

Динамика альфа-активности электроэнцефалографии у человека при триггерной фотостимуляции в контуре интерфейса мозг — компьютер

Каплан А.Я., Жигалов А.Ю.

The dynamic of human EEG alpha-activity in the loop of brain — computer interface during trigger photo stimulation

Kaplan A.Ya., Zhigalov A.Yu.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

© Каплан А.Я., Жигалов А.Ю.

Триггерная фотостимуляция (ТФ), основанная на синхронизации вспышек света с событиями в мозгу, например с волнами альфа-активности электроэнцефалографии (ЭЭГ), широко известна как методический прием для изучения механизмов мозга и как метод неврологической диагностики. В настоящей работе ТФ впервые была использована как элемент интерфейса мозг — компьютер (ИМК), определяющего протокол запуска вспышек света в зависимости от амплитуды альфа-волн ЭЭГ. Было показано, что в ходе ИМК-тренинга наблюдаются специфические перестройки структурной организации альфа-активности в ЭЭГ испытуемого, что свидетельствует об активном освоении мозгом нового канала управления посредством ЭЭГ.

Ключевые слова: электроэнцефалография, альфа-волны, интерфейс мозг — компьютер, внимание, инструментальное обусловливание.

Trigger photo stimulation (TPS), based on synchronization of flashes of light with events in a brain, for example, with waves of alpha activity EEG, is widely known as a methodical approach for studying of mechanisms of a brain and also as a method of neurologic diagnostics. In the present work TPS has been used for the first time as an element of the brain — computer interface (BCI) where the start of light flashes determined by crossing of definite level by amplitude of EEG alpha-waves. It has been shown that specific reorganizations of alpha-waves time distribution during BCI-training. It testifies that brain develops a new control path by means of EEG alpha-patterns.

Key words: electroencephalography, alpha-waves, brain — computer interface, attention, operant conditioning.

УДК 612.821+612.822.3+612.825.1+ 612.825.2+612.825.5

Введение

Широко известно применение ритмической фотостимуляции для изучения резонансных свойств корковых нейронных сетей [3, 7]. В этих исследованиях перестройки электроэнцефалографии (ЭЭГ) рассматриваются как адаптивные реакции мозга на внешнюю ритмическую стимуляцию. Показано, что при некоторых режимах ритмической фотостимуляции эти адаптивные реакции могут иметь диагностическое и терапевтическое значение для некоторых неврологических расстройств [4, 8]. Однако очевидно, что стабильная по частоте внешняя стимуляция фактически навязывает механизмам мозга свой ритм, заставляя их работать

в неестественных режимах. W.G. Walter был первым, кто посредством триггерной схемы синхронизовал запуск фотовспышек с появлением альфа-волн в ЭЭГ [9], предполагая, что подобная индуцируемая волнами ЭЭГ фотостимуляция усилит диагностический потенциал этой методики. В дальнейшем было показано, что эффективность триггерной фотостимуляции (ТФ) в отношении влияния на ритмы ЭЭГ зависит от фазовых отношений между внешними стимулами и альфа-волнами ЭЭГ [1, 2]. В частности, Н.П. Бехтерева и В.В. Зонтов показали, что предъявление вспышек на спаде альфа-волны приводит к активации альфаритма. В то же время этот ритм в значительной мере блокируется, если вспышки света подаются в середи-

ну фазы возрастания альфа-волны. Однако все эти сведения до сих пор остаются недостаточно подтвержденными, возможно, в силу технологических трудностей, связанных с необходимостью точного фазового сопряжения волн ЭЭГ с внешними стимулами в реальном времени. Тем не менее метод ТФ начинает использоваться даже в терапевтической практике [6].

В настоящем исследовании предлагается к рассмотрению совершенно новый аспект метода ТФ. До настоящего времени в опубликованных методиках запуск вспышки ТФ осуществлялся от альфа-волны по факту ее появления над уровнем шума. Таким образом, функциональные системы мозга хоть и получали фотостимулятор «в свое ведение», но реально не могли им управлять, так как согласно методу включение-выключение вспышки света требовало фактически «включения-выключения» альфа-волн. Очевидно, что системные механизмы мозга, ответственные за генерацию ритмов ЭЭГ, не могут до такой степени «отвлекаться» на столь неестественные формы деятельности организма. В то же время, если это управление будет требовать небольших перестроек в ЭЭГ, например увеличения или уменьшения амплитуды альфа-волн, то, возможно, ресурсов пластичности мозга окажется достаточно, чтобы осуществить модуляцию такого раздражителя, как прерывистая фотостимуляция. В этом случае будет получена интересная для психофизиологического исследования модель ИМК, реализующая неосознаваемое биоуправление посредством ЭЭГ. Возможность такого биоуправления была показана ранее на модели ИМК, управляющего RGB-драйвером компьютерного монитора [5].

