

Раздел III

Результаты

биомагнитных исследований

Хотя в большинстве обзоров по современному биомагнетизму авторы делят материал преимущественно по органам, продуцирующим те или иные МП (кардио-магнетизм, нейромагнетизм, пнеумомагнетизм и т. д.), мы считаем, что кроме этого (уже ставшего традиционным) подразделения необходимо группировать данные по механизму генерации МП. Исходя из такого принципа, мы можем сказать, что большую часть биомагнитных данных составят МП, создаваемые переменными токами биообъектов, как фоновыми, так и вызванными различными стимулами. Зарождается ветвь биомагнетизма, которая призвана изучать МП, связанные с постоянными или с очень медленно меняющимися токами биомагнитного происхождения. И наконец, исследуются МП включений в биосистему, которые имеют естественное, или искусственное происхождение. Последнее направление тесно связано с изучением магнитных свойств биологических тканей.

Поскольку большинство биомагнитных данных получено на человеке, мы будем в тех разделах, где это уместно, излагать прежде всего результаты антропомагнетизма, а затем зоомагнетизма, с учетом возрастных особенностей объектов исследований.

Глава 3

Магнитные поля переменных токов

Эта глава включает в себя основные результаты по современному биомагнетизму. Хотя принято начинать изложение результатов с МКГ и с известной первой работы Баула и Макфи 1963 г., мы считаем, что правильнее начинать с МП электрических рыб, поскольку МП, возникающие при разряде их электрического органа, являются наиболее сильными и поскольку только для этих ЭМП экспериментально доказана биологическая значимость [44]. Несмотря на общебиологическое значение результатов и относительную легкость регистрации МП, этот раздел биомагнетизма почти не изучался.

Далее по величине биомагнитного сигнала следует расположить МП нерва, возникающее при его раздражении. Исторически этот раздел современного биомагнетизма, связанный с переменными токами биообъекта, появился, по нашим сведениям, в тридцатых годах нашего века [27, 29]. Можно назвать имена нескольких исследователей, изучавших это явление.

Только третий по нашему счету раздел - кардиомагнетизм - стал своеобразным рекламным образцом, ярко демонстрирующим удобство описываемого бесконтактного метода исследования некоторых функций человека и животных. Пожалуй, важную роль здесь сыграло то обстоятельство, что впервые объектом биомагнитных исследований стал здоровый человек. Такие исследования легко было осуществлять в физических лабораториях. Первые успехи современного биомагнетизма были достигнуты под знаменем кардиомагнетизма. Можно назвать десятки имен и несколько стран, связанных с развитием этого раздела биомагнетизма. Несколько удивляет то обстоятельство, что лидерами здесь выступают не кардиологи (как хотелось бы!), а представители других дисциплин, для которых внедрение нового метода в кардиологическую клинику является достаточно трудной задачей.

Магнитомиография, магнитоокулография и магниторетинография пока представлены единичными работами, свидетельствующими лишь о возможности регистрации МП, возникающих при работе поперечно-полосатых мышц, глазного яблока или сетчатки глаза.

Наконец МЭГ, регистрирующая МП головного мозга, чаще всего человека, является вершиной сегодняшнего этапа современного биомагнетизма. Это направление представлено наибольшим числом работ и развивается наиболее интенсивно как в количественном, так и в качественном отношении. В последнем случае имеется в виду то обстоятельство, что непрерывно увеличивается число нейробиологов, исследующих МЭГ.

Общей задачей многих обсуждаемых направлений биомагнетизма является чисто диагностическая цель: определить размеры и локализацию источников регистрируемых МП. Особенно ярко эта цель проявляется при изучении

патологических процессов очагового характера в сердце и в головном мозге.

Достаточно очерчена эта цель при изучении вызванных МП головного мозга человека, особенно при варьировании параметров стимула.

На пути достижения отмеченных целей исследователи биомагнитных явлений часто сопоставляют результаты, полученные ими, с данными других методов исследования, чаще всего с электрографическим методом. Преимущества бесконтактного метода исследования физиологических функций в некоторых случаях достаточно ярко выявляются при сравнении биомагнитного метода с электрофизиологическим.

