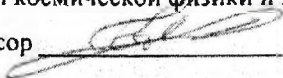


ОДОБРЕНО кафедрой космической физики и экологии

Зав. кафедрой, профессор  А.Г. Колесник

РАССМОТРЕНО и УТВЕРЖДЕНО методической комиссией радиофизического факультета

Протокол № 5 от «5» июня 2009 г.

Председатель комиссии, профессор  С.Н. Владимиров

В настоящем пособии рассмотрены способы организации и проведения синхронного экологического мониторинга. Представлены наиболее значимые показатели, отражающие динамику основных функциональных систем организма человека. Изложены основные способы анализа данных, полученных в ходе мониторинга. Даны варианты проведения лабораторных работ.

Для студентов радиофизического факультета при выполнении практических и лабораторных работ по курсу «Электромагнитная экология» (биофизические аспекты).

АВТОРЫ: канд. биол. наук, доцент
аспирант

С.В. Побаченко,
А.В. Пономарев



СОДЕРЖАНИЕ

1. Понятие экологического мониторинга	5
2. Электромагнитный фон окружающей среды	7
2.1. Низкочастотные электромагнитные поля естественного происхождения ..	7
2.2. Антропогенное загрязнение естественного электромагнитного фона окружающей среды	10
2.2.1. Сотовая связь	12
3. Основные параметры индикации функционального состояния живых систем	16
3.1. Электрокардиография	16
3.1.1. Регистрация электрокардиограммы (Съем ЭКГ)	17
3.1.2. Анализ ЭКГ	19
3.2. Электроэнцефалография	23
3.2.1. Регистрация электроэнцефалограммы (Съем ЭЭГ)	26
3.2.2. Анализ ЭЭГ	28
Рекомендуемая литература	36
Лабораторный практикум	37
Лабораторная работа № 1	37
Лабораторная работа № 2	40
Лабораторная работа № 3	42

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЭМП – электромагнитное поле
ЭМВ – электромагнитные волны
КНЧ – крайне низкочастотный диапазон
СНЧ – сверх низкочастотный диапазон
СВЧ – крайне высокочастотный диапазон
ЛЭП – линия электропередач
ЭКГ – электрокардиограмма
ЭЭГ – электроэнцефалограмма
ШР – шумановский резонатор
ИАР – ионосферный альвеновский резонатор
АЦП – аналогово-цифровой преобразователь
ПК – персональный компьютер

1. ПОНЯТИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Термин *мониторинг* для определения систематических, многократных, целенаправленных наблюдений за элементами окружающей природной среды в пространстве и времени возник во второй половине минувшего века.

В последнее время проблема корректной организации и проведения мониторинговых исследований существенно актуализируется, и данные о состоянии природной среды все шире используется в различных сферах деятельности. Эта информация нужна: в повседневной жизни людей – для обеспечения нормальной функциональной активности; при деятельности в чрезвычайных обстоятельствах – для прогнозов потенциально опасных явлениях окружающей среды. Важно отметить, что изменения (трансформации) в состоянии среды обитания, особенно в последние десятилетия происходят и под воздействием техногенных процессов, связанных с деятельностью человека, что существенно модифицирует физическую структуру биосферы и последствия для существования живых систем зачастую мало прогнозируемы. Как пример, можно констатировать, что Земля, по ряду оценок, является самой яркой “звездой” Солнечной системы, излучающей в радиочастотном диапазоне. Определение вклада антропогенных изменений представляет собой достаточно сложную и специфическую задачу.

Экологический мониторинг определяется, как информационная система наблюдений, оценки и прогноза изменений в состоянии окружающей среды, созданная с целью определения закономерностей влияния факторов внешней среды на биосферу и выделения антропогенной составляющей этих изменений на фоне природных процессов.

Таким образом, система экологического мониторинга должна накапливать, систематизировать и анализировать информацию:

- о физическом состоянии окружающей среды;
- о причинах наблюдаемых и вероятных изменений состояния (т.е. об источниках и факторах воздействия);
- о допустимости изменений и нагрузок на среду обитания;
- о потенциальных резервах биосферы.

В целом, в систему экологического мониторинга входят наблюдения за состоянием элементов биосферы и наблюдения за источниками и факторами антропогенного воздействия. В соответствии с приведенными определениями и функциями, мониторинг включает три основных направления деятельности:

- наблюдение за комплексом факторов воздействия и состоянием среды;
- реальное оценивание физического состояния окружающей среды;
- прогноз состояния окружающей природной среды и оценку потенциальных сценариев прогнозируемых состояний.

Следует принять во внимание, что сама система мониторинга не включает деятельность по управлению качеством среды, но является источником информации, необходимой для принятия экологически значимых решений.

Система мониторинга реализуется на нескольких уровнях, которым соответствуют специально разработанные программы:

- импактном (изучение сильных воздействий в локальном масштабе);
- региональном (проявление проблем трансформации и совместного воздействия различных факторов, характерных для региона);
- фоновом (на базе экологически «чистых» зон, где исключена (минимизирована) всякая техногеника).

Кроме того, встречаются градации мониторинга, связанные с размерностью временных интервалов проведения наблюдений и анализа фиксируемых параметров, так выделяются:

- долговременный (постоянный, лонгитюдный) мониторинг;
- выборочный мониторинг.

По точности, надежности и оптимальности оценивания экологического воздействия факторов окружающей среды на живые системы наиболее корректным является *сопряженный* экологический мониторинг. Основная идея данного подхода заключается в проведении четко координированных по времени наблюдений, как за состоянием физических параметров окружающей среды, так и за переменными функционального состояния живых систем. Подобного рода методическая организация мониторинга позволяет конструктивно определять экологическую значимость того или иного фактора среды и реакцию биосистем на широкий спектр интервалов непосредственного воздействия, либо последствий, что составляет основу прогностического моделирования.

Электромагнитные поля окружающей среды являются значимым фактором, оказывающим существенное влияние на биосферу и все её составляющие. В связи с этим, мониторинговые исследования влияния особенностей состояния электромагнитного фона и его воздействия на живые системы является неотъемлемой частью экологического мониторинга. Электромагнитный мониторинг составляет методическую основу проведения исследований в рамках электромагнитной экологии.

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФОН ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Земля подвергается постоянному воздействию электромагнитных излучений Солнца и других космических объектов. В процессе этого воздействия происходили и происходят сейчас сложные, взаимосвязанные явления в магнитосфере и атмосфере нашей планеты, влияющие самым непосредственным образом на живые организмы биосферы и среду обитания. В процессе эволюционного развития живые организмы, включая человека, в определенной степени адаптировались к естественному фону ЭМП. Однако вследствие научно-технического прогресса и освоения человечеством всего спектра ЭМВ электромагнитный фон Земли в настоящее время не только существенно увеличился, но и претерпел качественные изменения. Появились ЭМИ таких диапазонов, которые имеют только искусственное происхождение в результате техногенной деятельности (например, миллиметровый диапазон длин волн и др.; миллиметровое излучение внеземного происхождения интенсивно поглощается атмосферой Земли, поэтому живые организмы не имеют адаптации к этим волнам).

Все источники ЭМИ можно разделить на естественные и техногенные. К первым относится электрическое и магнитное поля Земли, атмосферные разряды (грозовая активность), магнитосферные излучения, ЭМИ Солнца и галактик. Техногенные ЭМП создаются источниками переменного тока и широко варьируют по своим частотным и энергетическим характеристикам.

2.1. Низкочастотные электромагнитные поля естественного происхождения

По происхождению природные источники электромагнитных полей можно разделить на две группы:

- поле Земли: постоянное электрическое и основное магнитное поле;
- радиоволны, генерируемые космическими источниками (Солнце, галактики), а также рядом процессов в атмосфере Земли (грозовые разряды), при возбуждении колебаний в ионосфере Земли.

Естественное электрическое поле Земли создается избыточным отрицательным зарядом на поверхности, его напряженность на открытой местности составляет порядка 100–500 В/м. В грозовых облаках напряженность возрастает до сотен кВ/м.

Естественное геомагнитное поле, как сумма полей от различных источников – это поле, создаваемое однородной намагниченностью Земного шара, обусловленное намагниченностью верхних слоев земной коры, и поле, вызываемое внешними причинами, в том числе и поле вариаций, связанное с взаимодействием межпланетной среды с магнитным полем Земли. Величина геомагнитного поля зависит от широты и меняется от 25000 γ на магнитном экваторе до 60000 γ – на магнитном полюсе.

Среди изменений магнитного поля выделяют достаточно широкий спектр вариаций от различного рода короткопериодических флуктуаций до вековых.

Наряду с исследованиями вариаций КНЧ диапазона электромагнитного поля Земли, вырос интерес к распространению электромагнитных волн в данном частотном диапазоне. В этой области частот распространение электромагнитных волн происходит своеобразно в связи с тем, что длина волны соизмерима с радиусом Земли. Возникают глобальные резонансы, когда частота колебаний совпадает с собственной частотой резонатора, образованного сферической полостью (волноводом) между Землей и ионосферой. На возможность возникновения глобальных резонансов впервые указал В.О. Шуман (рис. 2.1).

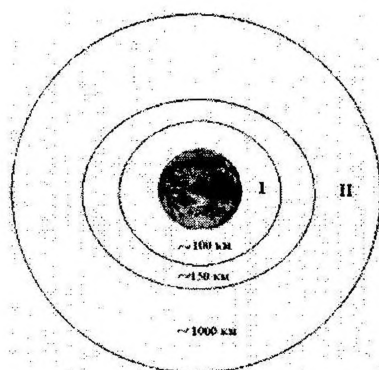


Рис. 2.1. Глобальные околоземные ионосферные резонаторы:
I – шумановский; II – альфеновский

В 1976 г. С.В. Поляков высказал предположение о том, что в диапазоне 0,5–10 Гц на высотах ионосферы должен существовать естественный электромагнитный глобальный резонатор – резонатор альфеновских волн. В 1985 г. П.П. Беляевым и группой сотрудников НИРФИ была обнаружена резонансная структура спектра электромагнитного шума на

частотах ниже первой гармоники шумановского резонатора. Выяснилось, что альфвеновские волны в ионосфере формируют альфвеновский резонатор с частотой колебаний, зависящей от толщины ионосферы, величины напряженности магнитного поля Земли и концентрации частиц ионосферной плазмы. Резонансная частота альфвеновского резонатора меняется в пределах 0,5–3 Гц в зависимости от состояния ионосферы.

Был спрогнозирован и рассчитан спектр собственных частот резонатора Земля – ионосфера и одновременно установлена роль грозových разрядов как естественных источников КНЧ колебаний. Верхняя граница частот волновода определяется дисперсионными свойствами ионосферы, которая становится прозрачной при повышении частоты до нескольких десятков мегагерц. Нижняя граница частот не существует, то есть, в волновode Земля – ионосфера могут распространяться радиоволны сколь угодно низкой частоты, вплоть до постоянного тока. При исследовании экспериментальных энергетических спектров КНЧ шума, по максимумам которых обнаруживается резонанс, установлено существование суточных вариаций резонансных частот и их добротностей.

