

На правах рукописи



ЖИГАЛОВ Александр Юрьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АЛЬФА-АКТИВНОСТИ ЭЭГ
ЧЕЛОВЕКА В КОНТУРЕ ИНТЕРФЕЙСА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР**

03.00.13 - Физиология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре физиологии человека и животных Биологического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (заведующий кафедрой – д.б.н., профессор А.А.Каменский).

Научный руководитель:

доктор биологических наук

профессор А.Я.Каплан

Официальные оппоненты:

доктор биологических наук

профессор А.И.Федотчев

кандидат биологических наук

доцент Д.А.Напалков

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Институт Высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН.

Защита состоится 23 ноября 2009 г. в 15.30 на заседании диссертационного совета Д.501.001.93 при Биологическом факультете МГУ имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские Горы, МГУ, д. 1, строение 12, Биологический факультет МГУ, аудитория М-1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Биологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан 22 октября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук



Б.А. Умарова

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Альфа-активность ЭЭГ человека была впервые продемонстрирована широкой общественности английскими исследователями Эдгаром Эдрианом (Adrian) и Брайаном Мэттьюсом (Matthews) в 1934 году на собрании Физиологического общества в Кембридже. С тех пор и до самого последнего времени этот тип активности ЭЭГ, отличающийся высокой ритмичностью в диапазоне 8-13 колебаний в секунду, динамичностью в широком диапазоне амплитудных значений и пространственно-временной структурированностью, остается предметом интенсивных исследований для нейрофизиологов всего мира. К настоящему времени результаты этих исследований обобщены в многочисленных обзорных статьях и книжных изданиях (Изнак и др., 1971, Sauseng et al., 2008; Lopes da Silva, 1991; Basar et al., 1997; Klimesch, 1999; Shaw, 2006).

Однако только в самое последнее время открылся совершенно новый аспект изучения этого типа активности ЭЭГ – возможность использования паттернов ЭЭГ в качестве управляющего сигнала в интерфейсах мозг-компьютер (ИМК) (Каплан, 2008; Allison et al., 2007; Kaplan et al., 2005; Wolpaw et al., 2002). Согласно определению (Wolpaw et al., 2002) ИМК – это технология, позволяющая осуществлять коммуникацию между мозгом и внешней средой без посредства нервов и мышц, только на основе регистрации ЭЭГ. Основой этому направлению послужила находка Джо Камия (Kamiya, 1971), свидетельствующая о том, что человек способен научиться вызывать изменения в собственной ЭЭГ, если он видит эту ЭЭГ, например, на экране монитора. Это открытие дало начало целому направлению в психофизиологии и поведенческой медицине, известному, например, в США как EEG biofeedback, а в русскоязычной литературе - как

«биологическая обратная связь по ЭЭГ» (ЭЭГ БОС-тренинг) (Mulholland et al., 1977; Штарк, 2002).

Технология ЭЭГ БОС-тренинга оказалась полезной для целей саморегуляции организма. Например, в альфа-тренинге испытуемые обучались повышать альфа-активность ЭЭГ, что способствовало достижению релаксационных состояний. Очевидно, однако, что сигналы обратной связи от ЭЭГ замыкаются на регуляцию внутреннего состояния организма. В тоже время всего 10-15 лет назад исследователи задумались о том что, если человек способен волевым путем производить изменения в ЭЭГ, то, будучи зарегистрированными аппаратно, эти изменения могут служить человеку своего рода азбукой Морзе для коммуникации или для управления внешними исполнительными устройствами без помощи моторных систем организма. Намерения человека, таким образом, могут транслироваться во внешнюю среду с помощью ИМК. Как бы ни фантастично выглядела эта идея в прагматическом аспекте, но для целей медицины она имела вполне реальное приложение: для пациентов, полностью или почти полностью парализованных в связи с заболеваниями или травмами, которым актуален любой «немышечный» способ коммуникации с внешней средой.

Однако, по мере развития практических аспектов ИМК, в какой-то момент стала очевидной общетеоретическая значимость этого направления для психофизиологии и когнитологии (Kaplan et al., 2005; Wolpaw, 2002). Действительно, в технологиях ИМК «вечный вопрос» электроэнцефалографии о том, какие же функции головного мозга отражаются в ритмах его корковых электрических потенциалов, получил новую парадигму для экспериментальной разработки. В технологии ИМК можно тестировать те или иные паттерны ЭЭГ на их способность принимать на себя функции команд для управления внешними исполнительными устройствами. Тем самым можно было оценить,

насколько те или иные ритмы ЭЭГ в тех или иных корковых локализациях отражают работу мозговых механизмов, «занятых» во внутренних автоматических регуляциях, или, наоборот, «доступных» для включения в произвольное управление. Кроме того, парадигма ИМК позволяет изучать такие пластические функции мозга, которые до сих пор не были доступны для экспериментальной разработки, а именно, насколько мозг способен формировать «функциональные органы» по А.А.Ухтомскому для манипулирования во внешней среде без посредства моторики.

Принципиальным в технологии ИМК является придание тому или иному паттерну ЭЭГ определенной функции, например, функции включения/выключения внешнего электронного устройства. В этом заключается одна из самых больших трудностей в технологии ИМК. Действительно, исходно паттерны ЭЭГ не имеют никакой функции для организма, так как являются всего лишь отражением или эпифеноменом работы мозговых механизмов. Поэтому далеко не каждый ритм или паттерн ЭЭГ может быть вовлечен в какую-то функциональную систему, тем более такую «неестественную» систему как контур ИМК.