3.1. Магнитные поля электрических органов рыб

Кроме упомянутой ранее работы Д. Деви, нам известна только краткая публикация В. Р. Протасова с со-авт. [43], посвященная регистрации МП разряда электрического сома с помощью ИД (несколько тысяч витков на ферритовом стержне) и усилителя биопотенциалов. Запись магнитного и электрического (с помощью электродов, опущенных в аквариум) сигналов осуществляли на киноплёнке с экрана осциллографа.

Показано, что во время электрического разряда, возникающего у рыбы в различных поведенческих ситуациях, можно зарегистрировать МП, проходящее через воду, стенки аквариума и медный экран, в который был заключен ИД, воспринимающий МП порядка 10^{-12} Тл в звуковом диапазоне частот.

Поскольку конкретные параметры регистрируемых МП рыб не были указаны в данной публикации, мы решили повторить подобные опыты совместно с Протасовым В. Р. и Сухановым А. С.

Электрического сома (*Malapterurus electricus*) помещали в стеклянный аквариум, на удаленные противоположные стенки которого в воду опускали электроды, предназначенные для регистрации ЭКГ человека.

МП рыбы, возникающее при механическом раздражении сома стеклянной палочкой, регистрировали с помощью градиентометра с двумя МОН (рис. 12), расположенного на одном уровне с аквариумом, но на разном расстоянии от него. Электрический и магнитный сигналы записывали одновременно

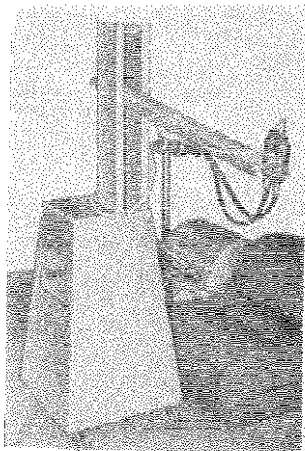


Рис. 12. Градиентометр на основе двух датчиков МОН, закрепленный на деревянной стойке

Черные шланги представляют собой световоды, идущие от лампы (ближе к стойке) к датчикам, расположенным на переднем плане. Белым цветом обозначены провода, идущие от датчиков к электрическому блоку системы

МКГ.

Амплитуда исследуемого магнитного сигнала рыбы зависела от расстояния между датчиком и аквариумом, где находился электрический сом. На рис. 14 видно, что наибольший сигнал (более 100 пТл) возникает при расстоянии в 1 см между датчиком и передней стенкой стеклянного аквариума.

Этот магнитный сигнал постепенно уменьшался при увеличении расстояния до 22 и 49 см. На расстоянии 90 см мы уже не могли регистрировать МП, возникающее при механическом раздражении рыбы.

Таким образом, различными магнитометрами можно бесконтактным способом в воздушной среде регистрировать магнитную составляющую электрического сигнала электрических рыб. Мы считаем, что магнитометрический метод можно применять при изучении

на магнитографе фирмы «ТЕАС».

Следует заметить, что зафиксировать МП рыбы мы могли только при определенном положении объекта относительно МОН. Когда рыба располагалась головой к датчику при ее механическом раздражении, мы регистрировали МП (рис. 13, Б). Если же рыба поворачивалась боком к датчику, то мы на том же расстоянии от аквариума не регистрировали МП (рис. 13, А, В), хотя электрический сигнал одной и той же амплитуды возникал при каждом механическом раздражении рыбы.

Как видно из рисунка, частотные характеристики электрических разрядов сома не воспроизводились в наших опытах, так как система была настроена на регистрацию медленных процессов, связанных с

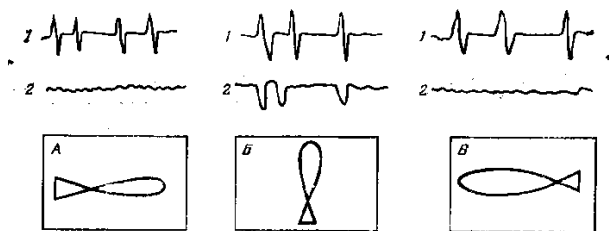


Рис. 13. Зависимость электрических (1) и магнитных (2) сигналов при механическом раздражении электрического сома от положения рыбы относительно магнитометра

А, Б, В — различные положения рыбы

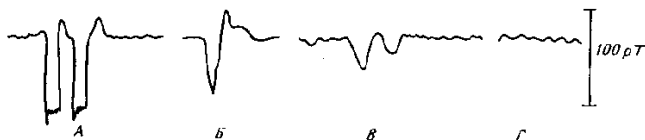


Рис. 14. Зависимость величины магнитного сигнала при механическом раздражении электрического сома от расстояния от магнитометра до аквариума

А — 1 см; Б — 22 см; В — 49 см; Г — 90 см

ЭМП электрических рыб в их естественных условиях для выяснения биологической значимости различных параметров этих ЭМП. В лабораторных условиях, поскольку хорошо известно строение электрического органа, изучение МП электрических рыб поможет решить общую биомагнитную проблему, связанную с поиском источника регистрируемых МП.