Цель исследования — разработка схемы ИМК для произвольного управления дискретными сенсорными воздействиями посредством альфа-волн ЭЭГ, а также выявление и изучение признаков перестройки ЭЭГ, свидетельствующих о вовлечении мозга в контур ИМК.

Материал и методы

В исследовании приняли участие девять практически здоровых испытуемых-добровольцев обоего пола, студентов московских вузов, подписавших информированное согласие. Испытуемые располагались в удобном кресле в затемненном боксе. ЭЭГ регистрировалась в отведениях согласно стандарту 10—20 по Джасперу в полосе от 0,5 до 45 Гц с последующей

оцифровкой с частотой 256 отсчетов в секунду. Посредством цифровой фильтрации и динамического анализа в реальном времени в отведении О2 записи ЭЭГ выделялись пики альфа-волн, измерялись амплитуды этих пиков и при превышении определенного порога посылались сигналы для включения вспышки. Пороговым уровнем выбиралось среднее значение пиков альфа-волн в предшествующем отрезке записи ЭЭГ на фоне спокойного бодрствования испытуемого с закрытыми глазами.

Пороговая ТФ осуществлялась вспышками длительностью 20 мс при закрытых глазах посредством вмонтированных в очки белых светодиодов. Интенсивность вспышек устанавливалась на 20% выше комфортной интенсивности, выбираемой испытуемым. В один экспериментальный день исследование состояло из трех сессий по 20 мин стимуляции. Каждый испытуемый принимал участие в двух исследованиях с интервалом 1—2 дня. В основном исследовании фотостимуляция проводилась в реальном времени от сверхпороговых альфа-волн ЭЭГ. В контрольном исследовании проводилась такая же стимуляция, но с использованием записи ЭЭГ, взятой из предыдущего исследования, т.е. не в реальном режиме времени.

В рамках последующего анализа возможных перестроек ЭЭГ на фоне управляемой фотостимуляции в настоящем исследовании оценивались фазическая структура альфа-активности ЭЭГ: число пачек альфа-ритма за 2 мин записи, средние значения амплитуды и периода альфа-волн в пачке, а также среднее число волн в пачке. Пачки альфа-ритма выделялись автоматически согласно следующим критериям: не менее четырех альфа-волн (8—12 Гц) подряд с амплитудой выше установленного порога. Для оценки статистической значимости полученных результатов применяли критерий Манна—Уитни.

Результаты и обсуждение

Прежде всего следует отметить, что в ходе пороговой ТФ в среднем по всей группе испытуемых при включении контура ИМК наблюдалось постепенное уменьшение числа вспышек за три сессии по 20 мин (75% от уровня первых 5 мин ТФ, $p < 0,01$). Это, очевидно, должно было свидетельствовать об уменьшении амплитуды альфа-волн в ЭЭГ, так как каждая вспышка запускалась только от сверхпороговых волн. Однако динамическая оценка спектра мощности ЭЭГ

в полосе альфа-активности показала постепенное увеличение абсолютных значений этой активности в ходе ТФ, что не отмечалось в контроле при выключенном контуре ИМК (рис. 1,а). Указанные противоречия свидетельствовали скорее о каких-то структурных перестройках альфа-активности в ходе пороговой ТФ, чем об изменении ее амплитудных характеристик.

Анализ изучавшихся структурных характеристик ЭЭГ показал, что явную тенденцию к изменению в течение пороговой ТФ в контуре ИМК имели только две характеристики: средняя амплитуда и средний период альфа-волн в пачках (рис. 2), которые увеличивались в ходе тренинга. При этом общее число пачек сверхпороговых альфа-волн в записи ЭЭГ и среднее число волн в пачках оставалось неизменным (рис. 2).