В связи с открытием этой новой сферы исследований в психофизиологии и когнитологии становится все более **актуальной разработкой** новых экспериментальных парадигм и теоретических подходов для изучения механизмов приобретения новых навыков и перестройки ритмов ЭЭГ при работе человека в контуре ИМК. В частности, одна из парадигм заключается в «подключении» отдельных волн ЭЭГ и их паттернов к управлению, например, фотостимулятором. Ранее всесторонне изучались эффекты ритмической (Regan, 1972; Федотчев и др., 2001), и триггерной (Бехтерева и др., 1974) фотостимуляции на ЭЭГ, однако сама ЭЭГ в этих парадигмах не могла служить динамическим сигналом для управления фотостимулятором. В

нашем исследовании создана экспериментальная парадигма интерфейса мозг-компьютер на основе управляемой сенсорной стимуляции.

Цель исследования. Целью настоящего исследования было определить, насколько механизмы мозга, определяющие альфа-активность ЭЭГ, могут быть вовлечены в процессы формирования навыка управления внешними объектами посредством модификации этой активности.

В рамках этой цели была сформулирована **рабочая гипотеза** о том, что существуют паттерны альфа-активности ЭЭГ и схема их оперантного обусловливания, при которых становится возможной выработка автоматизированного навыка управления внешними объектами посредством изменения ЭЭГ.

Задачи исследования. Для проверки рабочей гипотезы были поставлены следующие задачи исследования:

1. Разработать экспериментальную модель для тестирования различных компонентов ЭЭГ в контуре ИМК.
2. На основе разработанной модели изучить динамику альфа-активности ЭЭГ как управляющего сигнала в контуре ИМК.
3. Изучить возможность автоматизированного (неосознаваемого) изменения ЭЭГ при оперантном обусловливании паттернов альфа-активности.

Научная новизна и практическая значимость. Принципиально новым в настоящем исследовании было то, что одной из задач было не создание какого-то конкретного ИМК, а разработка экспериментальной модели для тестирования самой возможности использования тех или иных паттернов ЭЭГ для разных схем формирования контура ИМК.

Новым является экспериментально доказанный факт, что наиболее эффективными схемами автоматизированного оперантного обусловливания ЭЭГ являются схемы с предварительной установкой испытуемого на релаксацию в процессе тренировки. Здесь следует

отметить, что в отличие от других исследований, в настоящей работе несмотря на предварительную установку, испытуемые не знали характер связи ЭЭГ с успешностью выполнения теста и потому само оперантное обусловливание осуществлялось автоматически, а состояние испытуемого было лишь фоном.

Наконец, в настоящей работе впервые изучалась собственно динамика альфа-активности ЭЭГ в процессе оперантного обусловливания, что позволило определить какие именно структурные перестройки в ЭЭГ происходят во время оперантного обусловливания.

Научно-теоретическое и практическое значение. Проведенный в работе теоретический и экспериментальный анализ нейрофизиологических механизмов, лежащих в основе формирования управляющих ЭЭГ-сигналов в контуре интерфейс мозг-компьютер, привел к разработке новой парадигмы исследования в этом направлении, основанной на автоматизированных процессах инструментального обусловливания отдельных волн и паттернов альфа-активности ЭЭГ, а также позволил выяснить некоторые динамические характеристики этого процесса, на примере ЭЭГ-управления фоно-, фото- и электростимуляторами, в качестве генераторов сенсорных воздействий. В частности, было показано, что в условиях управления фотостимулятором от альфа-волн в ЭЭГ происходят скорее структурные, чем амплитудные перестройки этой формы активности.

Полученные экспериментальные и теоретические результаты могут быть использованы как для дальнейшего продвижения на пути понимания исследования механизмов адаптации мозга к биотехническим каналам управления, так и для создания собственно интерфейсных комплексов мозг-компьютер.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработана экспериментальная модель, которая позволяет реализовать процесс выработки у человека автоматизированного навыка управления внешними объектами посредством изменения характеристик ЭЭГ.
2. Ритмическая фотостимуляция с частотой индивидуального альфа-ритма без контура обратной связи не влияет на структурные характеристики альфа-активности ЭЭГ.
3. Прерывистая фотостимуляция с управлением стимулами от альфа-волн ЭЭГ и их паттернов вызывает структурные перестройки в ЭЭГ, свидетельствующие о включении автоматизированных механизмов формирования адаптивного управления.
4. Паттерны альфа-активности ЭЭГ поддаются инструментальному обусловливанию, что может служить основой для формирования на их основе командных операторов в контурах ИМК.

Апробация материалов диссертации. Материалы диссертации в виде научных докладов были представлены на 14-ом Всемирном конгрессе по психофизиологии «The Olympics of the brain», Санкт-Петербург, 2009; XV Международной конференции по нейрокибернетике, Ростов-на-Дону, 2009; Всероссийской научно-практической конференции «Количественная ЭЭГ и нейротерапия», Санкт-Петербург, 2009; III Международной конференции по когнитивным наукам, Москва, 2008; Всероссийской научно-технической конференции «Наука-производство-технологии-экология», Киров, 2006. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, из них 4 в реферируемых журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из следующих разделов: введение, обзор литературы, методика, 3 раздела результатов, с обсуждением после каждого раздела, выводы, список литературы. Материал изложен на 133 страницах машинописного текста,

содержит 35 рисунков, 29 таблиц. Список литературы включает 139 источников.

Список сокращений

ИМК – интерфейс мозг-компьютер

НСС – неуправляемая световая стимуляция

ПЗС – предупреждающий звуковой стимул

УСС – управляемая световая стимуляция

ЭКС – электрокожная стимуляция

ЭЭГ – электроэнцефалограмма

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Участники исследований. В исследованиях приняли участие студенты обоего пола, подписавших Информированное согласие, согласованное с Этическим комитетом Биологического факультета МГУ. Общий ход исследования выполнялся в соответствии с принципами Хельсинского соглашения о правах человека. Всего было выполнено более 120 полномасштабных исследований, в которых приняли участие 63 человека (с учетом повторных исследований) в возрасте от 19 до 23 лет.

