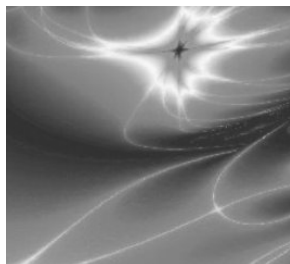


2 Электроэнцефалография

Введение



Мозг является наиболее сложным и пока еще малоизученным объектом исследования в современном естествознании. Его возможности интенсивно изучаются на протяжении длительного времени, о чем свидетельствуют, например, работы таких ученых, как Бехтерев, Сеченов и другие. Известно, что мозг генерирует электрические импульсы, распространяющиеся по нервным волокнам. Однако эти токи являются очень слабыми, и их невозможно зафиксировать без усилителей. Напряжение токов головного мозга составляет порядка 10^{-5} Вольта. Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) представляет собой запись суммарной электрической активности клеток полушарий мозга. Это неинвазивный метод исследования. Процедура записи ЭЭГ абсолютно безвредна, поэтому ее можно повторять как угодно часто, хотя это бессмысленно, так как ЭЭГ меняется медленно.

Впервые электроэнцефалограмма была зарегистрирована у животных В.В. Правдич-Неминским в 1913 г. с помощью струнного гальванометра. Позднее Г. Бергер получил ЭЭГ человека с использованием электронной усилительной техники. Он установил, что электрические характеристики соответствующих сигналов зависят от состояния испытуемого. Открытие Бергера привело к созданию электроэнцефалографического метода, в основе которого лежит регистрация, анализ и интерпретация биотоков мозга животных и человека. Отметим, что запись биотоков вовсе не является регистрацией мыслей, поскольку мышление представляет собой психический процесс. Мысли передаются на расстояние через слова, звуки или письменные обозначения, а не через электрические потенциалы.

Электрическую активность всего мозга можно представить как шум огромной толпы, миллиарды членов которой разговаривают одновременно. Не вызывает сомнений, что голос отдельного нейрона важен в этом общем шуме – ведь именно нервная клетка участвует в анализе и переработке информации. А вот относительно всей многоголосицы ясности нет и сегодня. Суммарная электрическая активность мозга записывается с помощью электроэнцефалографа, который регистрирует колебания электрических потенциалов в нескольких частотных диапазонах. Все вместе они формируют электроэнцефалограмму (ЭЭГ), анализируя которую, нейрофизиологи пытаются объяснить, как работает мозг.

Запись электроэнцефалограммы

Регистрация ЭЭГ представляет собой непрерывную запись величин разности потенциалов между двумя точками мозга. При этом используют специальные электроды, обладающие малым переходным сопротивлением, которые прикладываются к поверхности кожи на голове. С целью увеличения проводимости кожи на контактную поверхность электродов наносят гель. На голове электроды закрепляют с помощью специальных эластичных шлемов. На лобные, височные, теменные и затылочные области полушарий закрепляются парные электроды. Электрод заземления обычно помещается на запястье испытуемого.

Можно выделить два метода регистрации (отведения) ЭЭГ:

- *биполярный* – два отводящих электрода накладывают на области, соответствующие коре больших полушарий;
- *монопольный* – один электрод прикладывают к области коры, а второй на мочку уха.

Электроэнцефалография является совершенно безболезненной процедурой, которая длится приблизительно 20-30 минут. В некоторый момент в течение испытания человека могут попросить дышать глубоко, открывать и закрывать глаза, смотреть на вспыхнувший свет в течение нескольких секунд, чтобы просле-

дить, как изменяется запись при этих пробах. При регистрации электроэнцефалограммы испытуемый не должен испытывать чувство голода, так как это может вызвать изменения сигналов. Результаты ЭЭГ зависят от возраста человека. Электроэнцефалограмма может дать информацию только об электрической активности мозга в период регистрации.

Различают несколько видов электроэнцефалографии, отмеченные на рисунке 2.1:

1. Некоторые изменения ЭЭГ выражены ночью сильнее чем в дневное время. В этих случаях важно изучение сигналов электрической активности именно в стадии сна.
2. В диагностических целях процедура регистрации ЭЭГ может сопровождаться видеозаписью состояния испытуемого.
3. Иногда проводится компьютерный анализ сигналов электрической активности клеток головного мозга и дается графическое представление его результатов (картирование мозга).
4. Электроэнцефалография, сопровождаемая световыми и звуковыми проявлениями, получила название ЭЭГ с биообратной связью. Ее отличие от других видов заключается, прежде всего, в том, что испытуемый видит свою ЭЭГ и сам же пробует воздействовать на нее.

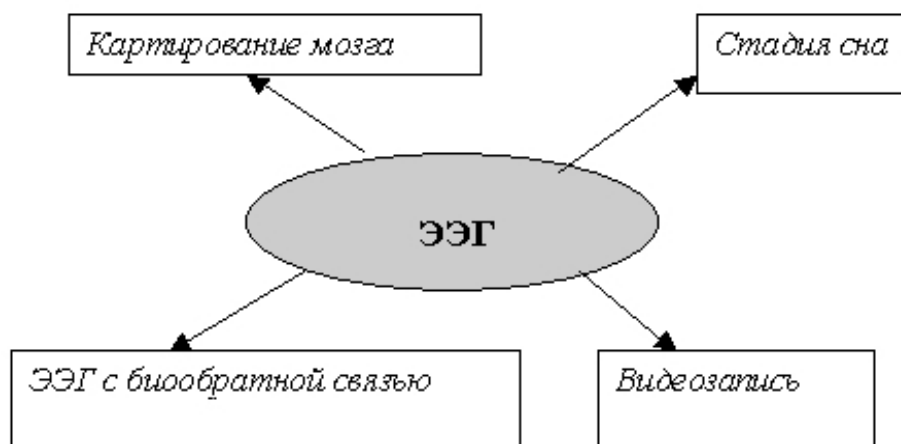


Рис. 2.1. Виды электроэнцефалографии.

