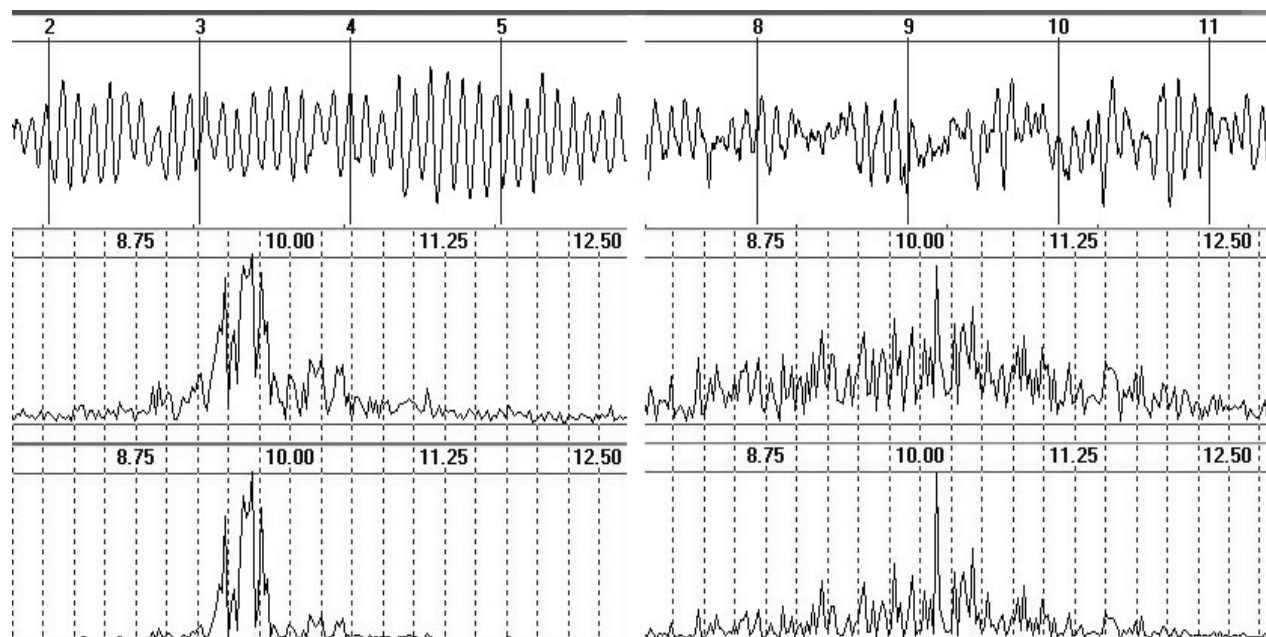


Рис. 6. Два испытуемых с разным распределением спектров в альфа-диапазоне, сверху-вниз: ЭЭГ в отведении О2, амплитудные спектры, спектры мощности

Таким образом, натуральные оценки практически одинаковы по своему соотношению (разность составляет $0.267 - 0.26 = 0.007$ или $0.007/0.26 = 2.7\%$), в то время как спектральные оценки отличаются от них по своему соотношению в $0.36/0.26 = 1.38$ и $0.26/0.07 = 3.7$ раз. Кроме того, сами спектральные оценки демонстрируют между собой еще большее различие по соотношению значений в $0.36/0.07 = 5.1$ раза.

Итак, по сравнению с корректными натуральными оценками оценки по амплитудному спектру сближаются для двух испытуемых, тогда как оценки по спектру мощности сильно расходятся. Такие признаки достаточно тревожны, поскольку при групповых сравнениях они могут приводить к смещением средних значений и стандартных отклонений, препятствуя статистически достоверному выявлению реальных различий или же способствуя выявлению псевдоразличий.