Как отмечалось выше электромагнитные волны крайне низких частот в полости Земля – ионосфера могут возбуждаться двумя типами естественных источников: земными и космическими. В основном электромагнитная энергия КНЧ диапазона связана с излучением вертикальных грозových разрядов. Интенсивность шумов от грозových источников увеличивается с уменьшением широты. Грозовая активность основных мировых центров экваториальной зоны (Юго-Восточная Азия и Северная Австралия, Центральная Африка, Центральная и Южная Америка) максимальна после местного полудня, поэтому интенсивность ЭМП резко возрастает в послеполуденные часы. С увеличением широты влияние мировых грозových центров ослабевает, и основной вклад в уровень электромагнитного фона вносят источники в магнитосфере. Космическая природа электромагнитных колебаний, наблюдаемых на поверхности Земли в соседних с КНЧ диапазонах, установлена с высокой степенью достоверности. Это регулярные и нерегулярные колебания геомагнитного поля, наблюдаемые в диапазоне частот от нескольких миллигерц до нескольких герц.

Естественные электромагнитные колебания в КНЧ диапазоне представляют собой шумоподобный процесс, специфически проявляемый в ближней ($r < \lambda$) и дальней зонах. Выделяют шумановский фон, дисперсия которого на длительных интервалах времени остается постоянной, КНЧ всплески, порожденные ближайшими грозowymi разрядами, которые по амплитуде на несколько порядков превышают шумановский фон и КНЧ всплески – отклик резонатора на одиночные мощные молниевые разряды,

превосходящие фон на порядок и длительностью около секунды. Шумановский фон существует постоянно и является откликом резонатора Земля–ионосфера на совокупность грозových разрядов, возникающих на земном шаре. При спектральном анализе шумановского фона выделяют резонансные пики, характеризующиеся незначительным размахом на частотах 7,8, 14,2, 20,4, 26, 32 Гц (рис. 2.2). Исследования в этой области интенсивно развиваются. Обнаружены новые закономерности и определены актуальные направления исследований, важные с экологической точки зрения.

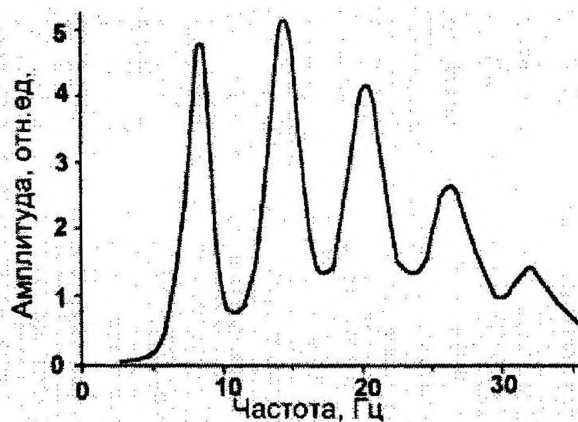


Рис. 2.2. Типичный спектр электрической компоненты ЭМП, показывающий пять первых мод шумановского резонатора

Электромагнитные поля естественного происхождения более высокочастотных диапазонов, в силу специфики источников генерации, а основное в связи с пределами распространения, как ныне принято считать, не имеют выраженной экологической значимости. Хотя данный вопрос на сегодняшний день является открытым. Но в любом случае учет и анализ их целесообразен, хотя бы в контексте особенностей воздействия электромагнитных полей искусственного (антропогенного, техногенного) синтеза.

2.2. Антропогенное загрязнение естественного электромагнитного фона окружающей среды

В течение последних десятилетий естественный электромагнитный фон в КНЧ диапазоне претерпевает существеннейшие изменения. Эти

изменения вызываются техногенным (антропогенным) электромагнитным загрязнением окружающей среды. В соответствии с международной классификацией источники техногенных ЭМП делятся на две группы:

- источники генерирующие в диапазоне КНЧ-СНЧ (от 0 до 3 кГц);
- источники генерирующие излучение в радиочастотном диапазоне от 3 кГц до 300 ГГц (НЧ-ГВЧ диапазон).

К первой группе относятся в первую очередь все системы производства, передачи и распределения электроэнергии (линии электропередач, трансформаторные подстанции, электростанции, системы электропроводки, различные кабельные системы); домашняя и офисная электро- и электронная техника и т.д.; транспорт на электроприводе: ж/д транспорт и его инфраструктура, городской – метро, троллейбусный, трамвайный. Необходимо отметить также системы связи и навигации, работающих в диапазоне крайне низких частот. Измерения показывают, что вблизи источников электромагнитные поля в КНЧ диапазоне могут превышать естественный фон в тысячи раз. Хотя до сих пор и отсутствуют систематические измерения электромагнитных полей данного частотного диапазона в городах в целом ситуация более менее определена. Типичные напряженности полей под линиями электропередач зависят от класса напряженности ЛЭП, нагрузки, высоты подвески, расстояния между проводами и растительного покрова рельефа. Бытовые электроприборы создают поля промышленной частоты, как правило, вблизи своей поверхности и напряженностью, не превышающей естественный электромагнитный фон, но зачастую выше уровня безопасности (0,2 γ) принятого в некоторых странах. Самым мощным источником техногенных полей является рельсовый электротранспорт, спектральные составляющие электромагнитных колебаний которого сдвинуты в область частот ниже 10 Гц.

Вторую группу составляют в основном так называемые функциональные передатчики. Это источники ЭМП в целях передачи или получения информации (коммерческие передатчики, радиотелефоны, направленная радиосвязь, навигация и локаторы), а также технологическое оборудование, использующее СВЧ излучение, переменные (50 Гц – 1 МГц) и импульсные магнитные поля; медицинские терапевтические и диагностические установки; бытовое оборудование, средства визуального отображения информации. Действие ЭМП второй группы можно охарактеризовать как в большей степени локальные и влияющие индивидуально на каждого человека.

Таким образом, несмотря на чрезвычайное многообразие возможных проявлений динамики параметров естественных электромагнитных полей, зависящее от комплекса гелиогеофизических факторов, существует

явное влияние техногеники, при этом данный тип воздействия может существенно модифицировать действие естественных ЭМП. В связи с этим, возникает необходимость в организации и проведении мониторинга состояния электромагнитной обстановки для решения комплекса прикладных задач экологии и разработке прогнозов потенциального воздействия фоновых ЭМП всех типов на живые организмы.

2.2.1. Сотовая связь

Отдельно во второй группе можно выделить такой источник техногенного электромагнитного поля как сотовая связь, который в последнее десятилетие получил наиболее сильное и повсеместное распространение. На основании имеющихся на сегодняшний день данных можно констатировать, что сам факт влияния излучений мобильных телефонов на живые системы не вызывает сомнений. Однако механизмы данного вида воздействий остаются достаточно неопределенными. При воздействии электромагнитной энергии сотового телефона, как и при воздействии, любого электромагнитного излучения выделяют два эффекта: термический и нетермический.

Термический эффект обусловлен поглощением электромагнитной энергии телом человека с последующим ее преобразованием в тепловую. Электромагнитная энергия поглощается телом человека и разогревает его и отдельные органы. На принципе разогрева предметов за счет электромагнитной энергии работают микроволновые печи. Правда, мощность излучения в печах значительно выше, нежели у сотовых телефонов. Однако надо учитывать, что антенна, основной излучатель телефона, находится совсем рядом с головным мозгом, на который электромагнитное поле и действует. В результате температура отдельных участков мозга повышается. При длительном разговоре этот эффект можно ощущать по повышению температуры ушной раковины. Это неблагоприятный эффект для любых органов.

Нетермический эффект (иногда называемый информационным эффектом). Процесс воздействия излучения сотового телефона на мозг -- так называемый информационный эффект изучен пока очень слабо. Суть его заключается в том что биологический эффект зависит не от величины энергии вносимой в ту или иную систему, а от вносимой в нее информации. Сигнал, несущий информацию вызывает не только перераспределение энергии в самой системе, а управляет происходящими в ней процессами.

Мобильные телефоны стандарта GSM осуществляют передачу информации импульсами, объединенными в блоки (рис. 2.3). Блок состоит из 8 импульсов. В распоряжении каждого пользователя имеется только один из восьми импульсов. Остальные семь принадлежат другим семи абонентам, которые в этот момент на данной частоте могут вести телефонные разговоры. Продолжительность одного GSM-блока составляет 4,616 миллисекунды (мс), следовательно, частота пульсации мобильного телефона составляет $1/4,616 \text{ мс} = 216,6 \text{ Гц}$ или округленно 217 Гц. С генерацией каждого восьмого импульса происходит и пропорциональное выделение энергии. Если номинальная мощность сотового аппарата, согласно инструкции, равна 2 Вт, то мощность, выделяемая при каждом импульсе, будет: $2/8 = 0,25 \text{ Вт}$. Блоки упомянутых импульсов между мобильным телефоном и базовой станцией группируются в мультиблоки, состоящие из 26 повторений. Следовательно, второй частотой, которая испускается сотовым телефоном, является частота: $217/26 = 8,35 \text{ Гц}$. Более того, некоторые виды мобильных аппаратов, работающих в энергосберегающем режиме (DTX), способны генерировать третью частоту – 2 Гц. Такой подход в организации канала связи носит название «множественный доступ с разделением по времени» (Time Division Multiple Access или кратко TDMA).

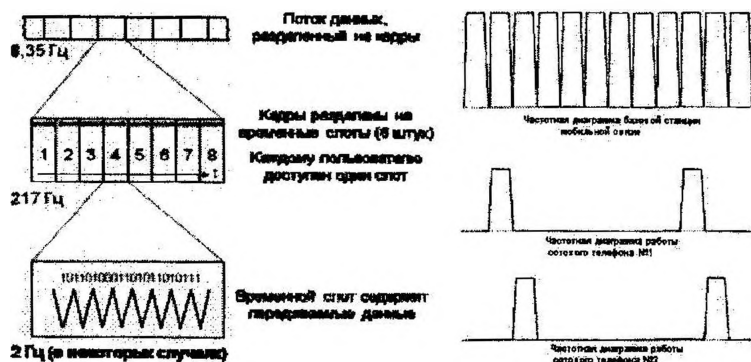


Рис. 2.3. Структура организации канала связи и частотная диаграмма работы сотового телефона стандарта GSM-900

Вот в этом наборе низкочастотных излучений и состоит одна из опасностей мобильной связи. Дело в том, что упомянутые частоты сотовых аппаратов совпадают с частотами собственной, естественной биоэлектрической активности головного мозга человека, которые регистрируют-

ся на электроэнцефалограмме. Так частота 217 Гц совпадает с так называемым гамма-ритмом мозга, 8,35 Гц – с альфа-ритмом, а 2 Гц – с дельта-ритмом. Следовательно, извне (из непосредственной близости) в головной мозг человека поступают сигналы, которые способны взаимодействовать с собственной биоэлектрической активностью головного мозга (например, путем резонанса) и тем самым нарушать его функции. Такие изменения заметны на электроэнцефалограмме и не исчезают длительное время после окончания разговора. Очень важно отметить еще и то, что именно альфа-волны чрезвычайно индивидуально, непосредственно связаны с умственной деятельностью человека, и как считают, являются отражением сканирования внутренних образов сознания. Абстрактное мышление связано именно с альфа-ритмом мозга, во время сна преобладает дельта-ритм, а гамма-волны – с активной деятельностью человека.

Помимо стандарта GSM (GSM-900) существуют и другие стандарты, в основе которых лежат иные подходы в способе организации канала связи для приема и передачи информации. К этим стандартам можно отнести W-CDMA, UMTS, IMT-MC-450 (CDMA 450). В этих стандартах используется подход в организации канала связи, который носит название «множественный доступ с кодовым разделением» (Code Division Multiple Access или кратко CDMA). Суть его заключается в том, что каналы связи при таком способе разделения среды создаются присвоением каждому пользователю отдельного числового кода, который распространяется по всей ширине полосы. Нет временного разделения, все абоненты постоянно используют всю ширину канала. Полоса частот одного канала очень широка, вещание абонентов накладываются друг на друга но, поскольку их коды отличаются, они могут быть дифференцированы (рис. 2.4).