Ритмы ЭЭГ

Характер ЭЭГ определяется функциональным состоянием нервной ткани, а также протекающими в ней обменными процессами. Нарушение кровоснабжения приводит к подавлению биоэлектрической активности коры больших полушарий. Важной особенностью ЭЭГ является ее спонтанный характер и автономность. Электрическая активность мозга может быть зафиксирована не только в период бодрствования, но и во время сна. Даже при глубокой коме и наркозе наблюдается особая характерная картина ритмических процессов (волн ЭЭГ). В электроэнцефалографии различают четыре основных диапазона: альфа-, бета-, гамма- и тета-волны (рис. 2.2).

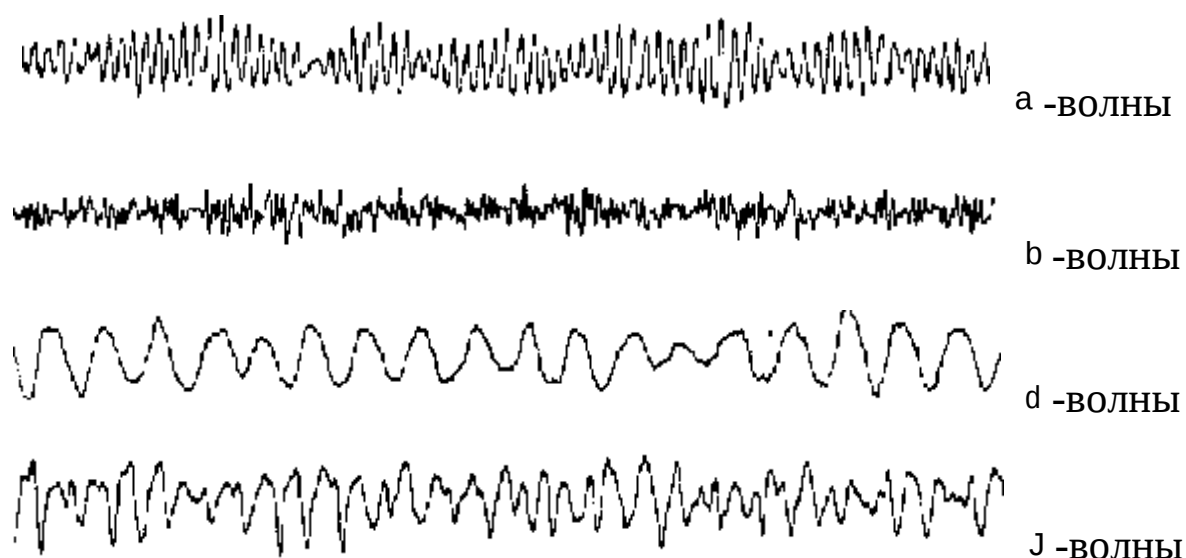


Рис. 2.2. Волновые процессы ЭЭГ.

Существование характерных ритмических процессов определяется спонтанной электрической активностью мозга, которая обусловлена суммарной активностью отдельных нейронов. Ритмы электроэнцефалограммы отличаются друг от друга по длительности, амплитуде и форме. Основные компоненты ЭЭГ здорового человека приведены в таблице 2.1. Разбиение на группы является более или менее произвольным, оно не соответствует каким-либо физиологическим категориям.

Ритм	Частота, Гц	Состояние человека, соответствующее данному ритму
a	8-13	Покой (глаза закрыты)
b	14-30	Интенсивная умственная или физическая работа
d	1-4	Глубокий сон
j	4-8	Поверхностный сон

Таблица 2.1. Основные компоненты электроэнцефалограммы.

Альфа-ритм электроэнцефалограммы представляет собой ритмические колебания электрического потенциала с частотой в пределах 8-13 Гц и средней амплитудой 30-70 мкВ. Для временной зависимости соответствующих колебаний характерна амплитудная модуляция. Альфа-ритм выражен преимущественно в задних отделах мозга, при закрытых глазах, в состоянии относительного покоя, при максимально возможном расслаблении мышц. Он блокируется при световом раздражении, усилении внимания и умственных нагрузках. При проведении детального анализа структуры ЭЭГ иногда различают быстрые и медленные варианты альфа-ритма. Четко выраженные колебания на соответствующей частоте проявляются в теменно-затылочной области в возрасте 4-5 лет. В 13-15 лет формируется устойчивый альфа-ритм, выраженный во всех областях.

Бета-ритм – ритм ЭЭГ в диапазоне от 14 до 30 Гц с амплитудой 5-30 мкВ, присущий состоянию активного бодрствования. Сильнее всего он выражен в лобных областях, но при различных видах интенсивной деятельности резко усиливается и распространяется на другие области мозга. Амплитуда бета-ритма возрастает в ситуации внимания, при умственном напряжении или эмоциональном возбуждении.