Появившееся сообщение [67] о возникновении МП у неэлектрических рыб (щуки) во время болевого раздражения рыбы и ее передвижения под феррозондовым датчиком скорее можно отнести к МП, связанным с постоянными токами. Очень большой сигнал, достигающий 6 нТл, близок к пороговому восприятию некоторыми биосистемами искусственных МП [61]. Такого рода серьезные и принципиальные данные требуют многократных и всесторонних подтверждений, хотя роль ЭМП биологического происхождения в жиз-

ни некоторых видов рыб можно считать доказанной [44].

Уместно заметить, что расчеты, на которые ссылаются в работе [67], свидетельствуют о возникновении МП порядка 20 пТл на расстоянии 10 см от электрической рыбы длиной 20 см и площади ее поверхности 314 см^2 при ее электрическом разряде. Эти расчеты близки к полученным нами результатам

Таким образом, исследование магнитной составляющей электрического разряда некоторых рыб может решать важные проблемы электромагнитной экологии и некоторые общие задачи современного магнетизма. Именно этот раздел, изучающий МП, порождаемые переменными токами, чаще всего связан с магнитобиологией.

3.2. Магнитные поля нервного импульса

Как сказано в исторической части настоящей монографии, идея регистрации МП нервного импульса была порождена морфологическими исследованиями [27, 29, 55] еще в тридцатых годах нашего столетия.

Используя ИД, три независимые группы исследователей (одна в СССР и две в США) сумели зарегистрировать МП изолированного нерва лягушки при его электрическом раздражении. Однако изменение направления распространения импульса по нерву не приводило к изменению полярности сигнала. Отсюда возникало предположение, что наблюдавшийся эффект объясняется не продольными токами, а поперечными. Кроме того, имелось подозрение, что наблюдавшийся сигнал объясняется емкостной связью нерва с ИД

Такое подозрение приводило и к крайнему взгляду об отсутствии МП отдельного нервного волокна и нервного нерва, так как в эксперименте М. А. Хведелшзе с соавт. [59] не удалось зарегистрировать такое МП ни вокруг нерва, ни вокруг мышцы или сердца лягушки. Авторы на основании анализа биоэлектрической активности нерва пришли к выводу, что суммарный магнитный поток нерва по своему абсолютному значению приближается к нулю. Исходя из этого, считалось более перспективным изучение излучений биообъекта в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра электромагнитных колебаний.

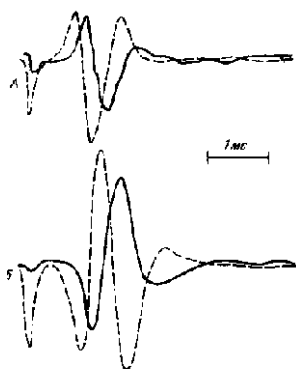


Рис. 15. Одновременная регистрация магнитного поля (сплошные линии) и электрического потенциала (пунктирные линии) изолированного нерва лягушки при проксимальном (А) и дистальном (В) электрическом раздражении нерва [Виксво и др., 1986]

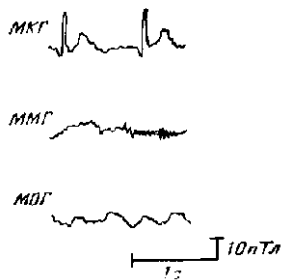


Рис. 16. Запись магнитокардиограммы (МКГ), магнитомиограммы (ММГ) и магнитоэнцефалограммы (МЭГ) у человека с помощью магнитометра оптического накачки

Однако, используя современную технику регистрации МП, которая описана в соответствующем разделе настоящей книги, Д. Виксво с соавт. [145] удалось, как они пишут в заглавии статьи, «впервые» зарегистрировать МП нервного импульса как удовлетворяющее требованиям полярности.