Исследования проводились в затемненном и относительно звукоизолированном помещении. Испытуемому давалась основная инструкция, сидеть спокойно-расслабленно с закрытыми глазами и, по возможности, не использовать какие-либо стратегии в отношении восприятия подаваемых ему стимулов.

Регистрация ЭЭГ. Регистрация ЭЭГ выполнялась в программе CONAN (Кулаичев, 2002) в восьми стандартных отведениях (O1, O2, P3, P4, C3, C4, F3, F4) согласно международной системе 10/20 (Jasper, 1958). Частота оцифровки устанавливалась равной 512 Гц, для того чтобы определять положение пика альфа волн с точностью ± 1 мс. Перед оцифровкой сигнал ЭЭГ фильтровался в полосе от 0.5 до 45 Гц. Помимо

ЭЭГ регистрировалась электрокардиограмма для оценки функционального состояния испытуемых.

Аппаратно-программное обеспечение. Принципы построения систем ИМК предполагают наличие ЭЭГ-сигнала управления и внешнего объекта управления. В качестве последнего в настоящей работе выбран источник световой прерывистой стимуляции. Для формирования управляющих сигналов было разработано специализированное программно-аппаратное обеспечение, реализующее алгоритмы адаптивной триггерной стимуляции в реальном времени с точными временными характеристиками предъявления стимулов и возможностью предъявления мультимодальной стимуляции в различных комбинациях. Аппаратно-программный комплекс разработан на основе платы *ADSP-BF533 EZ-KIT Lite*, в состав которой входит сигнальный процессор, позволяющий обеспечивать быстрое выполнение сложных алгоритмов обработки сигналов, простоту реконфигурации программного кода, централизованное управление периферийными устройствами. Среди периферийных модулей наиболее значимыми являются таймеры, которые позволяют достичь точных временных соотношений между стимулами и внутри самих стимулов, и аудио-кодек *AD1836*, который позволяет генерировать звуковые стимулы заданной формы и длительности. Во всех исследованиях схема экспериментальной установки оставалась постоянной, изменялись лишь алгоритмы адаптивной стимуляции, реализованные в стимуляторе.

Экспериментальная процедура. ЭЭГ, регистрируемая в правом затылочном отведении, после усиления и фильтрации обрабатывалась на микропроцессоре, в частности, выполнялся ее анализ и формировался управляющий сигнал. Этот сигнал передавался на исполнительное устройство, которое обеспечивало включение\выключение отдельных

стимулов или их последовательностей, подаваемых в виде световой, звуковой или электрокожной стимуляции.

На первом этапе для всех алгоритмов адаптивной стимуляции выполнялась фильтрация и выделение пиков альфа-волн. Для фильтрации ЭЭГ в частотном диапазоне от 8 до 13 Гц применялся цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ), реализованный на основе быстрого преобразования Фурье (Лайонс, 2007). В качестве управляющего сигнала в экспериментах с адаптивной стимуляцией использовалась амплитуда пиков альфа-волн относительно заданного порога дискриминации. Для корректного детектирования пиков волн проверялись две характеристики: минимальное расстояние между волнами и минимальная амплитуда волн. Подробное описание частных парадигм исследования дано в каждом разделе изложения результатов.

Статистический анализ полученных данных проводился в зависимости от конкретного исследования согласно критериям, Стьюдента, Вилкоксона, Манна-Уитни и Фишера, а так же в отдельных случаях с помощью численного моделирования.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований изложены в трех главах, включающих собственно экспериментальные материалы и их обсуждение. В первой главе изложены данные о влиянии пассивной (без обратной связи) ритмической стимуляции на спектральные и структурные характеристики ЭЭГ, которые необходимы были для сравнения с аналогичным тестированием, но с включением обратной связи от альфа-волн в контуре интерфейса мозг-компьютер. Эти результаты изложены во второй главе, где обсуждается, в том числе и вопрос о силе мотивационного подкрепления при выработке инструментальных реакций ЭЭГ. В этой связи выполнены исследования с управляемой от паттернов альфа-волн

ЭЭГ электрокожной стимуляцией, результаты которых описаны в третьей главе.

3.1. Исследование с ритмической световой стимуляцией

Цель данной серии экспериментов заключалась в исследовании эффектов, возникающих при ритмической световой стимуляции. В частности предполагалось проверить общую тенденцию изменения спектральных показателей альфа-ритма при длительной стимуляции (20 минут), изменение структурных особенностей ЭЭГ на фоне стимуляции, динамику изменения спектральных показателей альфа-ритма после окончания стимуляции, а также влияние характеристик световых стимулов на ЭЭГ. Кроме того, полученные результаты рассматривались в качестве контроля для исследования с управляемой световой стимуляцией.

Эксперимент состоял из одной 24 минутной сессии. Перед началом эксперимента мы определяли индивидуальную частоту альфа-ритма (ИЧА) при закрытых глазах в состоянии спокойного бодрствования для каждого испытуемого. Частоту фотостимуляции определяли как ИЧА минус 0.66 Гц, чтобы одновременно наблюдать эффекты «навязывания» частоты стимуляции, оптимально проявляющиеся до указанного сдвига частот (Pigeau and Frame, 1992). Яркость стимулов выбиралась на основе субъективных ощущений испытуемых как «комфортная». В течение 20 минут выполняли регистрацию ЭЭГ на фоне ритмических стимулов и после окончания стимуляции, в течение 4 минут, продолжали регистрацию ЭЭГ. Мы использовали световые стимулы со следующими характеристиками: яркость – 15 ± 5 мКд, длительность – 10 мс, форма – прямоугольный импульс с заполнением.