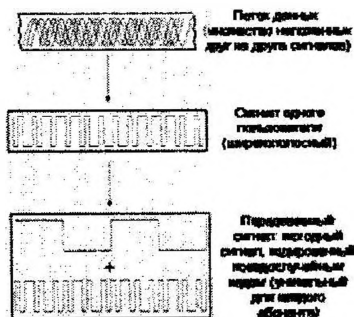


Рис. 2.4. Структура организации канала связи сотового аппарата, использующего множественный доступ с кодовым разделением

При таком способе организации канала связи отсутствует ярко выраженный импульсный характер излучения, который свойственен системам радиосвязи, использующим множественный доступ с временным разделением частотного канала, таким как GSM-900. Это позволяет предположить что излучение, возникающее при действии поля мобильного телефона, которое оказывает воздействие на головной мозг и может потенциально нарушать его нормальное функционирование, в случае разных стандартов (способов организации канала связи) может быть различным.

3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИНДИКАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЖИВЫХ СИСТЕМ

Среди комплекса переменных описывающих функциональное состояние живых организмов наиболее важными и информативными являются показатели, отражающие динамику основных систем, обеспечивающих целостную, координированную жизнедеятельность организма. К числу данных систем, в первую очередь относятся нервная и сердечно - сосудистая. Известно, что эти функциональные системы являются наиболее реактивными к воздействию внешних факторов, особенно это касается нервной системы, в связи с этим, вариабельность переменных этих функциональных систем может служить конструктивным критерием оценки состояния всего организма в целом и особенностей адаптивных реакций на внешние стимулы.

Таким образом, при организации и проведении экологических мониторинговых исследований целесообразно использовать в качестве индикатора внешних воздействий динамику параметров нервной системы, наиболее корректным показателем которой, является функциональное состояние головного мозга, определяемое переменными спонтанной электрической активности мозга и фиксируемое методами электроэнцефалографического анализа. Это можно рассматривать как центральные механизмы регуляторных откликов. Для сердечно-сосудистой системы наиболее информативной характеристикой является динамика параметров электрокардиограммы и интегральной реограммы, по которым можно судить о вегетативных процессах регуляции.

3.1. Электрокардиография

В XIX в. стало ясно, что сердце во время своей работы производит некоторое количество электричества. Первые электрокардиограммы были записаны Габриелем Липпманом с использованием ртутного электрометра. Кривые Липпмана имели монофазный характер, лишь отдалённо напоминавая современные ЭКГ.

Опыты продолжил Виллем Эйнтховен, сконструировавший прибор (струнный гальванометр), позволявший регистрировать истинную электрокардиограмму (ЭКГ). Он же придумал современное обозначение зубцов ЭКГ и описал некоторые нарушения в работе сердца. В 1924 году ему присудили Нобелевскую премию по медицине.

Электрокардиография – методика регистрации и исследования электрических полей, образующихся при работе сердца. Электрокардиография представляет собой относительно недорогой, но ценный метод электрофизиологической инструментальной диагностики в кардиологии.

Прямым результатом электрокардиографии является получение электрокардиограммы – графического представления разности потенциалов возникающих в результате работы сердца и проводящихся на поверхность тела. На ЭКГ отражается усреднение всех векторов потенциалов действия, возникающих в определённый момент работы сердца.

ЭКГ записывают с помощью электрокардиографических устройств. Электрические потенциалы, возникающие в сердце, воспринимаются электродами, усиливаются и поступают на регистрирующее устройство (АЦП, компьютер).

Во избежание технических ошибок и помех при записи ЭКГ необходимо обратить внимание на правильность наложения электродов и их контакт с кожей, амплитуду снимаемых сигналов и другие факторы, способные вызвать искажение кривой.

Электроды для записи ЭКГ накладывают на различные участки тела. Система расположения электродов называется электрокардиографическими отведениями.

3.1.1. Регистрация электрокардиограммы (Съём ЭКГ)

В клинической практике наиболее распространены отведения от различных участков поверхности тела. Эти отведения называются поверхностными. При регистрации ЭКГ обычно используют 12 общепринятых: 6 от конечностей и 6 грудных. Первые 3 стандартных отведения были предложены Эйнтховеном. Электроды при этом накладываются следующим образом:

- отведение: левая рука (+) и правая рука (–);
- отведение: левая нога (+) и правая рука (–);
- отведение: левая нога (+) и левая рука (–).

Оси этих отведений образуют во фронтальной плоскости грудной клетки так называемый треугольник Эйнтховена.

Регистрируют также усиленные отведения от конечностей:

- αVR – от правой руки;
- αVL – от левой руки;
- αVF – от левой ноги.



К положительному полюсу аппарата присоединяют проводник электрода от соответствующей конечности, а к отрицательному полюсу – объединенный проводник электродов от двух других конечностей. Усиленные отведения от конечностей находятся в определенном соотношении со стандартными. Так, отведение αVL в норме имеет сходство с I отведением, αVR – с зеркально перевернутым II отведением, αVF сходно со II и III отведениями.

Шесть грудных отведений обозначают V_1 – V_6 . Электрод от положительного полюса устанавливают на следующие точки:

- V_1 – в четвертом межреберье у правого края грудины;
- V_2 – в четвертом межреберье у левого края грудины;
- V_3 – посередине между точками V_2 и V_4 ;
- V_4 – в пятом межреберье по левой срединно-ключичной линии;
- V_5 – на уровне отведения V_4 по левой передней аксиллярной линии;
- V_6 – на том же уровне по левой средней аксиллярной линии.

На рис. 3.1 показаны так называемые стандартные отведения (треугольник Эйнтховена) и временные зависимости разностей потенциалов, получаемые в этих отведениях.

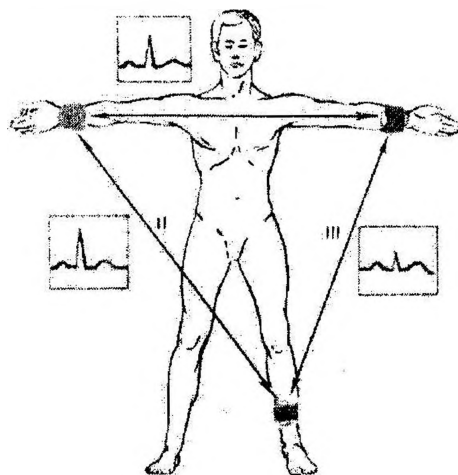


Рис. 3.1. Расположение электродов при стандартных отведениях электрокардиограммы и кривые, получаемые при этих отведениях

Также существует метод суточного мониторингирования ЭКГ (холтеровское мониторингирование) – метод электрофизиологической инструменталь-

ной диагностики, предложенный американским биофизиком Норманом Холтером. Исследование представляет собой непрерывную регистрацию электрокардиограммы в течение 24 часов и более (48, 72 часа). Запись ЭКГ осуществляется при помощи специального портативного аппарата – рекордера, который пациент носит с собой (на ремне через плечо или на поясе). Во время исследования пациент ведет свой обычный образ жизни (работает, совершает прогулки и т.п.), отмечая в специальном дневнике время и обстоятельства возникновения неприятных симптомов со стороны сердца. Холтеровское мониторирование – один из популярных методов диагностики ИБС (ишемической болезни сердца) и нарушений сердечного ритма. Показано пациентам с жалобами на сердцебиение и перебои в работе сердца – для выявления нарушений ритма и проводимости сердца, с неясными обмороками, для регистрации «немой» (безболевой) ишемии сердечной мышцы, для оценки эффективности лечения.

3.1.2. Анализ ЭКГ

Все методы анализа variability ритма сердца могут быть разделены на две большие группы: частотный и временной анализ.

Временной анализ variability сердечного ритма (time domain analysis), включает в себя ряд основных статистических оценок. Эти параметры, условно, могут быть разделены на две категории, первая состоит из среднесуточных характеристик variability сердечного ритма (табл. 3.1), вторая – из пятиминутных оценок (табл. 3.2). Подобное разделение базируется на методике автоматизированной регистрации и анализа суточного (24-hour monitoring) холтеровского мониторирования электрокардиограммы (ЭКГ).

Таблица 3.1
Первая группа (интегральных) параметров временного анализа HRV,
рассчитываемая для всего диапазона наблюдений

Показатель	Определение (единицы измерения)	Модификации
RR	Среднее значение RR-интервалов ЭКГ, миллисекунды (ms)	mRR, HR*, NN*
SDNN	стандартное отклонение RR-интервалов ЭКГ от их среднего значения, ms	SD, RRSD**

*отличаются от RR размерностью (определяются как количество ударов сердца в минуту (beats/min)) и при расчете NN (normal-to-normal) используются только нормальные RR-интервалы (под нормальными интервалами подразумеваются RR-интервалы электрокардиограммы, имеющие источники в синусовом узле сердца).

**рассчитывается без подразделения кардиоинтервалов на патологические и нормальные.

Таблица 3.2

**Вторая группа параметров временного анализа HRV, рассчитываемая,
исходя из пяти(трех)минутных временных интервалов**

Показатель	Определение (единицы измерения)	Модификации
SDANN	Среднее значение стандартных отклонений за пятиминутные периоды, ms	∥
ASDNN	Стандартное отклонение усредненных за 5 минут значений RR-интервалов ЭКГ, ms	∥
PNN50	Количество RR-интервалов ЭКГ с вариациями более чем 50 миллисекунд, %	∥
RMSSD	Квадратный корень среднеквадратичных различий последовательности RR-интервалов ЭКГ, ms ¹	rMSSD, r-MSSD
MSD	Разность между очередными RR-интервалами ЭКГ, ms	∥

Основными интегральными параметрами, отражающим уровень функционирования сердечно-сосудистой системы и его вариабельность, являются среднесуточные значения RR-интервалов электрокардиограммы и стандартное отклонение этого показателя.

Метод временного анализа обладает рядом преимуществ, таких как отсутствие сложных вычислительных процедур, для получения статистических оценок, простота их интерпретации, и широко используется для оценивания вариабельности ритма сердца в практических целях.

Однако в последнее время резкий толчок в развитии получили другие методики анализа вариабельности сердечного ритма. Одним из наиболее прогрессирующих методов диагностики ВРС, является метод спектрального анализа (spectral, frequency domain analysis).

Спектральный анализ играет важную роль в исследовании сигналов, в общем, и физиологических сигналов в частности. Спектральный анализ флуктуаций кардиоваскулярных сигналов является важным методом, позволяющим оценить состояние внутренних регуляторных механизмов организма, таких как нервная активность и гуморальный выброс.

Динамика сердечного ритма имеет сложную структуру, являющуюся отражением сложных взаимодействий имеющих место в системе регуляции физиологических функций организма. Стандартный спектральный анализ предлагает спектральную декомпозицию таких комплексных сигналов на ряд составляющих, которые в последствии могут оцениваться самостоятельно.

Основная идея использования данного метода состоит в том, что если известна временная постоянная различных регуляторных механизмов, каждая спектральная компонента может быть связана со специфической частью системы, контролирующей и управляющей сердечной деятельностью.

При таких условиях, распределение каждой части регуляторной системы может быть выделено и количественно оценено с помощью спектрального анализа.

Флуктуации в сигналах, связанных с активностью сердечно-сосудистой системы, такие как сердечный ритм (HR) и кровяное давление (BP), отражают активность определенной части центральной нервной системы: автономной нервной системы (ANS). Данная система (вегетативная нервная система) обеспечивает постоянство внутренней среды организма (гомеостаз) и адаптирует его к изменяющимся внешним условиям (механической работе, приему пищи, жаре и холоду, стрессу и т.д.).