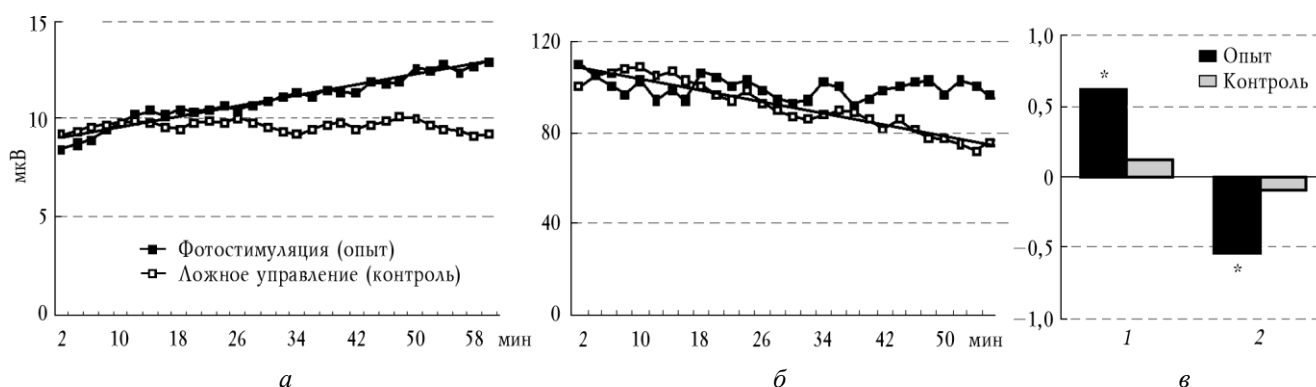


Рис. 1. Типичные кривые изменений спектра мощности ЭЭГ в полосе альфа-активности (а) и суммарного числа одиночных или двойных сверхпороговых альфа-волн (б) в течение трех периодов (по 20 мин) управляемой от ЭЭГ фотостимуляции или ложного управления для одного испытуемого. Прямой линией на каждой диаграмме показана линейная регрессия тренд для опытных данных. Среднее значение коэффициентов регрессии (в) по всем испытуемым для изменений спектра мощности в альфа-полосе (1) и числа одиночных или двойных сверхпороговых альфа-волн (2) в опыте (темные столбцы) и в контроле (светлые столбцы); * — статистически значимые различия контроль — опыт ($p < 0,001$ по критерию Манна—Уитни)