Измерения проводили у изолированного седалищного нерва лягушки-быка при электрическом раздражении его дистального или проксимального конца относительно миниатюрного тороида, надетого на нерв. Усреднение около 1000 ответов в диапазоне до 1 кГц обеспечило отношение сигнал/шум до 30 - 40. Основной пик магнитного сигнала достигал 125 пТл. Полярность изменялась в зависимости от того, какой - дистальный или проксимальный - конец нерва подвергали электрическому раздражению (рис. 15).

Таким образом, существование МП вокруг нерва при его раздражении можно считать доказанным, хотя работы по этой проблеме проводятся пока только в одной исследовательской группе. От этого коллекти

3.5. Магнитные поля сердца

В СССР, кроме первых работ (шестидесятые годы) по регистрации МКГ индукционными датчиками, выполненных воронежскими медиками, с 1976 г. исследования проводятся в ИВНД и НФ АН СССР совместно с ИЗМИРАН СССР и Институтом дефектологии АПН СССР. Кроме МКГ, этой группе исследователей удалось зарегистрировать ММГ, МОГ и МЭГ человека (см. рис. 16).

В последние годы в публикациях по МКГ стали явно преобладать работы, в которых авторы пытаются провести клинический анализ МКГ, что говорит о тенденции к переходу от чисто экспериментальных работ к внедрению МКГ в клинику на правах самостоятельного метода исследования деятельности сердца. Широкое применение метода в клинической практике задерживается из-за отсутствия точной электромагнитной модели сердца. Поэтому дальнейшее развитие клинической электро- и магнитокардиографии приняло эмпирический характер и пошло по пути сопоставления морфологии кривых с клиническими и патологоанатомическими данными. Несколькими группами сравнивалась нормальная МКГ с ЭКГ, полученной с помощью отведения либо по Франку, либо по обычной 12-электродной системе отведения.

Волокна сердечной мышцы деполяризуются синхронно, из-за чего сердце генерирует самое сильное флуктуирующее поле с максимумом немного меньше 10^{-10} Тл у здорового испытуемого. Некоторые сердца с отклонением от нормы генерируют более сильные поля.

Очевидно, лучше всего такие поля будут улавливаться и регистрироваться вблизи больших масс синхронно возбуждающихся и пульсирующих клеток сердечной мышцы. Она продуцирует потенциалы, которые хорошо регистрируются электрокардиографическим методом. ЭКГ является графическим отображением процессов возбуждения и восстановления, возникающих в сердечной мышце. ЭКГ здорового сердца отличается ярко выраженной цикличностью и относительной стабильностью формы кривой от цикла к циклу. Однако метод ЭКГ не может нам дать информации о целом ряде процессов, происходящих в организме и о которых будет сказано ниже. Это побуждает к разработке и внедрению в клиническую практику

дополнительного метода диагностики—магнитокардиографии.

Результаты первых опытов по регистрации МКГ опубликовали Баул и Макфи [83]. Они регистрировали флукутирующее МП возле груди пациента при одновременной регистрации потенциалов на электрокардиографе. Их детектор состоял из двух больших идентичных катушек (длина—30 см, диаметр - 9 см, число витков - 2 млн), наложенных друг на друга и включенных друг навстречу другу, чем предотвращались помехи и фоновые флукутации МП. Внутри катушек вставлялись ферритовые стержни. Магнитный сигнал от расположенного вблизи сердца в виде разности напряжений в двух катушках регистрировали с помощью электрической схемы. Были получены вполне различные МКГ, подобные ЭКГ, но уровень шумов был очень большим. Максимальная величина поля в комплексе QRS достигала примерно $5 \cdot 10^{-12}$ Тл. Шумы на входе усилителя и несовершенство фильтрации фона не позволили полностью реализовать потенциальные возможности магнитокардиографии.

Р. Штратбюккер и др. [142] в пестве датчика МП использовали тороидальную катушку из 17640 витков, охватывающую изолированное сердце морской свинки. Осуществлялась одновременная запись ЭКГ (по трем каналам) и МКГ. Было исследовано соотношение между магнитной и электрической записью. Эксперименты показали существование МП сердца и его связь с электрической активностью миокарда. Эти опыты в дальнейшем не повторяли.