Динамика амплитудных и спектральных показателей ЭЭГ

Альфа ритм характеризуется несколькими параметрами, но наиболее важными являются его амплитуда и частота. Для всех испытуемых были построены графики изменения во времени амплитуды и частоты спектрального пика в отведении О2. Изменения амплитуды и частоты спектрального пика достаточно сильно скоррелированы, поэтому имеет смысл рассматривать один из этих показателей. По динамике амплитуды спектрального пика всех испытуемых можно разделить на 2 группы. В первой группе (8 человек) наблюдались незначительные изменения амплитуды спектрального пика, во второй группе (4 человека) наблюдалось сильное уменьшение амплитуды спектрального пика после 4 минуты и небольшое увеличение к концу записи (рис. 1).

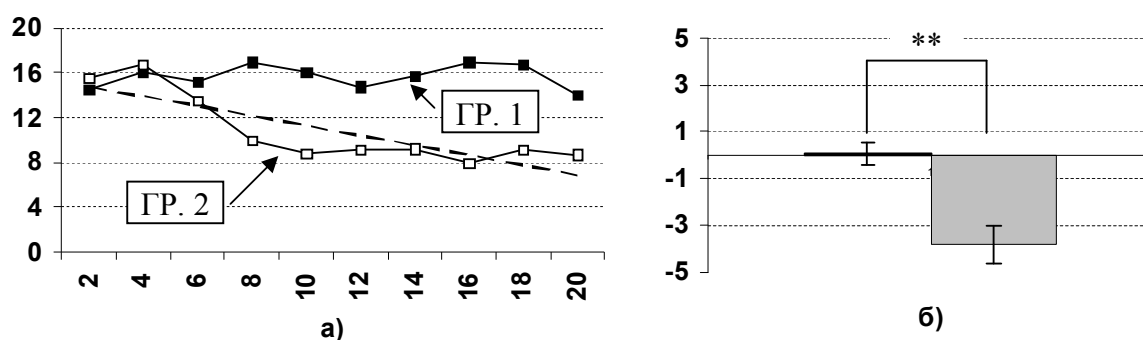


Рис.1. Типичные кривые изменения амплитуды спектрального пика альфа-активности в течение 20 минут фотостимуляции (а) и усредненные значения коэффициентов регрессии амплитуды спектрального пика альфа-активности (б). Обозначения: а) по горизонтали – время в минутах, по вертикали – амплитуда спектрального пика в $\mu\text{В}/\text{Гц}^{1/2}$; ГР. 1 – группа испытуемых со стабильной амплитудой спектрального пика; ГР. 2 – группа испытуемых с постепенно снижающейся амплитудой спектрального пика; пунктиром показана линия регрессии для группы 2. б) по вертикали значения коэффициентов регрессии, усредненных для групп 1 (черный столбик) и 2 (серый столбик). ** – $p < 0.01$ (критерий Манна-Уитни).

Динамика структурных показателей ЭЭГ

Структурные показатели ЭЭГ были основаны на оценке временной или пачечной организации альфа-волн. В качестве показателей структурности альфа-активности рассматривались: общее количество пачек (вспышек) альфа-ритма, среднее число волн в пачке, средняя амплитуда волн в пачке и средний период между волнами в пачке. Для анализа были взяты данные испытуемых первой группы с выраженным альфа-ритмом. Было обнаружено, что динамика показателей структурности альфа-активности у этих испытуемых в течение 20 минут фотостимуляции несколько варьирует, но в целом не демонстрирует каких-либо трендов ни по одному из показателей.

Интерес представляли коррелятивные связи между динамикой амплитуды спектрального пика альфа-активности и различными показателями ее структурированности во времени. Очевидно, что изменение амплитуды спектрального пика может достигаться как за счет изменения общей амплитуды волн, так и за счет изменения частоты появления кратковременных вспышек альфа-активности. Было показано, что коэффициент корреляции между изменениями во времени амплитуды спектрального пика и величины средней амплитудой пиков волн в пачках для шести из восьми испытуемых первой группы высоко статистически значимы и имеют значения выше 0.64. Это свидетельствует о том, что наибольший вклад в изменение амплитуды спектрального пика вносит изменение амплитуды в пачках, а не изменение количества пачек или количества волн в пачках.

Таким образом, можно заключить, что в течение длительной (20 мин) ритмической фотостимуляции, с частотой близкой к частоте альфа-активности, примерно у 60 процентов испытуемых не происходит изменений спектральных характеристик, а у остальных испытуемых наблюдается резкое уменьшение амплитуды спектрального пика. При этом

временная динамика амплитуды спектрального пика сильно коррелирует с динамикой средней амплитуды альфа-активности в пачках, но не с количеством самих пачек. Это говорит о том, что при фотостимуляции скорее меняются характеристики альфа-активности внутри пачек альфа-волн, чем в распределении и количестве этих пачек во времени.

3.2. Исследование с управляемой световой стимуляцией

Цель данной серии экспериментов заключалась в том, чтобы изучить динамику кортикальной активности при условии ее включения в управление фотостимуляцией. Ранее исследователями изучались эффекты так называемой триггерной стимуляции. Однако в этих исследованиях каждая выделенная из шума альфа-волна становилась триггерным сигналом для запуска вспышек. В этой парадигме у мозга не было возможности управлять фотостимулятором кроме как полностью исключить генерацию альфа-волн. В предложенной в настоящем исследовании парадигме вспышки могли запускать только такие альфа-волны, амплитуда которых превышала некоторый пороговый уровень, обычно равный среднему значению пиковых амплитуд альфа-волн. Таким образом, у мозга появлялась возможность небольшими изменениями амплитуды альфа-волн, т.е. без ущерба для фоновой деятельности, управлять фотостимулятором. Вопрос заключался в том, как поведет себя электрическая активность мозга в условиях, когда мозг включен в управление внешним объектом.