На начальном этапе развития методов спектрального анализа, многочисленные исследования показали, что высокочастотные флуктуации (HF) сравнимые с ритмом дыхания (около 0,2–0,4 Гц у здоровых взрослых людей) в динамике сердечного ритма связаны с активностью парасимпатического отдела вегетативной системы. При этом низкочастотные (LF) вариации (около 0,1 Гц у здоровых взрослых людей) связаны с активностью обоих отделов ANS (рис. 3.2).

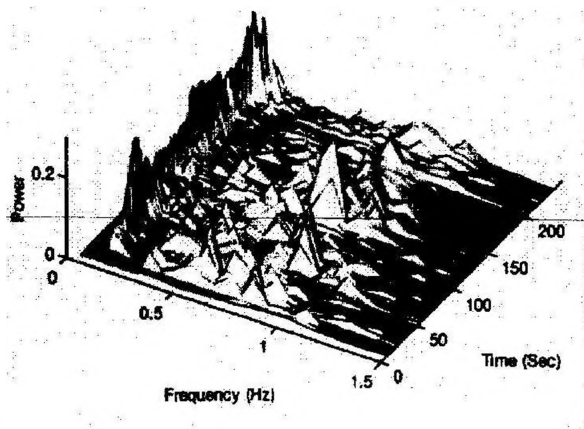


Рис. 3.2. Трехмерный спектр мощности вариаций сердечного ритма плода человека. Отчетливо видны респираторные флуктуации (HF), локализованные вокруг полосы в 1 Гц, которая соответствует частоте дыхательных движений. Отметим так же низкочастотный пик, который отражает симпатическую активность (по оси X – частота, по оси Y – спектральная мощность, по оси Z – время)

Спектральная плотность мощности (PSD) оценивается с использованием авторегрессионной модели (AR) или рядов Фурье (FT). Большинство авторов в качестве базы для спектрального преобразования используют ряды Фурье (FT) (рис. 3.3).

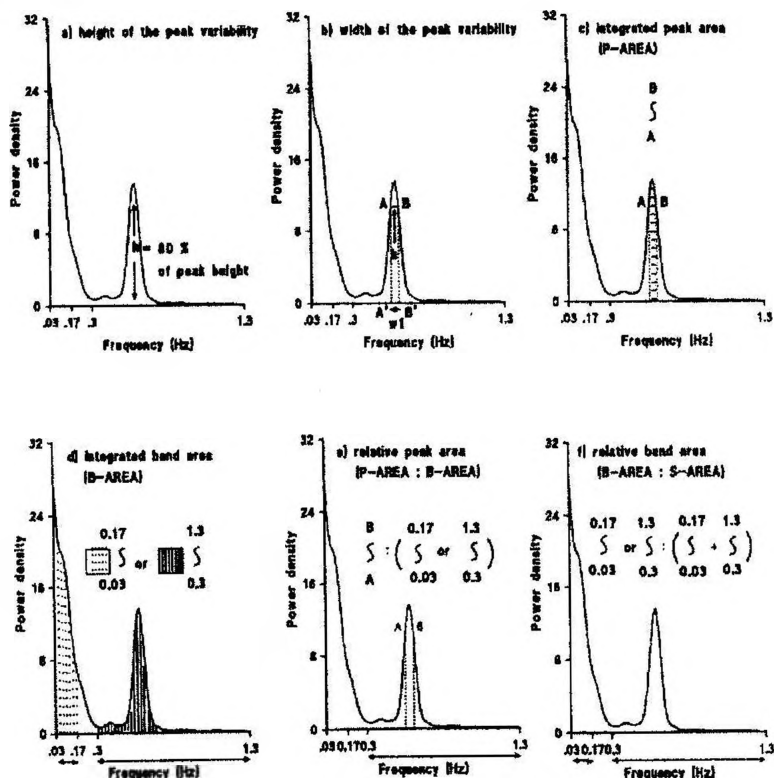


Рис. 3.3. Спектральные параметры HRV и дыхательной активности (RVA) в низкочастотном (LF) и высокочастотном (HF) диапазонах, выделяемые для оценки амплитуды модуляции флуктуаций variability сердечного ритма динамикой дыхания

Благодаря автоматизации расчетов и разработке программного обеспечения методы спектрального анализа, основанные на рядах Фурье имеют большое практическое значение в медицинской диагностике.

Однако наряду с преимуществами данный метод спектрального анализа страдает явными недостатками.

Во-первых, типичный Фурье анализ может предложить только глобальную (усредненную) информацию для всего ряда наблюдаемых величин, то есть отсутствует информация о временной эволюции спектральных компонент.

Во-вторых, основным условием существования ФТ является стационарность анализируемого сигнала (постоянства как функции времени). Это условие налагает определенные ограничения на применимость методики для анализа спектральных компонент.

Таким образом, несостоятельность метода для получения информации о временной зависимости спектральных составляющих, которая объясняет внезапные изменения или нестабильности, определяет необходимость поиска подходов лежащих вне области преобразования Фурье.

В настоящее время делаются попытки модификации оценок Фурье преобразования и адаптации их для решения практических задач.

Специфика оценки спектров RR-интервалов заключается в том, что выборочная последовательность RR не является эквидистантной. Тогда как традиционные методы получения спектральных оценок предполагают эквидистантность временных рядов. В (Сарычев В.Т., 2009) описан метод получения оценок спектров неэквидистантных рядов.

Кроме этого, в ряде исследований для получения спектральных оценок используется авторегрессионное моделирование. В противоположность быстрому преобразованию Фурье, при построении AR-модели используются «сырые» (raw) временные ряды. К достоинствам данного метода так же относятся исключение фильтрации исходного сигнала и отсутствие необходимости использования частотных окон (windows).

Существуют и другие подходы к анализу сигналов ЭКГ, к примеру, наиболее популярный метод Wavelet-анализа.

3.2. Электроэнцефалография

В начале прошлого столетия группе исследователей, приоритет среди которых принято отдавать Гансу Бергеру, удалось записать электроэнцефалограмму (ЭЭГ), т.е. последовательность изменений электрического потенциала на поверхности кожи головы человека (рис. 3.4, 3.5). Изначально предполагалось, что можно установить связь между динамикой потенциалов и мозговой (в том числе – интеллектуальной, духовной) деятельностью. Последующие исследования показали, что ЭЭГ, в силу сложности структурно-функционального строения мозга, отражает в большей степени лишь общие функциональные состояния мозга, к при-

меру, различные уровни бодрствования, стадии сна, нарушения метаболизма или нарушения ритмостаза организма. Это все, несомненно, имеет очень большое значение для определения «нормы» функционирования организма, либо для диагностики потенциальных отклонений, как психического, так и соматического характера.

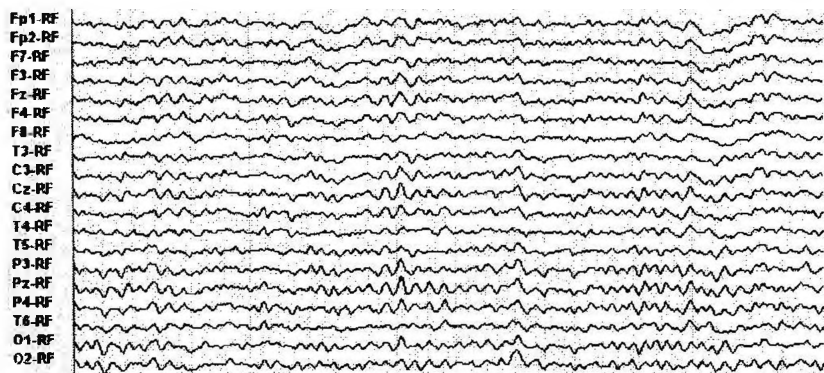


Рис. 3.4. Временная реализация ЭЭГ по 19 отведениям (участок записи)

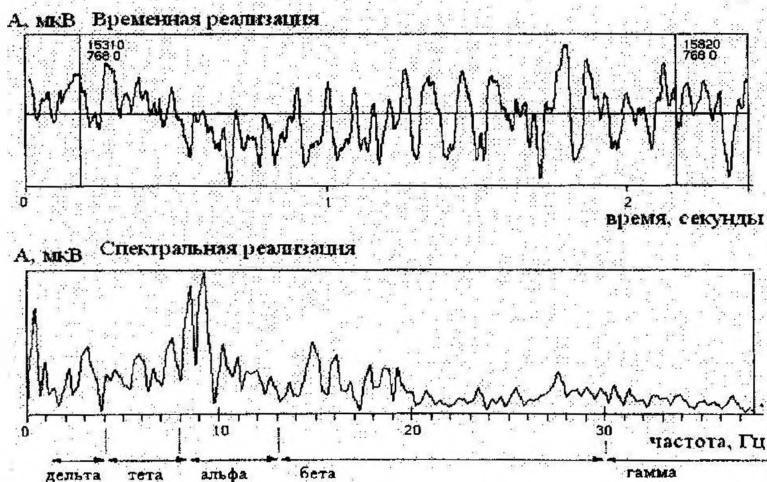


Рис. 3.5. Временная и спектральная реализация участка записи ЭЭГ для одного отведения

В целом, вопрос о происхождении ЭЭГ активности на сегодняшний день не имеет полного, корректного и однозначного решения.

Всю биоэлектрическую активность головного мозга человека можно разделить на две группы: *импульсную активность* и *суммарную медленную активность*.

Медленная активность делится на три основные группы: 1) вызванные потенциалы; 2) основная (спонтанная) электрическая активность; 3) медленные и сверхмедленные колебания потенциала.

Спонтанная (фоновая) электрическая активность головного мозга делится на три вида: регулярную (ритмическую) активность, характеризующуюся длинной серией тех или иных волн с незначительной вариацией их частоты; нерегулярную (аритмическую) активность состоящую из волн различной длительности и амплитуды и пароксизмальную активность, возникающую на фоне спонтанной активности в виде определенных групп высокоамплитудных волн и комплексов, амплитуда которых внезапно нарастает и спадает.

Регуляторная (ритмическая) активность. К ней можно отнести специфические колебания, возникающие спонтанно или при определенных условиях (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Амплитуда и частота ритмов головного мозга
по электроэнцефалографическим данным

Название	Частота, Гц	Амплитуда, мкВ	Особенности
Дельта-ритм	0,3–4	50–500	Ритм спящего человека, синусоидальный
Тета-ритм	4–8	10–30	Ритм полностью расслабленного состояния и перехода в состояние сна, наркоза; синусоидальный
Альфа-ритм	8–13	30–60	Синусоидальный; доминирующий в затылочных отделах мозга ритм бодрствующего человека; связан со способностью к абстрактному мышлению
Бета-1-ритм Бета-2-ритм	13–25 25–35	3–10	Апериодический; доминирует в лобных отделах; ритм бодрствования
Гамма-ритм	35–100	5–15	Спорадические колебания в состоянии бодрствования

Именно данный вид активности является наиболее конструктивным показателем, который можно использовать для корректной оценки регуляторных функций центральной нервной системы. Оценка амплитудно-частотных показателей данных периодов, как раз, будет отражать функциональное состояние мозга.