Дельта-активность – компонента ЭЭГ, представляющая собой колебания электрического потенциала с частотой от 1 до 4 Гц

с различными периодами, распределенными в случайном порядке. Дельта-ритм у здоровых людей обычно регистрируется во время глубокого сна. Низкоамплитудные (20–30 мкВ) колебания в этом диапазоне могут быть идентифицированы в сигнале ЭЭГ в состоянии покоя при некоторых формах стресса и длительной умственной работе.

Тета-ритм – ритм ЭЭГ на частоте 4-8 Гц с амплитудой 10-100 мкВ. Он проявляется во время неглубокого сна. Наиболее ярко соответствующая динамика выражена у детей. Эмоциональное напряжение и интенсивная умственная работа приводят к увеличению спектральной плотности мощности тета-волн и увеличению пространственной синхронизации между ними.

Среди ритмических процессов ЭЭГ принято выделять быстрые волны (имеющая меньшую длительность по сравнению с диапазоном альфа-ритма) и медленные волны (длительность которых превышает 125 мс). Набор ритмов, идентифицируемых в структуре электроэнцефалограммы, меняется в зависимости от психологического состояния: при активации усиливаются высокочастотные ритмы, а в состоянии покоя усиливаются низкочастотные ритмы.

Существуют также и совсем медленные ритмы, имеющие периоды порядка нескольких часов. Они фиксируются при длительной регистрации сигналов электрической активности мозга. Наряду с ритмическими процессами, отмеченными в таблице 2.1, дополнительно выделяют:

- Гамма-ритм – колебания разности потенциалов с частотой 25-35 Гц и амплитудой до 25 мкВ. Обычно гамма-ритм маскируется более медленными волнами. Он наблюдается при решении задач, требующих максимального сосредоточенного внимания. Существуют теории, связывающие гамма-ритм с работой сознания.
- Каппа-ритм – колебания разности потенциалов в альфа- или тета-диапазоне частот. Обычно каппа-ритм регистрируется с височных областей мозга во время умственной деятельности

испытуемых. В настоящее время нет единого мнения относительно происхождения данного ритма. В некоторых работах высказывалось предположение, что он является артефактом, связанным с движениями глаз.

- Мю-ритм – колебания разности потенциалов с частотой 7-11 Гц, амплитудой 30-50 мкВ и большой разницей в полупериодах. Мю-ритм наблюдается в состоянии бодрствования в центральной или теменно-центральной областях мозга; блокируется или уменьшается при движении и при тактильных раздражениях. Он близок к альфа-ритму по частотной характеристике, но отличается от него по степени выраженности в различных областях коры.
- Сигма-ритм – один из основных и наиболее чётко выраженных элементов спонтанной ЭЭГ, регистрируемый в состоянии естественного сна. Спонтанный сигма-ритм имеет частоту 12-14 Гц. Характерным признаком сигма-ритма является нарастание амплитуды в начале вспышки сигма-ритма и её убывание в конце вспышки. Амплитуда различна, но у взрослых в основном не меньше 50 мкВ. Сигма-ритм появляется в начальной стадии медленного сна, которая следует непосредственно за дремотой. Во время сна с дельта-волнами сигма-ритм возникает редко. В процессе перехода к быстрому сну сигма-ритм наблюдается в ЭЭГ, но полностью блокируется в развитой фазе быстрого сна.

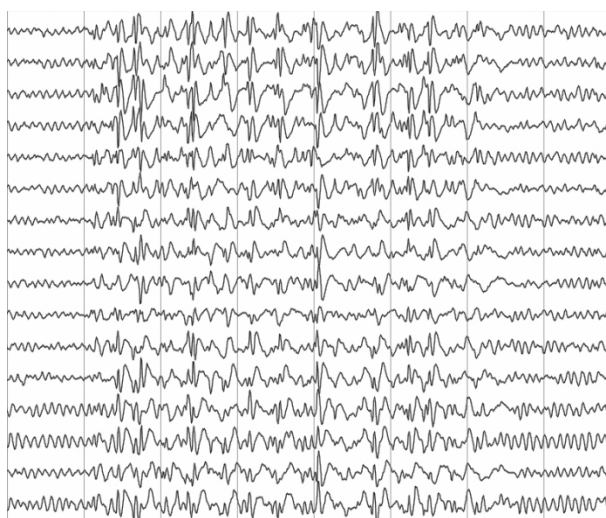


Рис. 2.3. Увеличение амплитуды ритмов ЭЭГ при патологии.

Амплитуда волн, зарегистрированных в процессе электроэнцефалографии, зависит от сопротивления кожи, костных покровов, а также сопротивления отводящих электродов. Резкое увеличение амплитуды наблюдается при различных формах патологии (рис. 2.3).

Значение ЭЭГ

Электроэнцефалография широко используется в медицине. В частности, с помощью ЭЭГ можно отличить эпилептические приступы от неэпилептических и классифицировать их. ЭЭГ помогает идентифицировать участки мозга, участвующие в провоцировании приступов и следить за динамикой действия лекарственных препаратов.