Каждый эксперимент состоял из трех сессий по 20 минут с одноминутным перерывом между сессиями. Каждый испытуемый принимал участие в двух экспериментах с интервалом 1 – 2 дня. В первом эксперименте использовалась управляемая световая стимуляция (УСС), где управляющий сигнал формировался непосредственно из альфа-волн ЭЭГ в реальном масштабе времени. Во втором эксперименте в качестве

управляющего сигнала использовалась запись ЭЭГ, полученная в первом эксперименте, т.е. текущие изменения в ЭЭГ не оказывали влияния на последовательность стимулов – неуправляемая световая стимуляция (НСС).

Сигнал управления световыми стимулами формировался по следующему принципу: если амплитуда пика альфа-волны превышает пороговое значения, то возникает световая вспышка (рис. 2). Пороговое значение устанавливалось на уровне среднего значения амплитуд пиков альфа-волн, измеренное в фоновой записи.

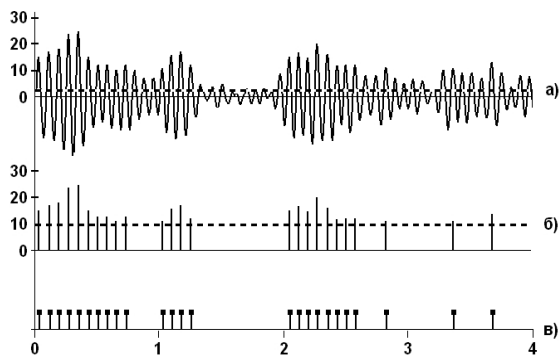


Рис.2. Принцип формирования управляющего сигнала. По горизонтали – время в секундах, по вертикали – амплитуда в микровольтах. Обозначения: а) фильтрованная ЭЭГ с порогом по шуму, б) значение амплитуды пиков альфа-волн и порог по уровню, в) сигнал управления световыми стимулами.

Для оценки изменения различных показателей во времени мы анализировали записи ЭЭГ трех последовательных сессий по 20 минут как одну 60 минутную запись. Рассмотрим поведение альфа-активности на фоне управляемой фотостимуляции в отражении различных показателей.

Временная динамика спектральных показателей

Поскольку управляющим сигналом в контуре ИМК были отдельные альфа-волны, то для оценки их изменений мы использовали спектральные показатели, вычисленные в альфа-диапазоне. Наиболее типичные изменения приведены на рисунке 3а.

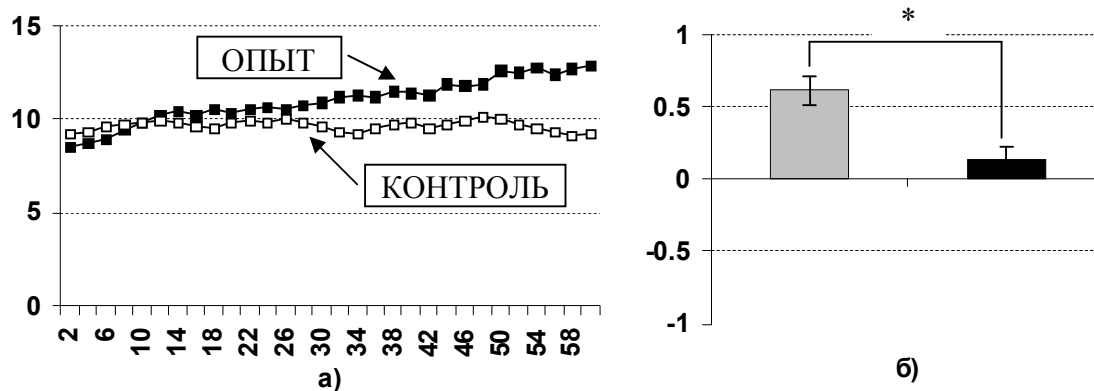


Рис.3. Типичные кривые изменения амплитуды спектрального пика в эксперименте с УСС (опыт) и НСС (контроль) (а); усредненные значения коэффициентов регрессии амплитуды спектрального пика для экспериментов с УСС (серый столбик) и НСС (черный столбик) (б). Обозначения: * – $p < 0.05$ (критерий Манна-Уитни).

Для получения сводных оценок динамики показателей альфа-активности вычислялись коэффициенты линейной регрессии (рис. 3б).

Как видно, в ходе управляемой стимуляции в среднем по группе испытуемых наблюдается статистически значимое увеличение амплитуды пиков альфа-волн, что не обнаруживалось при неуправляемой стимуляции (рис. 3б).

Показатели асимметрии ЭЭГ

Парадигма с управляемой фотостимуляцией предполагает, что в качестве управляющего используется только один канал регистрации ЭЭГ. В этой связи представляет интерес насколько синхронны изменения альфа-активности в гомологичных каналах регистрации O1 и O2, один из которых (O2) является управляющим для фотостимулятора. Вычисление коэффициентов корреляции между средним значением амплитуды альфа-активности ЭЭГ двух каналов показало, что для всех испытуемых они в большинстве своем превышают уровень 0.9, как при управляемой, так и при неуправляемой стимуляции. Это, вероятно, связано с влиянием стимулов, которые оказывают синхронизирующее воздействие.