3.2.1. Регистрация электроэнцефалограммы (Съем ЭЭГ)

ЭЭГ регистрируют с помощью наложенных на кожную поверхность головы отводящих электродов, скоммутированных между собой и связанных с системой усилителей фиксируемых сигналов. Международная федерация обществ электроэнцефалографии приняла так называемую систему «10–20», позволяющую точно указывать расположение электродов (рис. 3.6). В соответствии с этой системой у каждого испытуемого точно измеряют расстояние между серединой переносицы (назионом) и твердым костным бугорком на затылке (инионом), а также между левой и правой ушными ямками. Возможные точки расположения электродов разделены интервалами, составляющими 10 или 20% этих расстояний на черепе. При этом для удобства регистрации весь череп разбит на области, обозначенные буквами: F – лобная, O – затылочная область, P – теменная, T – височная, C – область центральной борозды. Нечетные номера мест отведения относятся к левому, а четные – к правому полушарию.

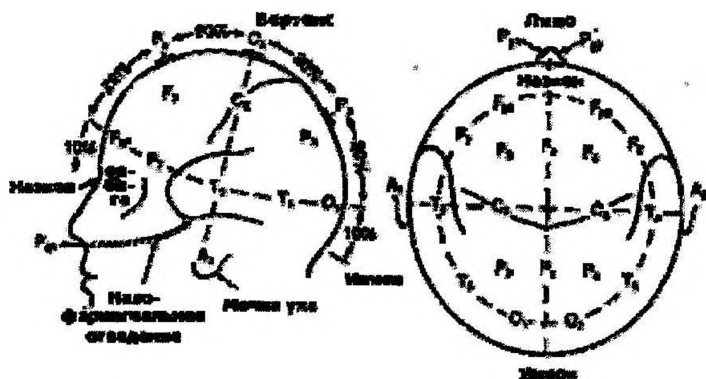


Рис. 3.6. Система «10–20». Расположение электродов на поверхности головы:

F – лобная часть; C – центральная; P – теменная; T – височная;

O – затылочная. Нечетные индексы – левая половина головы,

четные индексы – правая, Z – средняя линия

Как любые электрические потенциалы, ЭЭГ всегда измеряется между двумя точками. Существует два метода регистрации ЭЭГ: *биполярный* и *монополярный*.

При биполярном (рис. 3.7, а) отведении регистрируется разность потенциалов между двумя активными электродами. Этот метод применяется в клинике для локализации патологического очага в мозге, но он не

позволяет определить, какие колебания возникают под каждым из двух электродов и каковы их амплитудные характеристики. В психофизиологии общепринятым считается метод монополярного отведения. При монополярном (рис. 3.7, б) методе отведения регистрируется разность потенциалов между различными точками на поверхности головы по отношению к какой-то одной индифферентной точке. В качестве индифферентной точки берут такой участок на голове, на котором какие-либо электрические процессы минимальны, и их можно принять за ноль: обычно это мочка уха, затылок. В этом случае с электрода регистрируются изменения потенциала с определённого участка мозга.

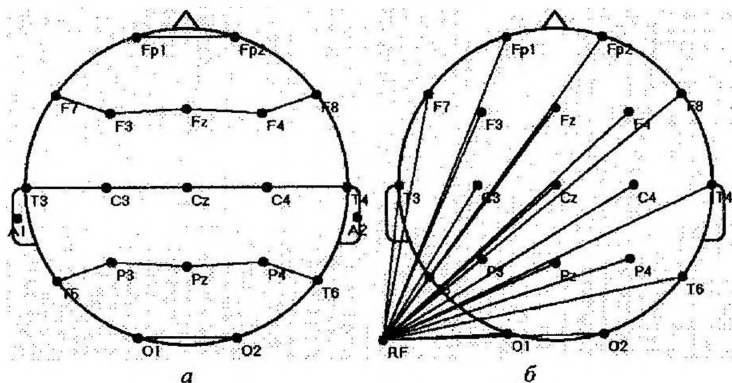


Рис. 3.7. Снятие ЭЭГ по 19 отведениям:
а – биполярный метод отведения; б – монополярный метод отведения

При записи ЭЭГ могут регистрироваться электрические процессы, не связанные с активностью мозга. Их называют артефактами. Артефакт - запись всякого постороннего процесса, не являющегося непосредственным выражением электрической активности головного мозга. Эти помехи накладываются на ЭЭГ и искажают ее.

Артефакты на ЭЭГ можно разделить по происхождению на две большие группы: физические (технические) и биологические (физиологические) артефакты. Физические артефакты возникают из-за нарушения технических правил эксплуатации ЭЭГ-установки, регистрации ЭЭГ и вследствие неисправности оборудования. Этот тип артефактов относительно легко устранить. Биологические артефакты обусловлены регистрацией функциональной активности других (помимо головного мозга) органов и систем организма: мышечных потенциалов; потенциалов мышц и проводящей системы сердца; потенциалов, связанных с движением глаз;

потенциалов, связанных с глотательными движениями; кожно-гальванического рефлекса. Биологические артефакты в большинстве случаев неустраняемы техническими средствами.

3.2.2. Анализ ЭЭГ

Количественная обработка ЭЭГ опирается на ряд методов, которые можно разделить на две категории. К первой относятся частотные и временные методы, ко второй – методы теории вероятностей и математической статистики. При анализе ЭЭГ, исходная запись разбивается на сегменты, которые принято считать условно стационарными. В узком смысле понятия стационарности соответствуют такие процессы, основные моменты n -мерного распределения которых остаются неизменными во времени при любых n , где n -число последовательных отсчетов ЭЭГ на участке оценивания. ЭЭГ-сигнал состоит из практически стационарных сегментов, «соединенных» быстрыми переходными процессами, такие сегменты называются квазистационарными.

Математической базой частотных методов анализа является преобразование Фурье, которое позволяет выделить ритмическую структуру сигнала. Кроме того, Фурье-анализ дает возможность определить ряд характеристик ЭЭГ, например, спектральную мощность, их соотношение в различных частотных диапазонах, пиковые частоты и т.д.

В системах временного анализа производится выделение характеристических точек сигнала ЭЭГ (нулевых, экстремальных, точек перегиба) и изучение их во времени.

Вероятностные методы анализа позволяют проводить статистическую обработку полученных результатов.

Таким образом, ЭЭГ, как один из основных показателей реакции нервной системы человека на внешние воздействия, целесообразно использовать для оценки влияния электромагнитных полей на человека.

Спектральный анализ ЭЭГ. Одним из наиболее распространенных способов анализа показателей электрической активности головного мозга является спектральный анализ, в частности расчет значений спектральной плотности мощности на заданных временных интервалах в различных частотных диапазонах. Спектральный анализ позволяет выявлять невидимые при визуальном анализе изменения общемозговой ритмики.

Оценка спектральной плотности мощности может выполняться методом преобразования Фурье, предполагающего получение спектра в области частот посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ). До

изобретения алгоритмов БПФ этот метод из-за громоздкости прямого вычисления дискретного преобразования Фурье практически не использовался. Предпочтение отдавалось другим методам, в частности, методу корреляционной функции (Блэкмена-Тьюки) и периодограммному методу.

Спектральная плотность мощности – функция, определяющая распределение по частотам среднеквадратичного значения временной последовательности.

Перед анализом, исходная запись ЭЭГ разбивается на участки, равной продолжительности, которые считаются условно стационарными (рис. 3.8), и затем для каждого ЭЭГ-отведения производится расчет значений спектральной мощности (рис. 3.9).

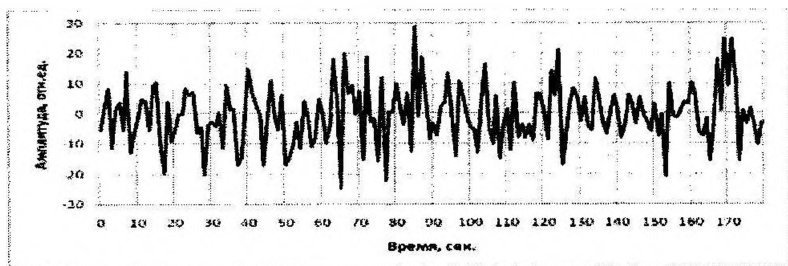


Рис. 3.8. Временная реализация трехминутного интервала записи ЭЭГ для одного отведения

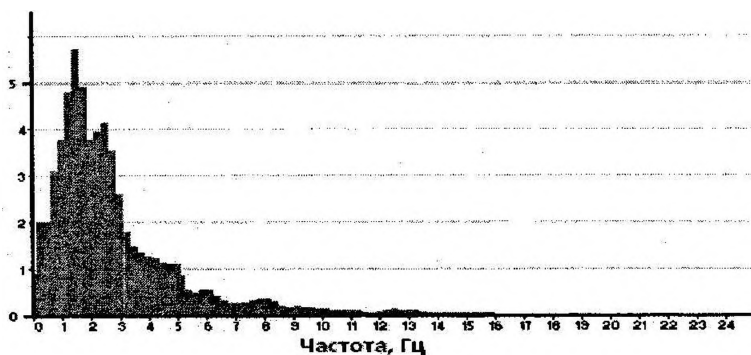


Рис. 3.9. Значения спектра мощности на выбранном временном интервале

Из полученных данных для дальнейшего анализа, как правило, выбираются определенные значения (минимумы, максимумы, среднее) на раз-

личных частотных интервалах. Выбор частотных интервалов опирается на условия поставленной задачи.

Корреляционный анализ. В конце 40-х – начале 50-х годов к анализу ЭЭГ начали привлекать методы авто- и кросскорреляции. Использование автокорреляционной функции является наиболее мощным средством выделения гармонических колебаний в случайном процессе. При этом можно находить числовые величины, характеризующие обрабатываемую ЭЭГ. С помощью автокорреляционной функции определяется доминирующий периодический процесс, его устойчивость, средняя частота и выраженность, а с помощью кросскорреляционной функции – степень сходства или связи двух ЭЭГ разных точек мозга, выделение периодических составляющих, общие для обоих ЭЭГ, наличие амплитудной или частотной асимметрии левого и правого полушария.

Корреляционный анализ – метод обработки статистических данных, заключающийся в изучении коэффициентов корреляции между переменными. При этом сравниваются коэффициенты корреляции между одной парой или множеством пар признаков, для установления между ними статистических взаимосвязей. Коэффициент корреляции или парный коэффициент корреляции в теории вероятностей и статистике – это показатель характера изменения двух случайных величин (показатель тесноты связи) и рассчитывается по формулам:

$$r = b_1 \frac{s_x}{s_y} = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{s_x s_y} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{s_x s_y};$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n s_x s_y};$$

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}}.$$

Для практических расчетов наиболее удобна последняя формула, т.к. по ней r находится непосредственно из данных наблюдений и на значении r не скажутся округления данных, связанные с расчетом средних и отклонений от них.

Коэффициент корреляции принимает значения на отрезке $[-1; 1]$, т.е. $-1 \leq r \leq 1$.

Чем ближе $|r|$ к единице, тем теснее связь. При $r = \pm 1$ корреляционная связь представляет линейную функциональную зависимость. При этом все наблюдаемые значения располагаются на прямой линии.

При $r = 0$ линейная корреляционная связь отсутствует. При этом линия регрессии параллельна оси Ox .

Если $r > 0$, то корреляционная связь между переменными называется *прямой*, если $r < 0$ – *обратной*. При прямой (обратной) связи увеличение одной из переменных ведет к увеличению (уменьшению) условной (групповой) средней другой.

После вычисления коэффициента корреляции производится сдвиг значений одного ряда, относительно значений другого (ряды данных ЭЭГ сдвигаются относительно рядов данных ЭМП на некоторое значение) и значение коэффициента вычисляется вновь. Таким образом, происходит построение кросскорреляционной функции

Когерентный анализ. Функция когерентности позволяет оценить синхронность биоэлектрических процессов при постоянстве фазовых отношений, также позволяет оценить степень взаимосвязи ритмических составляющих, регистрируемых в различных структурах мозга.