По частоте и амплитуде ритмов ЭЭГ можно судить о том, спит человек или бодрствует. А если спит, то в какой стадии сна (быстрой или медленной) он находится – см. рис. 2.4 и таблицу 2.2. Исследователей также интересуют вопросы, насколько надежно электрические потенциалы человеческого мозга отражают особенности личности, способности и психическое состояние человека. Электроэнцефалограмма долгое время считалась слишком «грубой» для того, чтобы отражать тонкие и разнообразные явления психики.

В настоящее время ЭЭГ, а точнее, ее индивидуально устойчивые параметры позволяют оценить объем памяти человека, скорость принятия решения, выявить задатки интеллектуальной или музыкальной одаренности, особенности эмоциональной сферы.

С помощью ЭЭГ можно оценивать психологические показатели личностных особенностей, в частности, определять способности к обучению, лидерству и другим характеристикам личности, степень пригодности испытуемого для занятий определенным видом деятельности. ЭЭГ позволяет диагностировать возрастные изменения памяти. По современным методикам такая диагностика проводится без единого вопроса к испытуемому.

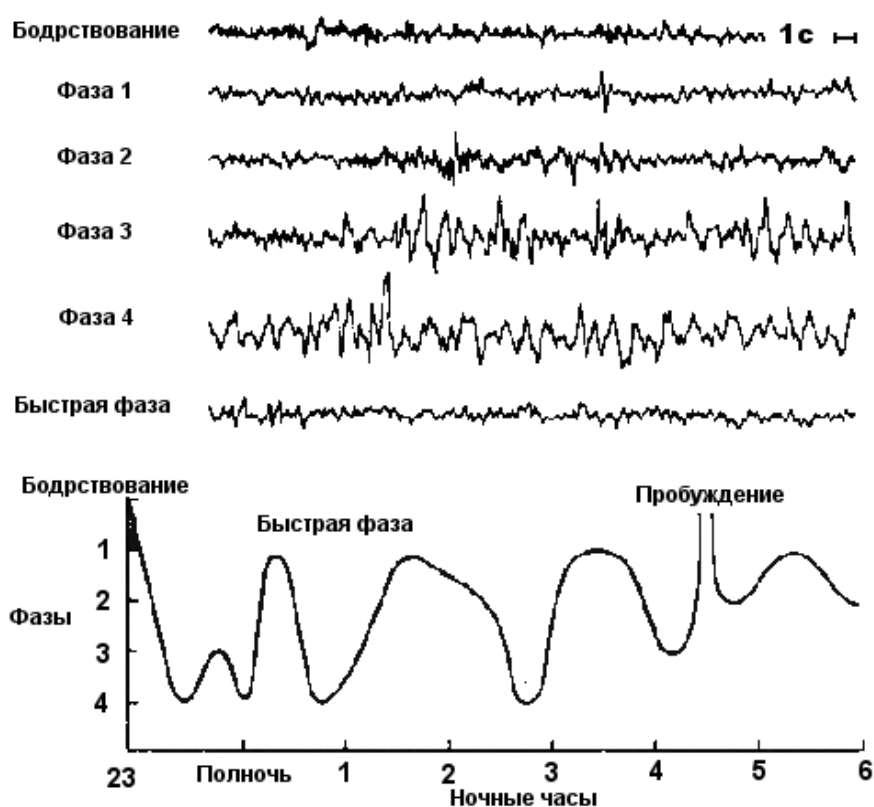


Рис. 2.4. Изменение структуры сигнала ЭЭГ в различных фазах сна.

Фаза сна	Стадия	Особенности ЭЭГ
медленная	1 (дремота)	Подавление основного альфа-ритма. В структуре электроэнцефалограммы при этом возникают быстрые и медленные колебания небольшой амплитуды
	2 («сонные веретена»)	Появление вспышек волн
	3	К «сонным веретенам» добавляются четко выраженные регулярные медленные волны
	4	Преобладают медленные волны большой амплитуды
быстрая («парадоксальная»)	Возникают пилообразные разряды	

Таблица 2.2. Особенности ЭЭГ в различных стадиях сна.

Регистрация и анализ с помощью комплекса МР100

В состав измерительного комплекса МР100 входит модуль для регистрации электроэнцефалограмм EEG100С. Для записи ЭЭГ требуется выполнить следующую последовательность действий:

- 1) Подсоединить кабель МЕС100С к модулю EEG100С, подключить электроды. Для проведения одноканальной записи можно ограничиться двумя контактными электродами (на кабеле МЕС100С они отмечены “Shield”), приложенными, например, к височным областям. Третий электрод соответствует нулевому потенциалу. Для улучшения качества регистрации сигнала на контактную поверхность электродов наносится специальный гель. Для крепления электродов используются липкие диски. С целью регистрации сигналов электрической активности с разных участков мозга на голову испытуемого надевается шлем с прикрепленными на нем электродами.
- 2) Задать на модуле EEG100С характеристики фильтров:
 - “Alpha filter” → “Normal”;
 - “35 Hz LPN” → “ON”;
 - “HP Filter” → “1.0 Hz”.
- 3) Запустить программу AcqKnowledge, выбрать папку Samples, тип файлов *GTL и затем открыть файл “Q01 EEG”. В результате появится новое окно.
- 4) Указать канал для записи аналогового сигнала, выбрав МР100 → Set Up Channels → Analog. В появившемся окне установить номер канала, например, А1 (необходимо проверить, какой канал задан на модуле EEG100С, именно его и нужно установить в программе).
- 5) Выбрать ритмические процессы, которые планируется изучать и выводить на дисплей в режиме реального времени в процессе записи электроэнцефалограммы (например, альфа-, бета-, дельта- и тета-ритмы). С этой целью в том же самом окне установить Calc. После выбора нужно-

го ритма необходимо заходить в Setup, задавать параметры (или использовать указанные по умолчанию) и нажимать ОК (программа запоминает настройки по отдельности). Пример задания ритмических процессов экспериментатором представлен на рисунке 2.5.