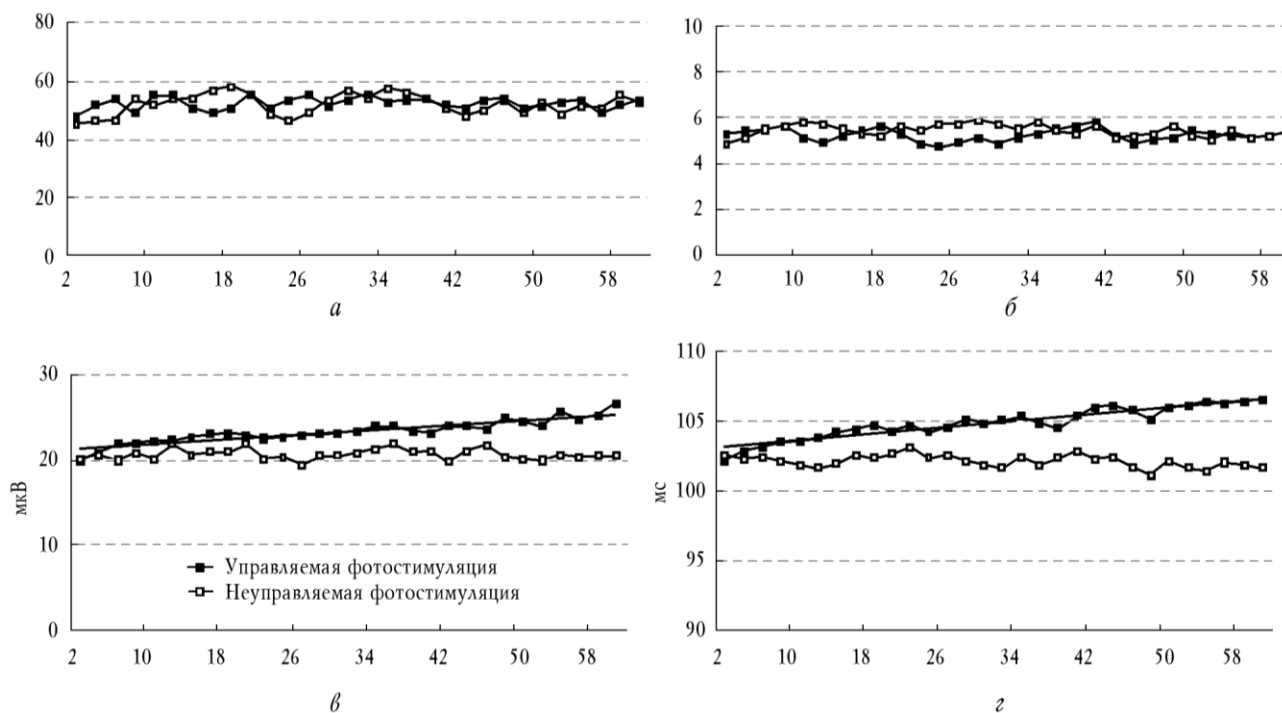


Рис. 2. Типичный пример динамики структурных показателей фазической альфа-активности ЭЭГ при управляемой от ЭЭГ фотостимуляции в среднем выражении для всех испытуемых. Прямой линией показаны линейные регрессии для соответствующих кривых. Структурные показатели: a — общее количество пачек; b — общее число волн в пачках; v — средняя амплитуда волн в пачках; z — средний период волн в пачках

Усредненные коэффициенты линейной аппроксимации динамики альфа-активности ЭЭГ в ходе фотостимуляции свидетельствуют о наличии устойчивой и статистически значимой тенденции к увеличению амплитуды волн в пачках альфа-активности при пороговой ТФ. При этом суммарное число сверхпороговых волн в пачках (рис. 3) не изменялось. Почему, в таком случае, в ходе пороговой ТФ уменьшается количество вспышек света?

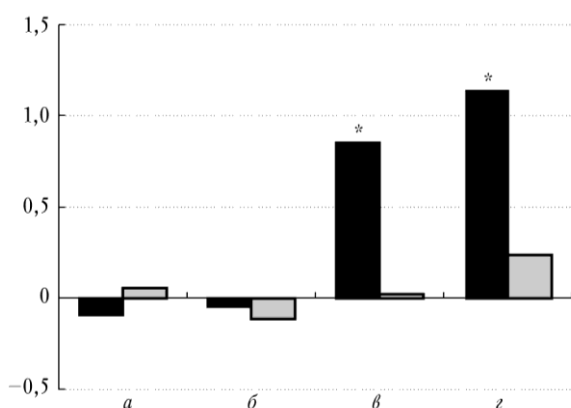


Рис. 3. Усредненные по всем испытуемым значения коэффициентов линейной регрессии для функций изменения структурных характеристик альфа-активности ЭЭГ в течение управляемой и неуправляемой фотостимуляции: a — общее количество пачек; b — общее число волн в пачках; v — средняя амплитуда волн в пачках; z — средний период волн в пачках; * — статистически значимые ($p < 0,001$) различия для коэффициентов регрессии динамики соответствующих структурных показателей альфа-активности ЭЭГ

Как уже указывалось выше, критерием для детектирования пачки альфа-волн является появление трех и более волн подряд. Таким образом, одиночные и двойные сверхпороговые волны не принимались в общий расчет, хотя тоже запускали вспышки. Что происходит с этими волнами по ходу пороговой ТФ? На типичной диаграмме для одного из испытуемых видно, что число одиночных и двойных сверхпороговых волн по ходу ТФ уменьшается (см. рис. 1,б). Это подтверждается и при усреднении коэффициентов линейной регрессии процесса по всем испытуемым (см. рис. 1,в), среднее значение этого коэффициента равняется 1,1, что резко отличается ($p < 0,001$) от приближающегося к нулю коэффициента регрессии при выключении ИМК (см. рис. 1,в).

Заключение

Таким образом, включение ЭЭГ в контур ИМК, управляющий фотостимулятором, приводит к структурным перестройкам альфа-активности этой ЭЭГ. Основной характеристикой перестройки является уменьшение числа одиночных и двойных альфа-волн при сохранности количества пачек из трех и более альфа-волн. Структура альфа-активности ЭЭГ приобретает более фазический ЭЭГ и вместе с этим — более регулярный характер: высокоамплитудные альфа-волны все более следуют друг за другом группами.