Когерентность (от лат. *cohaerens* – «находящийся в связи») – согласованность нескольких колебательных или волновых процессов во времени, проявляющаяся при их сложении. Колебания когерентны, если разность их фаз постоянна во времени и при сложении колебаний получается колебание той же частоты.

Функция когерентности является аналогом коэффициента корреляции в частотной области и отражает степень линейной взаимосвязи гармонических компонент рассматриваемых процессов. Чем ближе функция когерентности к единице на данной частоте, тем больше совпадение гармонических составляющих на этой частоте (рис. 3.10). Как правило, именно функция когерентности, а не взаимная спектральная плотность, используется в практических приложениях для анализа связанности процессов в частотной области.

Функция когерентности позволяет выявить степень связанности или взаимосвязанности электрических процессов мозга в разных его отделах и, таким образом, приблизиться к выяснению внутренних механизмов функциональной зависимости и обусловленности работы головного мозга как сложной системы. Здесь необходимо отметить, что по данным когерентности можно судить исключительно о линейных зависимостях электрических процессов и выявлять колебания потенциала, генерируемые общим источником.

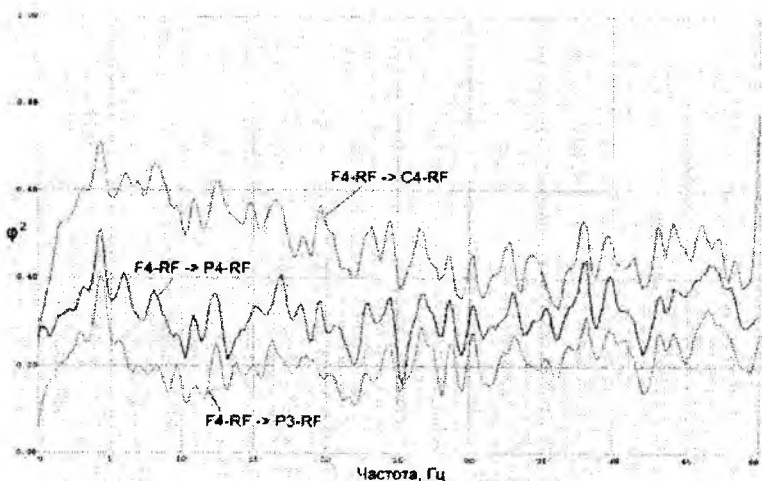


Рис. 3.10. Значение функции когерентности в диапазоне частот 0–50 Гц, между тремя парами отведений

Методику расчета функции когерентности можно представить следующим образом. Для каждой пары отведений ЭЭГ рассчитываются комплексные функции когерентности в рассматриваемом частотном диапазоне как нормированные кросс-спектры. Модуль такой функции (амплитуда когерентности – КОГ) характеризует степень сочетаемости колебаний в зависимости от частоты в выбранных отведениях; аргумент комплексной когерентности представляет собой фазовый сдвиг (ФС) соответствующих колебаний. Таким образом, функция когерентности рассчитывается как

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)},$$

где $0 \leq \gamma_{xy}^2(f) \leq 1$

$$\begin{aligned} |G_{xy}(f)| &= \sqrt{S_{xy}^2(f) + Q_{xy}^2(f)}, \\ G_{xx}(f) &= \sqrt{S_{xx}^2(f) + Q_{xx}^2(f)}, \\ G_{yy}(f) &= \sqrt{S_{yy}^2(f) + Q_{yy}^2(f)}. \end{aligned}$$

$S_{xx}(f)$, $S_{yy}(f)$ – спектральная плотность или спектр функций $X(t)$ и $Y(t)$,
 $S_{xy}(f)$ – взаимная спектральная плотность двух реализаций $X(t)$ и $Y(t)$.

Wavelet анализ. Большинство сигналов, встречающихся на практике, представлено во временной области, то есть сигнал есть функция времени. Таким образом, при отображении сигнала на графике одной из координат (независимой) является ось времени, а другой координатой (зависимой) – ось амплитуд. Получается амплитудно-временное представление сигнала. Для большинства приложений обработки сигнала это представление не является наилучшим. Во многих случаях наиболее значимая информация скрыта в частотной области сигнала. Частота сигнала находится при помощи преобразования Фурье. В результате преобразования Фурье сигнала, заданного во временной области, получается его спектральное представление. Вместо значений времени на оси абсцисс графика сигнала будут теперь отложены значения частоты, а ось ординат будет отображать амплитуду той или иной частоты в сигнале. Напомним, что преобразование Фурье дает частотную информацию, содержащуюся в сигнале, то есть говорит о том, каково содержание каждой частоты в сигнале. Однако в какой момент времени возникла та или иная частота, когда она закончилась – на эти вопросы ответ получить не удастся. В случае если требуется временная локализация спектральных компонент, необходимо обратиться к частотно-временному представлению сигнала.

Вейвлет-преобразование и относится как раз к этому типу преобразований. Оно обеспечивает частотно-временное представление сигналов. Пусть сигнал состоит из двух синусоид, существующих в разное время (рис. 3.11, а). Вначале в сигнале присутствует НЧ синусоида, затем – ВЧ. Вейвлет-преобразование такого сигнала представлено на рис. 3.11, б.

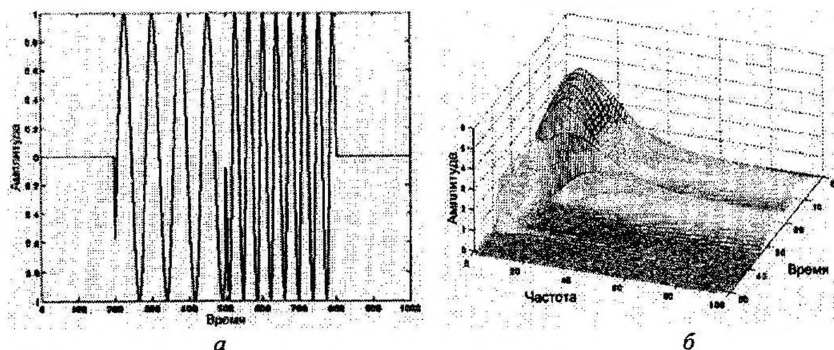


Рис. 3.11. Исходный сигнал (а) и результат его преобразования (б)

Говоря о вейвлет-преобразовании будем иметь в виду следующее. Пропустим сигнал через два фильтра – низкочастотный и высокочастотный (фильтры соединены параллельно). Фильтры вейвлет-преобразования должны удовлетворять жестким ограничениям – условию допустимости. Повторим эту процедуру для выхода низкочастотного фильтра, оставив выход высокочастотного фильтра неизменным. Так, если исходный сигнал содержал частоты до 1 000 Гц, то после первого этапа получим два сигнала 0–500 и 500–1 000 Гц, после второго этапа – три сигнала 0–250, 250–500 и 500–1 000 Гц и т.д. Эта операция называется декомпозицией. Декомпозиция продолжается какое-то число раз. В конечном счете, получается множество субсигналов, которое представляет исходный сигнал. Каждый субсигнал соответствует какой-то субполосе частот. Можно построить трехмерный график (рис. 3.12, *а, б*), отложив по одной оси время (t), по второй – частоту (f) и по третьей – амплитуду (A).

Таким образом можно увидеть, какие частоты присутствуют в каждый интервал времени.

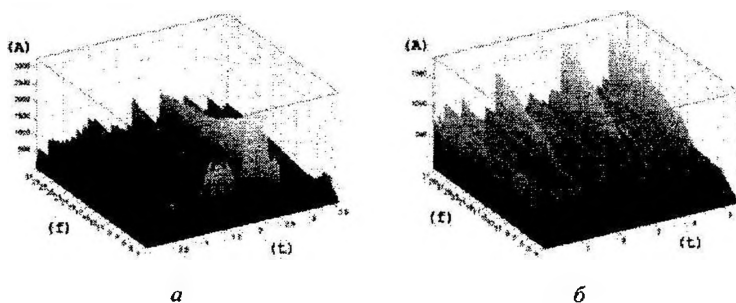


Рис. 3.12. Спектрограмма девятиминутной реализации сигнала:
а – КНЧ-фона; *б* – ЭЭГ-человека в диапазоне частот 0–16 Гц

Существует два класса вейвлет-преобразований: непрерывные и дискретные. В связи с этим различают непрерывный вейвлет-анализ и дискретный вейвлет-анализ. Основные приложения непрерывного вейвлет-анализа, это локализация и классификация особых точек сигнала, частотно-временной анализ нестационарных сигналов. Например, у таких сигналов, как музыка и речь, спектр радикально меняется во времени, а характер этих изменений – очень важная информация. Непрерывное вейвлет-преобразование также используется в медицине для анализа электрокардиограмм.

Непрерывное вейвлет-преобразование можно записать так:

$$W_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{a,b}^*(t) f(t) dt$$

Это выражение представляет собой свертку сигнала $f(t)$ с функцией $\psi_{a,b}(t)$ переводящую сигнал из временной в вейвлет-область с базисными функциями:

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

Здесь a и b представляют растяжения и сдвиги одной функции (материнской вейвлет).

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Владимирский Б.М., Сидякин В.Г., Темурьянц Н.А.* Космос и биологические ритмы. Симферополь: Изд-во Симфероп. ун-та, 1995. 206 с.
2. *Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 5: Электромагнитный фон Сибири / Отв. ред. М.В. Кабанов.* Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2001. 282 с.
3. *Колесник А.Г., Колесник С.А., Побаченко С.В.* Электромагнитная экология. Томск: ТМЛ-Пресс, 2009. 250 с.
4. *Поляков С.В.* Ионосферный альвеновский резонатор и его роль в электродинамике верхней атмосферы земли: Диссертация в виде научного доклада. Нижний Новгород, 1999. 84 с.
5. *Холодова Ю.А., Лебедева Н.Н.* Реакция нервной системы на электромагнитные поля. М.: Наука, 1975. 206 с.
6. *Колесник А.Г.* Волны в околоземной плазме. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. 222 с.
7. *Электромагнитные поля и здоровье человека / Под общ. ред. проф. Ю.Г. Григорьева.* М.: Изд-во РУДН, 2002. 178 с.
8. *Побаченко С.В., Пономарев А.В.* Влияние активации мобильных телефонов стандарта GSM на биоритмическую структуру электрогенеза мозга человека // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 3. С. 50–55.
9. *Методы математической обработки электроэнцефалограмм / Сост.: В.Л. Сахаров, А.С. Андреев.* Таганрог: Антон, 2000. 44 с.
10. *Радиотехнический комплекс диагностики и контроля параметров электромагнитного фона в канале Земля – ионосфера / Колесник А.Г., Колесник С.А., Нагорский П.Н., Шинкевич Б.М.* // Ионосферные исследования. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1997. С. 244–252.
11. *Программно-технический комплекс мониторинга естественной динамики функционального состояния организма человека / Бородин А.С., Колесник С.А., Побаченко С.В., Потахов П.Ю.* // Ионосферные исследования. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1997. С. 253–257.
12. *Сарычев В.Т.* Основы спектрального оценивания: Учеб.-метод. пособие. Томск: Томский государственный университет, 2009. 44 с.
13. *Отнес Р., Эноксон Л.* Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.
14. *Гольденберг Л.М. и др.* Цифровая обработка сигналов: Справочник. М.: Радио и связь, 1985. 312 с.
15. *Бендат Дж., Пирсол А.* Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
16. *Фестер Э., Ренц Б.* Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика, 1983. 305 с.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторная работа № 1.