Показатели структурности ЭЭГ

Ранее было показано, что для нескольких испытуемых в экспериментах с УСС имеет место динамика изменения амплитуды спектрального пика во времени. Как известно, спектр является интегральной характеристикой, то есть, в нем объединены сразу несколько показателей. Для более детальной оценки составляющих спектра рассмотрены регрессионные коэффициенты функций изменения структурных показателей альфа-активности во времени в сравнении парадигм с управляемой и неуправляемой стимуляцией (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты регрессии общего количества пачек ($KP_{KП}$), среднего количества волн в пачках (KP_{CB}), средней амплитуды пиков волн в пачках (KP_{CA}), среднего периода волн в пачках ($KP_{CП}$), в канале O2 для экспериментов с УСС и НСС. Обозначения: * – $p < 0.05$ (по критерию Фишера).

№ исп.		S03	S09	S12	S16	S20	S06	S08	S17	S19
$KP_{KП}$	УСС	0.19	-0.09	0.15	-0.34	-0.14	-0.17	-0.25	0.05	0.42
	НСС	0.24	0.03	0.15	-0.23	-0.23	0.26	-0.47	0.31	0.27
KP_{CB}	УСС	-0.11	-0.11	0.54	0.04	-0.35	0.13	-0.10	0.21	-0.63
	НСС	-0.01	-0.18	-0.18	-0.28	-0.11	-0.24	-0.20	0.65	-0.49
KP_{CA}	УСС	0.44	1.07*	1.21*	0.12	0.35	0.22	0.33	0.83*	2.60*
	НСС	0.21	-0.01	-0.36	0.27	-0.46	0.13	-0.14	-0.23	0.49
$KP_{CП}$	УСС	0.13	1.59*	1.26*	0.33	0.40	0.18	0.45	1.59*	2.73*
	НСС	-0.06	0.36	-0.04	0.47	0.32	0.30	-0.24	0.11	0.38

Как видно, показатели $KP_{KП}$ и KP_{CB} для большинства испытуемых имеют сравнимые значения в экспериментах с УСС и НСС, однако показатели KP_{CA} и $KP_{CП}$ в этих экспериментах имеют значимые различия, при этом показатели KP_{CA} и $KP_{CП}$ превышают значения, полученные при ритмической стимуляции. Это может свидетельствовать об установлении мозгом взаимосвязи между появлением световых вспышек и присутствием альфа-волн. Для 4 из 9 испытуемых отмечено увеличение средней амплитуды и периодов волн в пачках в экспериментах с УСС, чего не было в экспериментах с НСС и исследовании с ритмической стимуляцией.

Таким образом, средняя амплитуда волн внутри пачек является показателем, по которому можно судить о наличии признаков обучения, связанным с управлением фотостимулятором. Усредненные показатели структурности, показанные на рисунке 4, также подтверждают это. Видно, что наибольшие отличия наблюдаются для средней амплитуды и среднего периода в пачках.

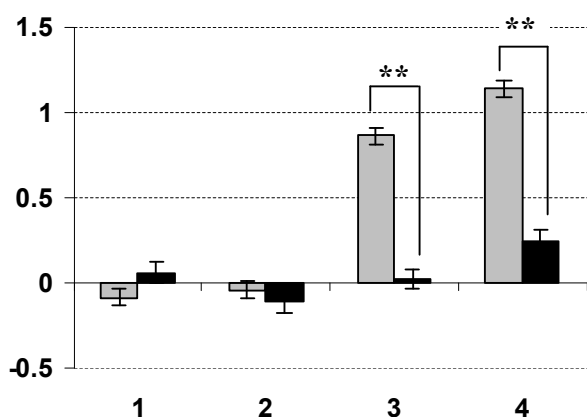


Рис. 4. Усредненные значения коэффициентов регрессии общего количество пачек (1), среднего числа волн в пачках (2), средней амплитуды волн в пачках (3), среднего периода волн в пачках (4) в экспериментах с УСС (серый столбик) и НСС (черный столбик).

** – $p < 0.01$ (критерий Манна-Уитни).

Динамика изменения количества одиночных и двойных волн

Ранее мы рассмотрели структурные показатели альфа-активности, где в качестве «операциональной» единицы использовалась пачка. Поскольку минимальное количество волн в пачке равно 3, то остается не ясным как изменяется во время стимуляции количество одиночных и двойных альфа-волн? Этот показатель достаточно вариативен между испытуемыми, однако наиболее типичная динамика показана на рисунке 5.

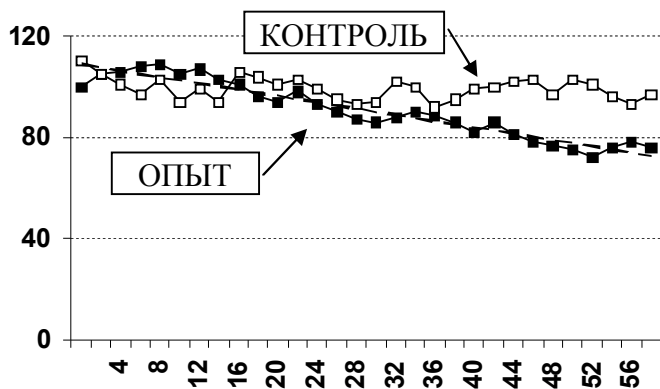


Рис. 5. Типичные кривые изменения количества одиночных и двойных альфа-волн в экспериментах с УСС (опыт) и НСС (контроль). По горизонтали – время в минутах; линия тренда показана пунктиром.

Для оценки тренда в данных мы вычисляли коэффициент регрессии (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты регрессии количества одиночных и двойных волн в экспериментах с УСС и НСС. Обозначения: * – $p < 0.05$ (по критерию Фишера).