Что является целевым фактором для функциональных систем мозга при таком управлении фотостимулятором, в настоящее время остается не ясным. Можно только предположить, что отмеченное повышение амплитуды альфа-волн в ходе ИМК-тренинга на фоне элиминации одиночных и двойных альфа-волн приводит к более гарантированному их включению в пачечную структуру. В целом это повышает регулярность зрительного сенсорного воздействия: вспышки света все более следуют не поодиночке, а целыми очередями. В этом возможно, и заключается адаптивное значение перестройки ЭЭГ, связанной с управлением фотостимулятором. В целом, обнаруженная структурная реорганизация ЭЭГ в ходе пороговой ТФ свидетельствует о том, что предложенная схема коммутации между параметрами ЭЭГ и источником дискретных сенсорных воздействий в качестве внешнего объекта управления является моделью интерфейса мозг — компьютер, в данном контексте опосредующего адаптивное управление сенсорным потоком. Применение этой модели для инструментального обусловливания различных паттернов ЭЭГ позволит изучить возможность использования этих паттернов в качестве управляющих сигналов в ИМК различного назначения.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 09-04-12094-офи_м и РГНФ 09-06-00671а.

Литература

1. Бехтерева Н.П., Зонтов В.В. К вопросу об электрофизиологической характеристике нервных процессов // Физиол. журн. СССР. 1961. № 47. С. 1463—1472.

2. Гетманенко О.В., Белов Д.Р., Кануников И.Е. Фазовые взаимоотношения электроэнцефалограммы человека // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2004. № 90. С. 431.
3. Федотчев А.И., Бондарь А.Т. Неспецифические механизмы адаптации ЦНС к прерывистым раздражениям, спектральная структура ЭЭГ и оптимальные параметры ритмических сенсорных воздействий // Успехи физиол. наук. 1996. № 27. С. 44—60.
4. Федотчев А.И. Стресс, его последствия для человека и современные нелекарственные подходы к их устранению // Успехи физиол. наук. Т. 40, № 1. 2009. С. 77—91.
5. Kaplan A.Y., Lim J.J., Jin K.S. et al. Unconscious operant conditioning in the paradigm of brain — computer interface based on color perception // Int. J. Neurosci. 2005. № 115. P. 781—802.
6. Kumano H., Horie H., Shidara T. et al. Treatment of a depressive disorder patients with EEG-driven photic stimulation // Biofeedback and self-regulation. 1996. № 6. P. 323—334.
7. Lazarev V.V., Pontes A., Azevedo L.C. EEG photic driving: Right-hemisphere reactivity deficit in childhood autism // A pilot study International Journal of Psychophysiology. 2009. № 71. P. 177—183.
8. Teplan M., Krakovská A., Štolc S. Short-term effects of audio-visual stimulation on EEG // Measurement Science Review. 2006. № 6. P. 67.
9. Walter W.G., Dovey V.J. and Shipton H. Analysis of electrical responses of the human cortex to photic stimulation // Nature. 1946. № 158. P. 540—541.

Поступила в редакцию 01.12.2009 г.

Утверждена к печати 22.12.2009 г.

Сведения об авторах

А.Я. Каплан — д-р биол. наук, в.н.с. профессор кафедры физиологии человека и животных биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва).

А.Ю. Жигалов — аспирант кафедры физиологии человека и животных биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва).

Для корреспонденции

Каплан Александр Яковлевич, akaplan@mail.ru

Уважаемые читатели!

Предлагаем вам подписаться на наш журнал с любого номера

В 2010 году стоимость подписки на полугодие — 1500 рублей, на год — 3000 рублей.

Как оформить подписку на журнал «Бюллетень сибирской медицины»

На почте во всех отделениях связи

Подписной индекс **46319** в каталоге агентства Роспечати «Газеты и журналы 2010, 1-е и 2-е полугодие».

В редакции

- Без почтовых наценок.
- С любого месяца.
- Со своего рабочего места.

По телефону (382-2) 51-57-08; факс (382-2) 51-53-15.

На сайте <http://bulletin.tomsk.ru>

Если вы являетесь автором публикаций или хотите приобрести наш журнал, он будет выслан вам наложенным платежом при заполнении заявки. Стоимость приобретения одного номера 350 рублей.

Заявку на приобретение журнала нужно выслать по адресу редакции:

634050, г. Томск, пр. Ленина, 107,

Научно-медицинская библиотека Сибирского государственного медицинского университета,

редакция журнала «Бюллетень сибирской медицины»,

тел. (8-3822) 51-57-08. E-mail: bulletin@bulletin.tomsk.ru