Проведение синхронного мониторинга показателей электрической активности мозга человека и фоновых электромагнитных полей УНЧ-КНЧ диапазонов

Цель работы – познакомиться с понятием синхронного мониторинга. Ознакомится с комплексом мониторинга электромагнитного фона КНЧ-диапазона. Изучить понятие электроэнцефалографии и методов регистрации ЭЭГ. Получить временные ряды процессов вариаций спонтанной электрической активности головного мозга человека, а также синхронных по времени показателей шумановского и альфеновского резонанса.

Для корректного решения проблемы оценки влияния УНЧ и КНЧ вариаций полей окружающей среды на организм человека оптимальным представляется решение, связанное с организацией и проведением синхронных, сопряженных по времени измерений комплекса геофизических параметров и переменных состояния нейродинамической системы в режиме мониторинга. При этом в качестве индикатора внешнего воздействия целесообразно использовать показатели основной ритмрегулирующей системы организма человека и первичного акцептора внешних воздействий – нервной системы. Состояние последней можно выразить в параметрах электроэнцефалографии.

Для проведения мониторинга электромагнитного фона УНЧ-КНЧ диапазона используется измерительно-вычислительный комплекс, позволяющий производить прием и обработку электромагнитных сигналов в диапазоне частот от 0,1 до 40 Гц. В состав комплекса входят:

1. Штыревая антенна действующей высотой 5 м.
2. Высокочувствительный антенный усилитель с высоким входным сопротивлением типа УНИПАН-233-6.
3. Входной малошумящий режекторный фильтр частоты 50 Гц с ослаблением в полосе заграждения 40 дБ/окт.
4. Высокочувствительный усилитель с выходным активным фильтром нижних частот с частотой среза 35 Гц на базе анализатора спектра 01021 с ослаблением за полосой пропускания 20 дБ/окт. Затухание в полосе пропускания не более 0,5 дБ.
5. Активный фильтр нижних частот SM 26/11021, частота среза 31,5 Гц. Ослабление за частотой среза 24 дБ/окт. Остаточное затухание в

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Владимирский Б.М., Сидякин В.Г., Темурьянц Н.А. Космос и биологические ритмы. Симферополь: Изд-во Симфероп. ун-та, 1995. 206 с.
2. Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 5: Электромагнитный фон Сибири / Отв. ред. М.В. Кабанов. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2001. 282 с.
3. Колесник А.Г., Колесник С.А., Побаченко С.В. Электромагнитная экология. Томск: ТМЛ-Пресс, 2009. 250 с.
4. Поляков С.В. Ионосферный альвеновский резонатор и его роль в электродинамике верхней атмосферы земли: Диссертация в виде научного доклада. Нижний Новгород, 1999. 84 с.
5. Холодов Ю.А., Лебедева Н.Н. Реакция нервной системы на электромагнитные поля. М.: Наука, 1975. 206 с.
6. Колесник А.Г. Волны в околоземной плазме. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. 222 с.
7. Электромагнитные поля и здоровье человека / Под общ. ред. проф. Ю.Г. Григорьева. М.: Изд-во РУДН, 2002. 178 с.
8. Побаченко С.В., Пономарев А.В. Влияние активации мобильных телефонов стандарта GSM на биоритмическую структуру электрогенеза мозга человека // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 3. С. 50–55.
9. Методы математической обработки электроэнцефалограмм / Сост.: В.Л. Сахаров, А.С. Андреев. Таганрог: Антон, 2000. 44 с.
10. Радиотехнический комплекс диагностики и контроля параметров электромагнитного фона в канале Земля – ионосфера / Колесник А.Г., Колесник С.А., Нагорский П.Н., Шинкевич Б.М. // Ионосферные исследования. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1997. С. 244–252.
11. Программно-технический комплекс мониторинга естественной динамики функционального состояния организма человека / Бородин А.С., Колесник С.А., Побаченко С.В., Потахов П.Ю. // Ионосферные исследования. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1997. С. 253–257.
12. Сарычев В.Т. Основы спектрального оценивания: Учеб.-метод. пособие. Томск: Томский государственный университет, 2009. 44 с.
13. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.
14. Гольденберг Л.М. и др. Цифровая обработка сигналов: Справочник. М.: Радио и связь, 1985. 312 с.
15. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
16. Фестер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика, 1983. 305 с.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторная работа № 1.

Проведение синхронного мониторинга показателей электрической активности мозга человека и фоновых электромагнитных полей УНЧ-КНЧ диапазонов

Цель работы – познакомиться с понятием синхронного мониторинга. Ознакомится с комплексом мониторинга электромагнитного фона КНЧ-диапазона. Изучить понятие электроэнцефалографии и методов регистрации ЭЭГ. Получить временные ряды процессов вариаций спонтанной электрической активности головного мозга человека, а также синхронных по времени показателей шумановского и альфеновского резонанса.

Для корректного решения проблемы оценки влияния УНЧ и КНЧ вариаций полей окружающей среды на организм человека оптимальным представляется решение, связанное с организацией и проведением синхронных, сопряженных по времени измерений комплекса геофизических параметров и переменных состояния нейродинамической системы в режиме мониторинга. При этом в качестве индикатора внешнего воздействия целесообразно использовать показатели основной ритмрегулирующей системы организма человека и первичного акцептора внешних воздействий – нервной системы. Состояние последней можно выразить в параметрах электроэнцефалографии.

Для проведения мониторинга электромагнитного фона УНЧ-КНЧ диапазона используется измерительно-вычислительный комплекс, позволяющий производить прием и обработку электромагнитных сигналов в диапазоне частот от 0,1 до 40 Гц. В состав комплекса входят:

1. Штыревая антенна действующей высотой 5 м.
2. Высокочувствительный антенный усилитель с высоким входным сопротивлением типа УНИПАН-233-6.
3. Входной малошумящий режекторный фильтр частоты 50 Гц с ослаблением в полосе заграждения 40 дБ/окт.
4. Высокочувствительный усилитель с выходным активным фильтром нижних частот с частотой среза 35 Гц на базе анализатора спектра 01021 с ослаблением за полосой пропускания 20 дБ/окт. Затухание в полосе пропускания не более 0,5 дБ.
5. Активный фильтр нижних частот SM 26/11021, частота среза 31,5 Гц. Ослабление за частотой среза 24 дБ/окт. Остаточное затухание в

полосе пропускания не более 0,5 дБ/окт. Максимальное затухание в полосе задержания 60 дБ.

6. Аналого-цифровой преобразователь L154.

7. Персональный компьютер, который производит автоматическое управление аппаратурного комплекса по регистрации КНЧ сигналов.

Принятые антенной и усиленные высокочувствительным усилителем электрические сигналы, соответствующие действующему в данный момент времени электромагнитному фону, а именно, вертикальной компоненте электромагнитного поля, поступают на последовательно соединенные два фильтра нижних частот, назначение которых ограничить полосу частот сигналов, поступающих с антенны исследуемой полосой частот до 40 Гц. Сигнал на вход фильтров нижних частот поступает после прохождения через узкополосный заградительный фильтр частоты 50 Гц с целью максимального использования динамического диапазона приемно-измерительного тракта. Оцифрованные сигналы, соответствующие аналоговым с выхода приемного тракта, поступают на дальнейшую цифровую обработку в ПК.

Для проведения мониторинга состояния нейродинамической системы организма человека используется электроэнцефалограф «Мицар-ЭЭГ 03/35-201», позволяющий регистрировать параметры спонтанной электрической активности головного мозга человека (рис. 1). Основные характеристики энцефалографа «Мицар-ЭЭГ 03/35-201»: ЭЭГ каналы – 19; разрядность АЦП – 12; полоса частот – 0,1–35 Гц; подавление помехи 50 Гц – >20 дБ; ослабление синфазного сигнала – >80 дБ; входное сопротивление – >200 Мом; входной диапазон – 1 000 мкВ; напряжение шума в полосе 0,5–15 Гц – <2 мкВ.

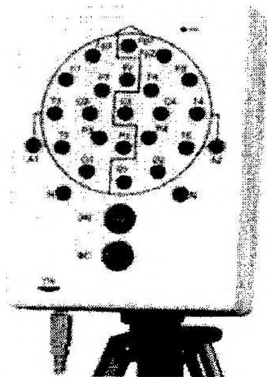


Рис. 1. Электроэнцефалограф «Мицар-ЭЭГ 03/35-201»

В ходе работы необходимо провести экспериментальную серию для последующей оценки воздействия внешних факторов на спонтанную электрическую активность и на сопряженность вариаций фоновых КНЧ электромагнитных полей и показателей ЭЭГ человека. Для этого необходимо на ЭЭГ-комплексе «Мицар-ЭЭГ 03/35-201» произвести регистрацию ЭЭГ, монополярно, по 19 отведениям по стандартной системе «10-20». Полученную временную реализацию сохранить на жесткий диск персонального компьютера для последующего анализа.

При выполнении работы используется стандартное программное обеспечение электроэнцефалографического комплекса «Мицар-ЭЭГ 03/35-201» – «ЭЭГ-2000».

Общая блок-схема комплекса синхронного экологического мониторинга приведена на рис. 2.

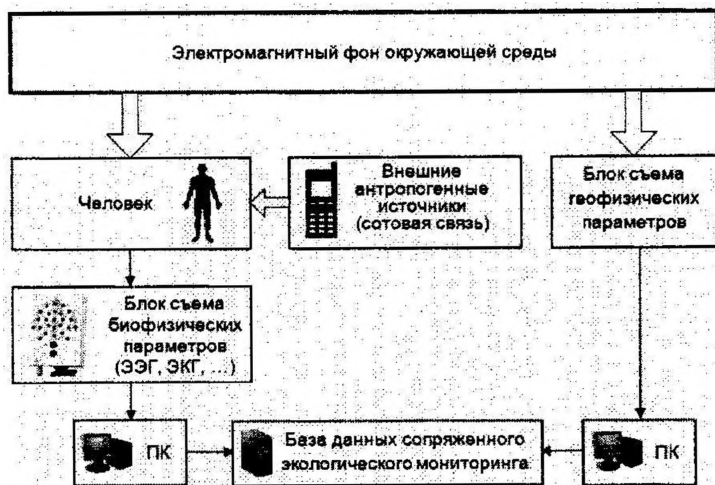


Рис. 2. Блок-схема сопряженного экологического мониторинга

Временная структура проведения экспериментальной серии для оценки воздействия внешнего антропогенного фактора (сотового телефона) приведена на рис. 3.



Рис. 3. Структура временной реализации экспериментальной серии

В результате выполнения работы должны быть получены сопряженные по времени ряды данных ЭЭГ и фоновых КНЧ электромагнитных полей.

Контрольные вопросы:

1. Что называется мониторингом?
2. Какие системы отражают функциональное состояние живых систем? Какими методами осуществляется их мониторинг?
3. Что называется электроэнцефалограммой? Что она отражает?
4. Что называется системой «10-20»? Какие существуют способы регистрации ЭЭГ?

Лабораторная работа № 2.