№ исп.	S03	S09	S12	S16	S20	S06	S08	S17	S19
УСС	0.26	-0.63*	-0.73*	-0.37	-0.22	-0.12	0.06	-0.55*	-0.66*
НСС	0.21	0.17	-0.13	0.32	-0.29	-0.23	-0.12	0.03	-0.16

Из таблицы 2 видно, что для 4 из 9 испытуемых коэффициент регрессии является значимым. Поскольку он имеет отрицательное значение, то можно сказать, при управляемой стимуляции для этих испытуемых происходит уменьшение количества одиночных и двойных волн.

Таким образом, оценка динамики альфа-активности ЭЭГ в показателях амплитуды альфа-волн, а также их пачечной структуры свидетельствует о том, что примерно у половины испытуемых отмечено обучение управлению фотостимулятором.

3.3. Исследование с управляемыми аффективными раздражителями

В предыдущей серии исследований определялась динамика кортикальной электрической активности в парадигме ее включения в управление фотостимуляцией. Как показано в разделе 3.2, в ходе исследования мы не отметили ярко выраженной и однонаправленной динамики ЭЭГ в условиях управляемой фотостимуляции. Возможно, это и есть реальный объем участия ЭЭГ в управляемом эксперименте. Однако, наиболее вероятным нам представляется то, что вспышки света в биологическом смысле не обладали для организма достаточно значимой мотивационной силой того или иного знака, т.е. не являлись существенным подкреплением изменений амплитуды альфа-волн в ту или

иную сторону. Между тем известно, что выработка как условных, так и инструментальных реакций в первую очередь зависит от подкрепляющей силы безусловных раздражителей. В данном случае в качестве безусловного раздражителя выступали вспышки света, которые, например, при отрицательном знаке своего воздействия на организм приводили бы к выработке инструментальной реакции уменьшения амплитуды альфа-волн ниже порога включения фотостимулятора.

В парадигме настоящей серии предпринята попытка увеличения подкрепляющей силы раздражителей, управляемых от ЭЭГ. Новая парадигма строилась таким образом, что сначала предъявлялся звуковой стимул, который предупреждал испытуемого о том, что через 2 секунды он получит легкое электрокожное раздражение в области запястья, выступавшее в качестве аверзивного раздражения. Силу раздражения исходно подбирал сам испытуемый, ориентируясь на то, чтобы это раздражение было четко неприятным. При этом электрокожное раздражение могло быть отменено, если в эти 2 секунды появится определенный паттерн альфа-волн. Таким образом, этот паттерн альфа-волн становился управляющим сигналом для выключения электрокожной стимуляции. Предупреждающие звуковые стимулы (ПЗС) предъявлялись со случайным интервалом от 8 до 12 секунд.

Каждый эксперимент состоял из шести сессий по 8 минут с одноминутным перерывом между сессиями. Первая и последняя сессия были контрольными и в них не использовались аффективные стимулы.

Управляющий паттерн альфа-активности определялся как последовательность альфа-волн, удовлетворяющая трем условиям:

- 1) период между последовательными волнами находится в диапазоне от 70 до 130 мс
- 2) количество последовательных волн находится в диапазоне от 5 до 10

- 3) амплитуда каждой волны превышает пороговое значение, равное среднему значению пиков альфа-волн измеренное в течение первых 2 минут записи ЭЭГ.

Усреднение альфа-активности ЭЭГ относительно предъявления ПЗС

Этот тип анализа данных для каждого испытуемого в отдельности был направлен на выявление систематических сдвигов в альфа-активности в период между моментами предъявления ПЗС и ЭКС для случаев с управляемой от ЭЭГ ЭКС стимуляцией (опыт) и без таковой (контроль). Из рисунка видно, что после предъявления стимула в пробах с аверзивной стимуляцией происходило увеличение альфа-активности. Различия «опыт – контроль» оценивалась по критерию Вилкоксона (табл. 3).

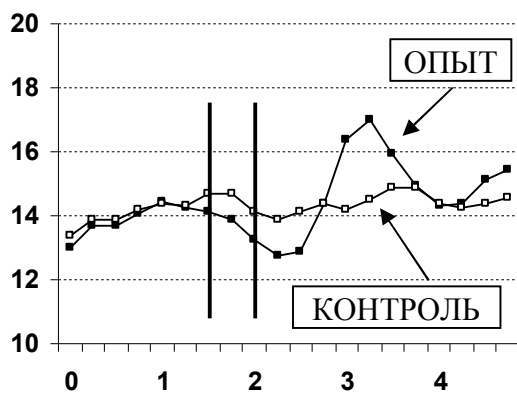


Рис. 6. Типичные кривые усреднения альфа-активности относительно ПЗС. По горизонтали – время в секундах, по вертикали – амплитуда в микровольтах. Обозначения: эксперименты с ЭКС (линии с черными точками) и без таковой (линии с белыми точками); момент начала и окончания предъявления ПЗС – вертикальные линии.

В таблице 3 представлены сводные результаты статистического оценивания различий выраженности альфа-активности в период после ПЗС в условиях управления электрокожной стимуляцией и без таковой в разных сериях исследования, в которых в целом приняло участие 32 испытуемых.

Таблица 3

Значения критерия Вилкоксона усредненных значений кривых в экспериментах с аверзивной стимуляцией и контрольными экспериментами. Обозначения: 1-4 – серии тестирований соответственно со слабой ЭКС (1), сильной (2,3) ЭКС, звуковым эмоциогенным подкреплением (4); с установкой на релаксацию (3,4) и без таковой (1,2); * – $p < 0.05$ (по критерию Вилкоксона).

Поряд. № исп.	1	2	3	4	5	6	7	8
Серия 1	104*	126*	162	144	152	148	153	147
Серия 2	151	148	157	117*	157	124*	139	111*
Серия 3	140	140	122*	108*	105*	141	116*	118*
Серия 4	111*	141	138	145	138	168	143	117*

Как видно, для 12 из 32 испытуемых показана статистически значимая перестройка альфа-активности, выражающаяся в увеличении частоты появления управляющего паттерна альфа-волн именно в условиях замкнутой петли ИМК, когда появление этих паттернов отключает электрокожную стимуляцию (ЭКС).