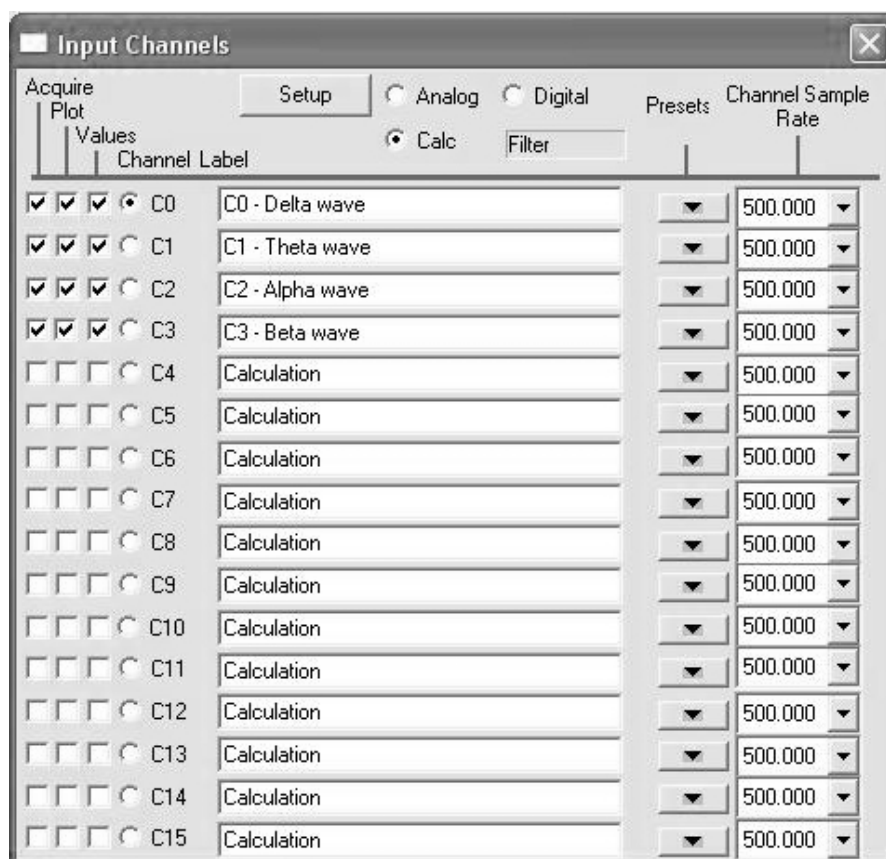


Рис. 2.5. Пример выбора 4-х ритмических процессов, которые будут изображаться на экране в процессе записи электроэнцефалограммы.

- 6) Задать длительность экспериментальной записи в MP100 → Set Up Acquisition. В появившемся окне также устанавливается частота дискретизации сигнала и варианты хранения данных (в оперативной памяти или запись в файл).
- 7) Нажать “Start” для начала записи данных. Во время эксперимента запись можно приостановить, нажав “Stop”. Если не нажимать “Stop”, то регистрация автоматически завершится при достижении установленного времени. Пример полученной экспериментальной записи ЭЭГ и альфа-ритма представлен на рисунке 2.6.