Вывод. Спектральные оценки средней амплитуды и мощности ЭЭГ в зависимости от формы распределения амплитуд спектра могут различаться по своему соотношению для разных испытуемых более чем в 5 раз, в то время как натуральные показатели демонстрируют одинаковое соотношение значений, отличающееся от A_c и P_c в 1.38–3.7 раз.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ситуация с вышеприведенной доказательной базой достаточно специфична, и эта специфика представляется очевидной. Однако, очевидные вещи очень трудно объяснить тем, кому они не очевидны, например, простое утверждение «Солнце встает утром на востоке». Это можно сделать только на наглядном бытовом примере. Так, можно приводить десятки доказательств благочестия человека (в нашем случае речь идет о корректности и допустимости использования спектральных оценок амплитуды ЭЭГ), но для кого-то это все равно не будет убедительным и достаточным. Но стоит доказать всего лишь один криминальный эпизод в отношении кажущегося благочестивым лица, и ему не избежать тюремного срока. Здесь же мы доказали целую серию различных криминальных эпизодов, а это по совокупности уже может подпадать под пожизненную статью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из выводов по результатам 1–5, спектральные оценки средней амплитуды и мощности ЭЭГ в частотных диапазонах обладают рядом существенных и принципиальных погрешностей. Кроме того, сами эти два показателя различаются в своих оценках. Полученные результаты и выводы не позволяют метрологически квалифицировать спектральные оценки средней амплитуды и мощности ЭЭГ как аналитический инстру-

мент, адекватный природе и специфике ЭЭГ–потенциалов. Их использование может приводить к несовместимости результатов, полученных разными исследователями. Поэтому представляется предпочтительным и более надежным использование натуральных оценок средней амплитуды ЭЭГ.

Литература

1. Гнездицкий В.В., Дубинская О.И. О написании клинических заключений по ЭЭГ с учетом международных рекомендаций. *Функциональная диагностика*. 2010, 4: 59–77.
2. Зенков Л.Р. Клиническая электроэнцефалография. Таганрог: Медиком–Лтд. 1996. 258 с.
3. Иванов Л.Б. Прикладная компьютерная электроэнцефалография. М.: НМФ МБН. 2000. 251 с.
4. Иванов Л.Б. Об информативности применения когерентного анализа в клинической электроэнцефалографии. *Журн.высш.нерв.деят.* 2011. 61(4): 499–512.
5. Кулаичев А.П. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика, 4-е изд., перераб. и доп.— М: ФОРУМ — ИНФРА—М. 2007. 640 с.
6. Кулаичев А.П. Об информативности когерентного анализа в исследованиях ЭЭГ. *Журн.высш.нерв.деят.* 2009. 59(6): 757–767.
7. Кулаичев А.П. Метод анализа корреляционной синхронности ЭЭГ и его возможности. *Журн.высш.нерв.деят.* 2011. 61(4): 485–498.
8. Кулаичев А.П. Сравнительный анализ корреляционной синхронности и амплитудных соотношений ЭЭГ в ночном сне. *Журн.высш.нерв.деят.* 2012. 62(1): 108–119.
9. Kulaichev A.P., Gorbachevskaya N.L. Differentiation of Norm and Disorders of Schizophrenic Spectrum by Analysis of EEG Correlation Synchrony. *J.Exp.Integr.Med.* 2013. 3(4):267–278.
10. Кулаичев А.П., Изнак А.Ф., Изнак Е.В., Корнилов В.В., Сорокин С.А. Изменения корреляционной синхронности ЭЭГ при депрессивных расстройствах психогенного типа. *Журн. высш. нервн. деят.* 2014, 64(2):1–9.
11. Ориховская К.Б., Антонова–Рафи Ю.В. Эффект утечки спектра ЭЭГ при использовании фильтра Барлетта и при его отсутствии. *Междунар.научно–исслед.журн.* 2014. (22) 3–2: 42–43.
12. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир. 1982. 428 с.
13. Deuschl G., Eisen A. (Eds.). Recommendation for the practice of clinical neurophysiology: Guidelines of the International Federation of clinical neurophysiology. Elsevier, Amsterdam, 1999. 304 pp.
14. Harris F.J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *IEEE proceedings.* 1978. (66)1:51–83.
15. Malik M., Bigger J. T., Camm A.J., Kleiger R.E., Mallian i A., Moss A.J., Schwartz. P.J. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Eur Heart J.* 1996. 17 (3): 354–381.
16. Kayser J., Tenke C.E. In search of the Rosetta Stone for scalp EEG: Converging on reference–free techniques. *Clin.Neurophysiol.* 2010. 121:1973–1975.
17. Ng S.C., Raveendran P. Comparison of different montages on to EEG classification. *Biomed 06, IFMBE Proceedings 15, 2007.* 365–368.
18. Randall R.B. Frequency Analysis, 3rd edition. Bruel & Kjaer, 1987, 344 pp.
19. Tong S., Thankor N.V. Quantitative EEG analysis methods and clinical applications. Artech House, 2009. 421 p.