Динамика относительного числа отмен электрокожной стимуляции

Отмеченная выше перестройка альфа-активности в управляющем канале ЭЭГ свидетельствует о включении процесса инструментального обусловливания, т.е. ассоциирования определенных паттернов ЭЭГ с отменой электрокожной стимуляции. Обычно этот процесс отображают кривыми обучения, показывающими изменение отношения числа удачных попыток к общему числу попыток в тестовом временном окне в ходе процесса тренировки. В нашем анализе успешными попытками были отмены аверзивной стимуляции. Относительное число отмен ЭКС оценивалось за каждые две минуты 32-минутного тренинга.

Для каждого из 32 испытуемых этот анализ проводился отдельно. Было показано, что характер кривых обучения достаточно индивидуален, но по линейным аппроксимациям этих кривых может быть классифицирован в три группы. Примерно у половины испытуемых (15 из

32) не было отмечено какой-либо динамики кривой обучения в ходе тренинга. Для 7 человек было показано высоко эффективное обучение: увеличение числа отмен ЭКС примерно в 1.5 раза по сравнению с исходным уровнем. Эти испытуемые продемонстрировали выработку инструментальной реакции альфа-активности ЭЭГ, направленной на отмену ЭКС. Еще для 6 испытуемых регрессионные прямые, которыми аппроксимировали функции обучения, также имели коэффициенты регрессии статистически значимо отличавшиеся от нуля, однако в среднем увеличение числа отмен для этих испытуемых не превосходило 25% от начального уровня. Для 4 испытуемых, кривая обучения демонстрировала отрицательное научение, когда количество отмен ЭКС снижалось. Формально, можно полагать, что для этих испытуемых ЭКС оказалось положительным аффективным подкреплением. Таким образом, все вместе испытуемые, показавшие то или иное обучение управлению стимулятором посредством ЭЭГ, составили больше половины (17 из 32) общего числа испытуемых.

ВЫВОДЫ

1. Разработана экспериментальная модель интерфейса мозг-компьютер на основе инструментального обусловливания паттернов альфа-активности ЭЭГ сенсорными фото-, аудио и электрокожными стимулами.
2. Ритмическая фотостимуляция в частотном диапазоне альфа-ритма, не включенная в контур интерфейса мозг-компьютер, не влияет на структурные особенности альфа-активности ЭЭГ.
3. Прерывистая фотостимуляция, управляемая альфа-волнами, вызывает динамические структурные перестройки в ЭЭГ, что свидетельствует об интеграции мозговых механизмов в контур интерфейса мозг-компьютер.

4. На примере адаптивного контроля электрокожной стимуляции показано, что кратковременные паттерны альфа-активности ЭЭГ могут быть инструментально обусловлены в качестве управляющих сигналов в контуре интерфейса мозг-компьютер.
5. В процессе инструментального обусловливания паттернов альфа-активности в одном из гомологичных каналов ЭЭГ билатеральная асимметрия альфа-активности ЭЭГ не изменяется, что свидетельствует о целостном, а не только в управляющем канале, включении механизмов мозга в адаптивные перестройки.
6. При инструментальном обусловливании альфа-активности ЭЭГ не обнаружено зависимости между эффективностью обучения и индивидуальными особенностями ЭЭГ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В реферируемых журналах:

1. Каплан А.Я., **Жигалов А.Ю.** Динамика альфа-активности ЭЭГ у человека при триггерной фотостимуляции в контуре интерфейса мозг-компьютер (ИМК) // Бюллетень СО РАМН. – 2010. – № 2. (в печати).
2. **Zhigalov A.Yu.**, Kaplan A.Ya. Operant conditioning of alpha patterns in human EEG using affective reinforcing stimulation // *Psychophysiology*. – 2009. – V.46. – № 1. – P. 85.
3. Kaplan A.Ya., Levichkina E.V., **Zhigalov A.Yu.** Interhemispheric EEG asymmetries of ERP old/new effects in visual perception of simple nonverbal stimuli // *Psychophysiology*. – 2009. – V.46. – № 1. – P. 45.
4. **Zhigalov A.Yu.**, Pianova A.A., Kaplan A.Ya. Statistical structure of EEG alpha-waves in adolescence with schizophrenic spectrum disorders and age-match normals // *International Journal of Psychophysiology*. – 2008. – V. 69. – № 3. – P. 256.

В материалах конференций:

1. **Жигалов А.Ю.**, Каплан А.Я. Адаптивная фотостимуляция как экспериментальная модель асинхронного интерфейса «мозг-компьютер» // Матер. XV Международная конференция по нейрокибернетике. Ростов-на-Дону, 2009. – С. 11.
2. **Жигалов А.Ю.**, Каплан А.Я. Оперантное обусловливание паттернов альфа-активности ЭЭГ при аффективном подкреплении у человека // Матер. Всероссийской научно-практической конференции "Количественная ЭЭГ и нейротерапия". Санкт-Петербург, 2009. – С. 22.
3. Каплан А.Я., **Жигалов А.Ю.** Адаптивная фотостимуляция на базе интерфейса "мозг-компьютер" // Матер. Всероссийской научно-практической конференции "Количественная ЭЭГ и нейротерапия". Санкт-Петербург, 2007. – С. 129-130.
4. **Жигалов А.Ю.** Моделирование алгоритма подавления узкополосных помех в системах DS-CDMA при помощи метода анализа независимых // Матер. Всероссийской научно-технической конференции «Наука-производство-технологии-экология». Киров, 2006. – Т. 1. – С. 269-272.