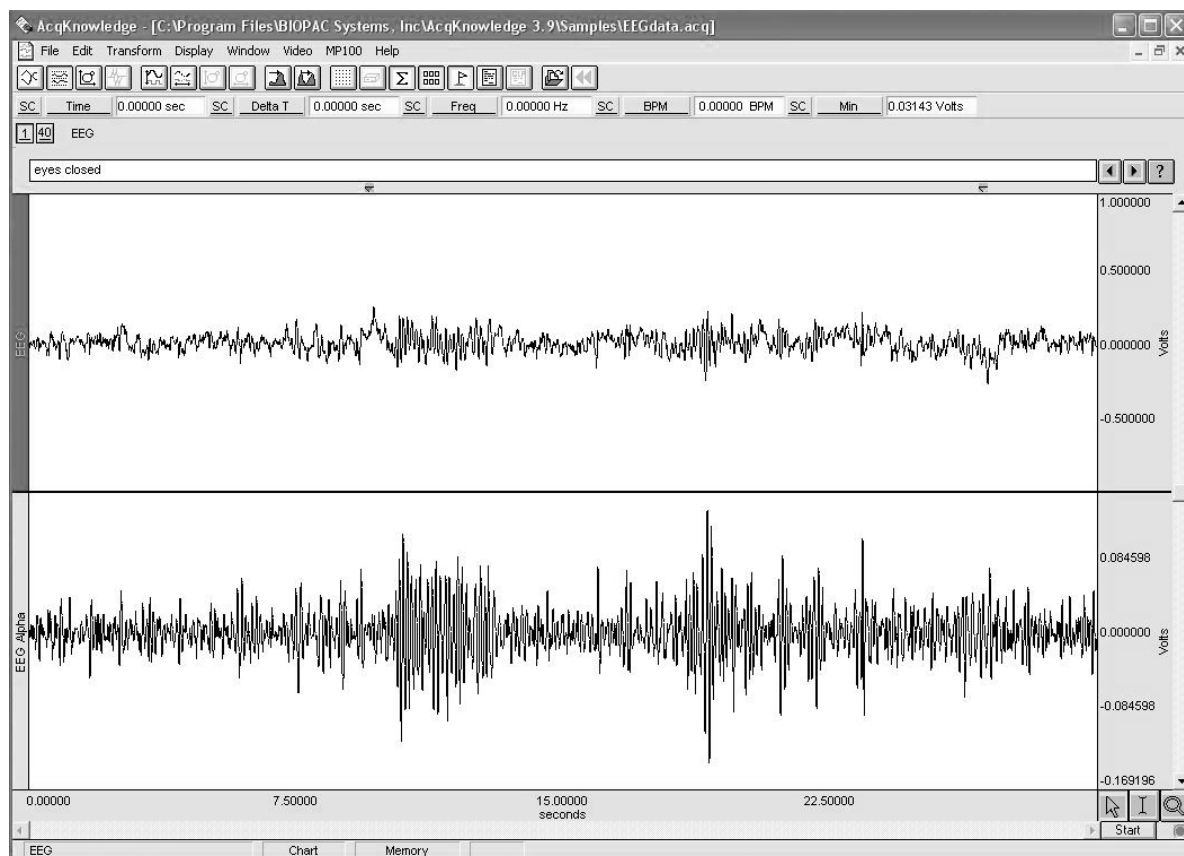


Рис. 2.6. Фрагмент записи ЭЭГ и выделенной временной зависимости альфаритма (“EEG Alpha”).

Анализ сигналов ЭЭГ предполагает вычисление целого набора характеристик, которые можно оценить при помощи программы Acq-Knowledge. Статистический анализ включает построение гистограмм как непосредственно для всего сигнала ЭЭГ, так и для каждого ритма в отдельности. Для построения гистограммы электрической активности, соответствующей альфаритму, нужно выделить мышью область для проведения вычислений (предварительно нажав кнопку ). Затем выбрать опцию Transform → Histogram. В появившемся окне “Histogram Options” указывается диапазон разности потенциалов (можно воспользоваться процедурой его автоматического определения), а также указывается количество участков разбиения этого диапазона. Последний параметр целесообразно выбирать в зависимости от длительности экспериментальной записи – при выборе большого количества участков для сравнительно короткой реализации будет получена сильно “изрезанная” гистограмма. Рассматривая дли-

тельные фрагменты ЭЭГ, можно получить более качественные результаты (рис. 2.7).