Оценка воздействия техногенных факторов (сотовых телефонов) на вариации параметров ЭЭГ человека

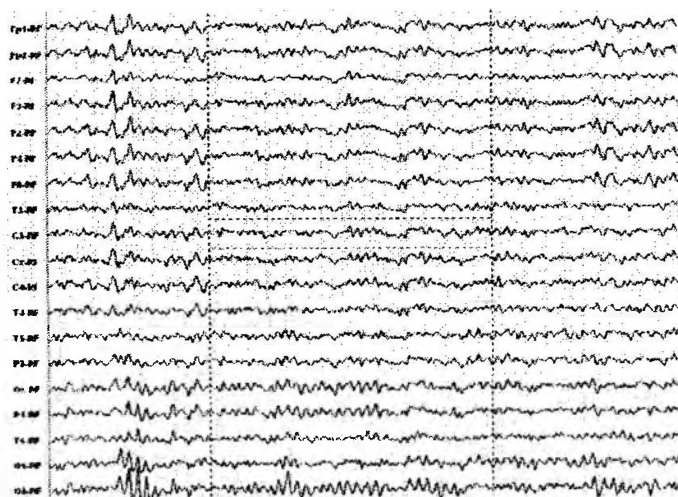
Цель работы — определить по данным мониторинговых исследований степень влияния (техногенного фактора) активации поля мобильного радиотелефона на спонтанную электрическую активность мозга человека.

Для оценки воздействия внешнего фактора данного типа на ЭЭГ активность целесообразно применить методы спектрального Фурье анализа, так как они позволяют достаточно просто и наглядно представить результаты вычислений, и проанализировать полученные данные. Для вычисления спектра ЭЭГ-сигнала рекомендуется использовать быстрое преобразование Фурье (БПФ).

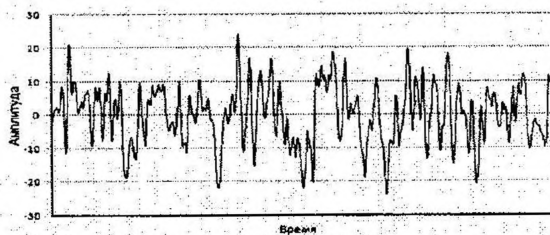
Временные ряды данных, полученные в ходе выполнения предыдущей работы, выбираются из базы данных сопряженного экологического мониторинга, с учетом частоты дискретизации разбиваются на участки равной продолжительности, которые можно считать условно-стационарными (рис. 1, а). На полученных участках, для каждого отведения (рис. 1, б), производится преобразование Фурье, в результате чего получается ряды амплитудных значений частот для каждого отведения (рис. 1, в). Затем производится сравнение полученных значений для различных временных интервалов, строятся гистограммы (линейные графики) для каждого ЭЭГ отведения.

Расчеты можно производить с помощью любого (по личностным предпочтениям: Excel, Origin, Statistica и др.) прикладного пакета. Приветствуется написание собственных программ, реализующих алгоритм.

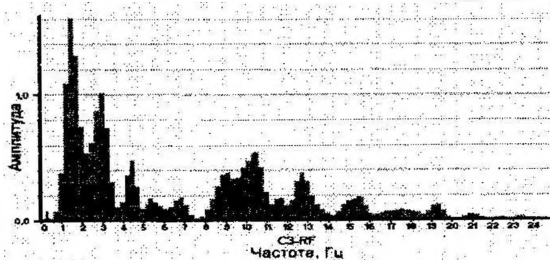
По результатам проделанной работы сделать вывод о влиянии внешнего техногенного фактора на динамику параметров ЭЭГ активности.



a



б



в

Рис. 1. Использование спектрального Фурье преобразования при анализе ЭЭГ:
a – временная реализация ЭЭГ по 19 отведениям, разбитая на условно-стационарные участки; *б* – временная реализация выбранного для анализа участка ЭЭГ;
в – значения спектров

Контрольные вопросы:

1. Что относится к техногенным источникам электромагнитных полей?
2. Какие эффекты возникают при воздействии электромагнитной энергии?
3. Какие методы анализа ЭЭГ существуют? В Чем их суть?
4. Какие особенности существуют при анализе ЭЭГ?

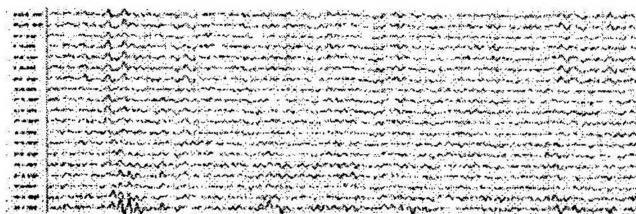
Лабораторная работа № 3.

Оценка влияния вариаций ЭМП альфеновского и шумановского диапазонов на вариации параметров ЭЭГ человека

Цель работы – определить по данным мониторинговых исследований степень влияния текущих амплитудно-частотных параметров фоновых ЭМП (диапазона альфеновского и шумановского резонансов) с амплитудно-частотными параметрами ЭЭГ активности.

При оценке степени влияния изменения параметров ЭМП различных частотных диапазонов на параметры ЭЭГ активности целесообразно применять корреляционный анализ, так как он позволяет оценить степень воздействия одного процесса на другой.

Из базы данных сопряженного экологического мониторинга выбираются данные мониторинга функционального состояния организма человека (данные ЭЭГ, рис 1, а) и соответствующие им по времени данные мониторинга электромагнитного фона КНЧ диапазона (данные ЭМП, рис 1, б).



а



б

Рис. 1. Исходные временные реализации данных: а – ЭЭГ; б – ЭМП

Данные ЭЭГ и ЭМП разбиваются на условно-стационарные участки (рис. 2, а, б).

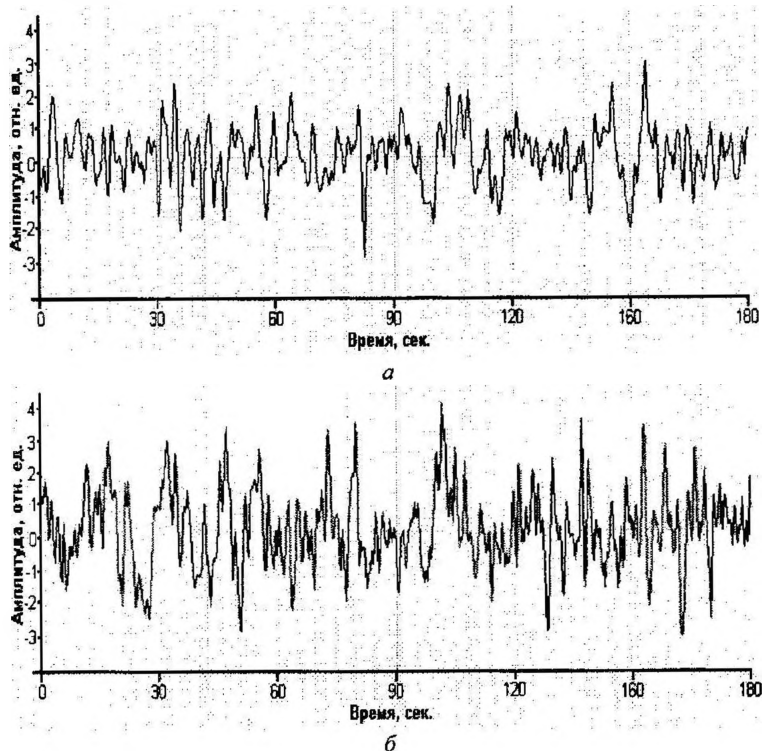


Рис. 2. Выбранные для анализа временные ряды значений: а – ЭЭГ; б – ЭМП

Затем производится спектральное преобразование, и выбираются необходимые частотные диапазоны для вычисления значения спектральной мощности (рис. 3, а, б).

При оценке уровней сопряженности параметров ЭЭГ человека и фоновых ЭМП целесообразно использовать частотные диапазоны, соответствующие основным ритмам головного мозга (альфа, бета-1, дельта, тэта и т.д.), и частотные диапазоны, соответствующие уровням изменения параметров основных естественных электромагнитных полей КНЧ - диапазона (1–4, 7–9, 12–15 Гц). Данная процедура выполняется для всех временных интервалов. Далее происходит построение кросскорреляционной функции путем вычисления коэффициентов и сдвигом одного ряда

данных относительно другого, фиксируются максимумы и соответствующие им временные задержки (лаги, рис. 4).

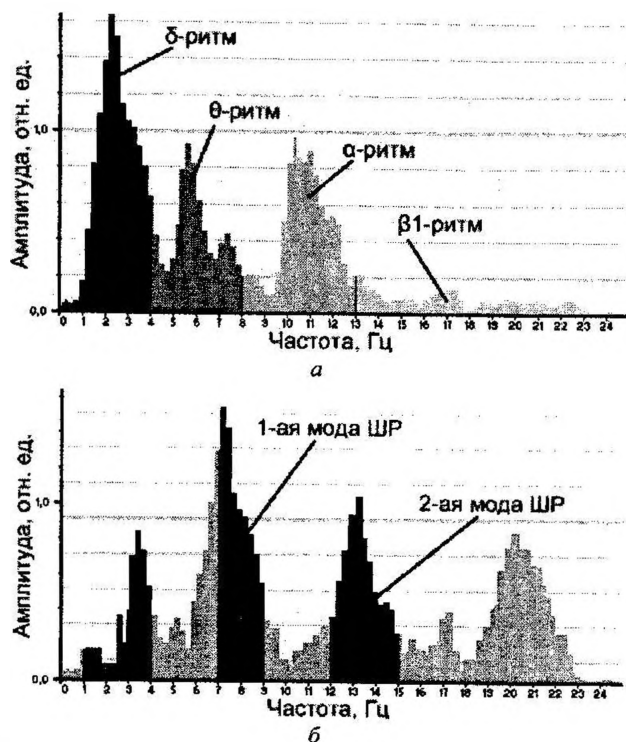


Рис. 3. Значения спектральной мощности на выбранных временных интервалах для:
а – ЭЭГ; б – ЭМП

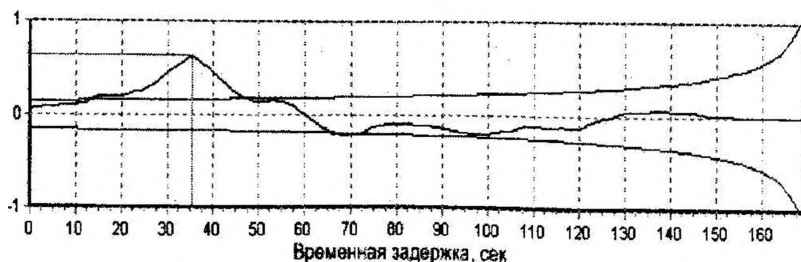


Рис. 4. Функция кросскорреляции с найденным максимальным значением

Полученные результаты расчетов заносятся в таблицу:

Интервал анализа	Наименование отведения																		
	1) Fp1-RF	2) Fp2-RF	3) F7-RF	4) F3-RF	5) Fz-RF	6) F4-RF	7) F8-RF	8) T3-RF	9) C3-RF	10) Cz-RF	11) C4-RF	12) T4-RF	13) T5-RF	14) F3-RF	15) Oz-RF	16) P4-RF	17) T6-RF	18) O1-RF	19) O2-RF
1																			
2																			
3																			
...																			

На основе полученных результатов кросскорреляционного анализа, сделать выводы по степени влияния выбранных параметров электромагнитного фона на активность электроэнцефалограммы человека. Выявить и обосновать наиболее существенные переменные, определяющие текущее состояние сопряженности.

Контрольные вопросы:

1. Как осуществляется мониторинг электромагнитного фона?
2. Какие глобальные околоземные резонаторы существуют? Какую роль они играют?
3. Как производится расчет кросскорреляционной функции?
4. Какие параметры используются при расчете коэффициентов кросс-корреляционной функции?

РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

С.В. Побаченко, А.В. Пономарев

**СОПРЯЖЕННЫЙ МОНИТОРИНГ
БИОФИЗИЧЕСКИХ
И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
ЭКОЛОГИИ**

*Учебно-методическое
пособие*



ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