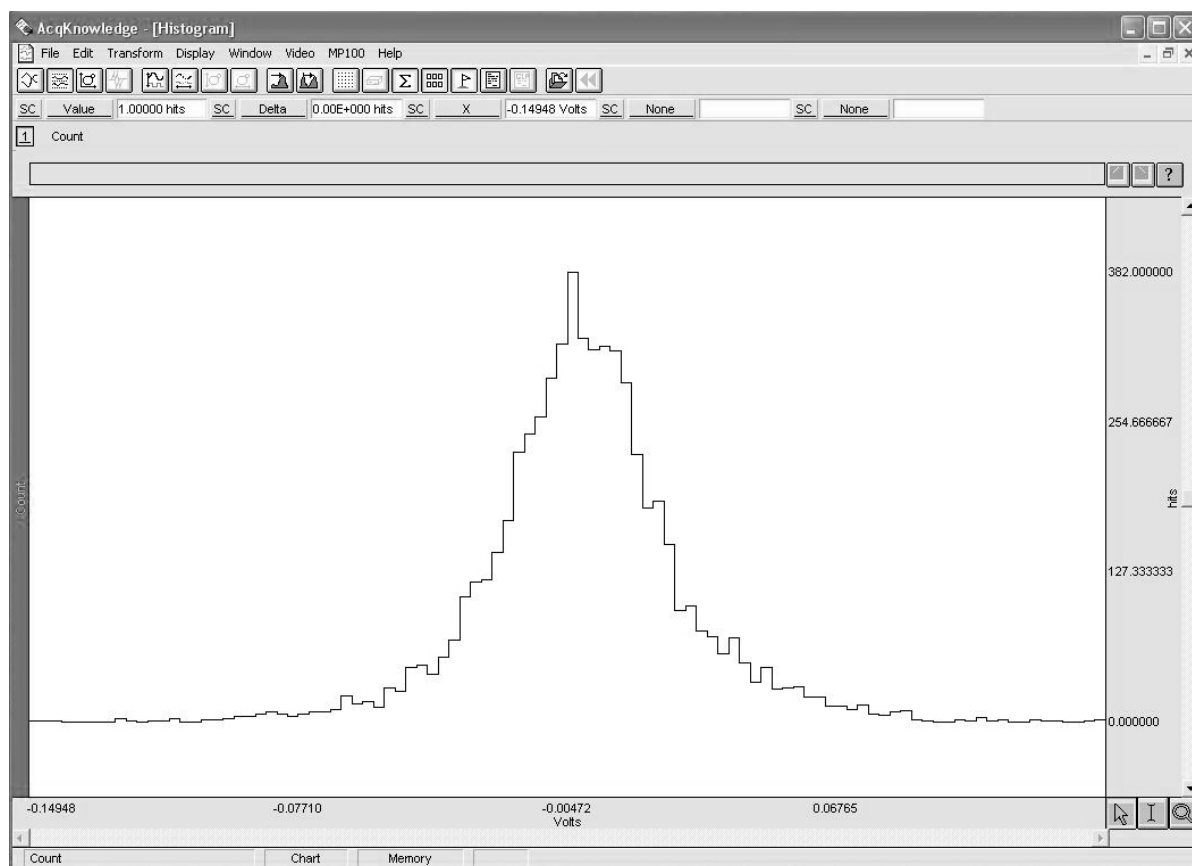


Рис. 2.7. Гистограмма, построенная по временной зависимости колебаний в диапазоне альфа-ритма длительностью 30 секунд.

К числу классических методов обработки экспериментальных данных также относится спектральный анализ. Несмотря на то, что возможности программы AcqKnowledge ограничиваются расчетами спектра в рамках одного окна (без процедуры усреднения), такой анализ позволяет провести предварительную оценку характерных частот ритмических процессов. Программа предоставляет возможность вычислять быстрое преобразование Фурье и выводить на экран амплитудный или фазовый спектры, а также получать оценки для спектральной плотности мощности (“Transform → Power Spectral Density” – рис. 2.8).

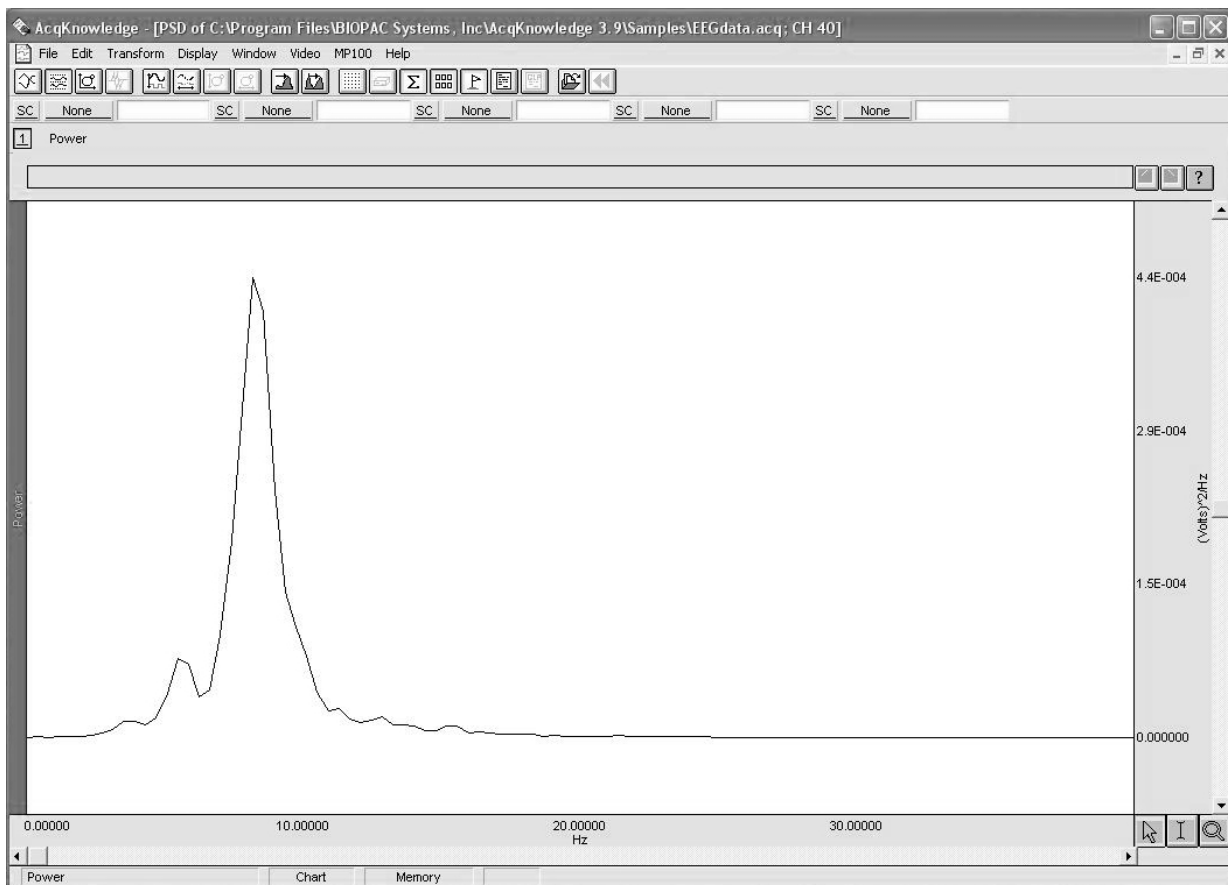


Рис. 2.8. Спектр мощности, вычисленный по временной зависимости альфа-ритма длительностью 10 секунд.

Из-за наличия большого уровня фонового шума предпочтительнее проводить анализ для интегрированных (значительно более гладких) сигналов. В таких сигналах отчетливее выделяются характерные ритмические процессы. Для получения интегрированной временной зависимости выбирается нужный канал (например, содержащий временную зависимость колебаний в диапазоне альфа-ритма) и выполняется следующая последовательность действий:

- дублируется сигнал с помощью “Edit → Duplicate waveform”;
- запускается “Transform → Integrate” и выбираются нужные опции, например, “Average over samples”, “Samples: 30”, “Rectify”;
- устанавливается автоматическое значение масштаба по оси ординат (“Autoscale”);

- меняется название канала с интегрированной зависимостью. Для этого щелчком мыши по метке канала открывается окно, в котором указывается новое название. В результате будет получена зависимость с более выраженными колебаниями (рис. 2.9).

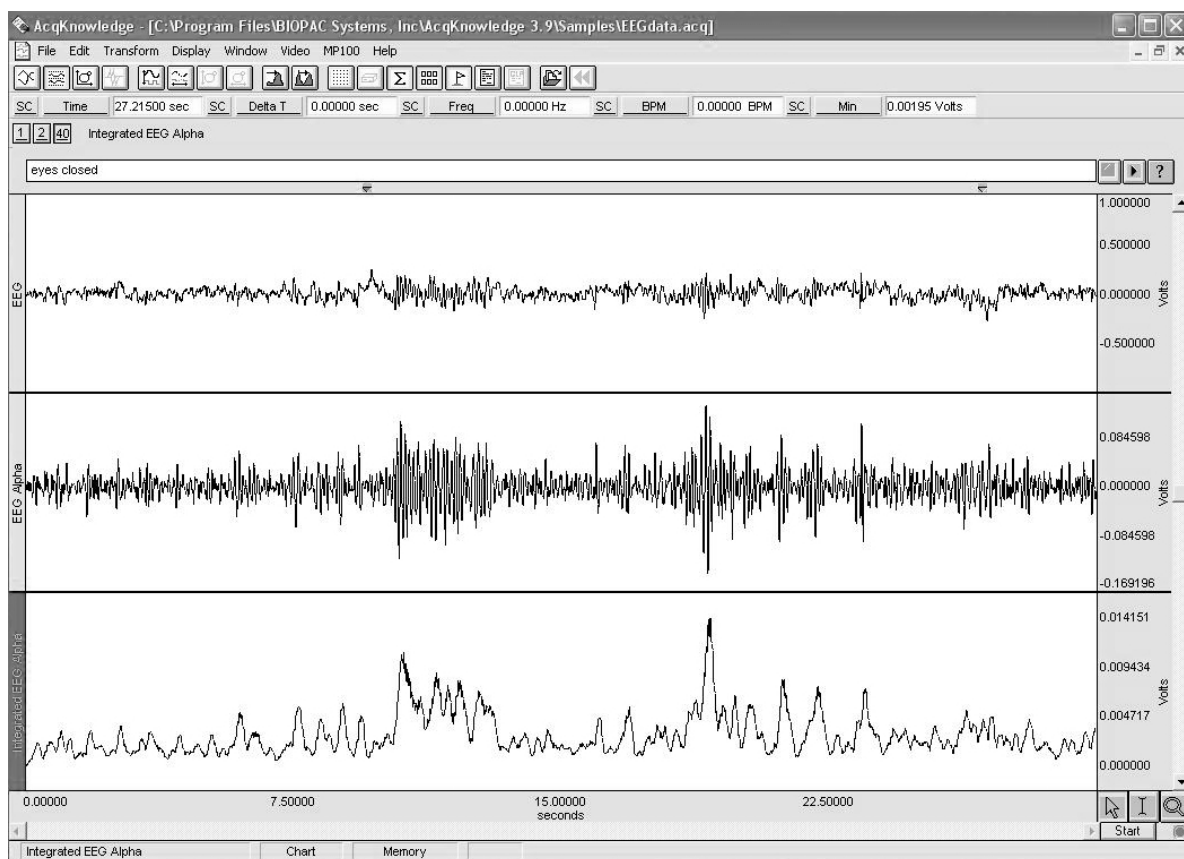


Рис. 2.9. Получение интегрированной временной зависимости колебаний в диапазоне альфа-ритма (нижний канал).

Изучение динамики различных ритмов ЭЭГ целесообразно проводить при изменении функционального состояния организма с тем, чтобы выявить изменения в структуре сигналов, к которым приводит смена состояния. В качестве возможного варианта протокола экспериментов можно рассмотреть следующую последовательность регистрируемых ЭЭГ-сигналов:

- в состоянии покоя (с открытыми глазами);
- в состоянии покоя (с закрытыми глазами);
- счет в уме (с закрытыми глазами);

- наличие периодического светового воздействия (создаваемого с помощью стробоскопа) при разных значениях частоты воздействия.

Контрольные вопросы

- 1) Какую информацию можно получить из ЭЭГ?
- 2) Дайте характеристику альфа-ритму ЭЭГ.
- 3) Какой ритм ЭЭГ проявляется сильнее при интенсивной работе?
- 4) С какой целью в экспериментах на поверхность электродов наносят гель?
- 5) Каким образом с помощью программы AcqKnowledge можно в режиме реального времени из сигнала ЭЭГ выделить основные ритмы (альфа-, бета-, дельта-, тета-ритмы)?
- 6) Для чего используются интегрированные временные зависимости сигналов и как их получать?