Эксперименты с регистрацией МКГ у человека в экранированной камере проводили и в СССР Ю. Д. Сафоновым с соавт. [46] и другие. В этих опытах пациента и детектор помещали внутрь экранированной камеры с железными стенками толщиной 1,5см, которые в 10 раз ослабляли фоновое МП.

Эти ранние работы были направлены главным образом на доказательство существования заметного МП, связанного с электрической активностью сердца, и возможности его регистрации с помощью стандартных электрических методов. Были разработаны специальные программы ЭВМ для одновременного сравнения информационного содержания ЭКГ и МКГ.

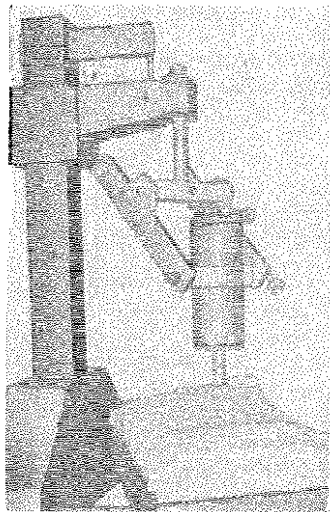


Рис. 17. Общий вид биомагнитной системы на основе СКВИДа

С 1984 г. в Институте ВНД и НФ АН СССР применяется биомагнитная система на основе СКВИДа для измерения сверхслабых МП сердца и мозга человека. Система состоит из криогенной вставки, двух блоков электрошин, стекло-пластикового криостата и специально изготовленной из немагнитных материалов платформы, способной перемещать криостат в трех плоскостях относительно изучаемого объекта (рис. 17).

Регистрация производится на магнитограф фирмы ТЕАС после предварительной фильтрации сигнала следящим гребенчатым фильтром и узкополосным РС - фильтром в тракте согласующего усилителя. АЧХ всего канала практически линейная в диапазоне от 0,5 до 50 Гц. Полный шум системы составляет 50 фТл/Гц^{1/2}, что позволяет работать с сигналом меньше 10⁻¹³Тл.

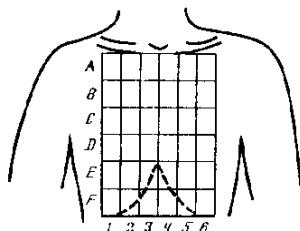
Чувствительный элемент системы снабжен градиен-тометром второй производной, сбалансированным до 10⁻⁵, т. е. датчик практически не чувствителен к однородным полям, создаваемым отдаленными источниками, что позволяет работать в неэкранированном помещении. Криостат для жидкого гелия, емкостью 5 л, нуждается в регулярной заправке при расходе 20 мл/ч. Недостаток гелия или быстрое его испарение приводили к дополнительным помехам.

Датчик располагали на расстоянии до нескольких сантиметров от поверхности тела при записи МКГ и нескольких миллиметров при регистрации МЭГ. Для картирования поля МКГ и МЭГ использовали специальные координатные шаблоны.

Калибровку магнитометра производили при помощи рассчитанного источника МП. Перед каждым опытом регистрировали магнитный шум. После записи сигнал выводился на самописец для визуального анализа или обрабатывался на мини-ЭВМ фирмы «Лабтам».

Для регистрации магнитных явлений с поверхности тела используются разные системы отведений. Выбор последних зависит от задач, которые ставятся при каждом данном исследовании.

Рис. 18. Карта для регистрации МКГ человека в области груди



Как мы указывали, на 1-м совещании по биомагнетизму была предложена 36-позиционная система отведения для стандартизации МКГ-исследований. Она представляла из себя 6 равностоящих столбцов и строк. Правый и левый края груди ограничиваются прямыми, соединяющими середины ключиц и реберных дуг. Верхний край ограничивается линией, соединяющей середины ключиц. Нижний край ограничивается прямой, соединяющей середины реберных дуг так, чтобы мечевидный отросток находился между квадратами D3, D4 (рис. 18).

Используя описываемую систему отведений, большинство исследователей измеряют компоненту МП, перпендикулярную торсу.

Такая система прекардиального картирования, являясь по своему значению наиболее универсальной, в настоящее время наиболее удовлетворяет требованиям максимального приближения к клинической диагностике, поскольку с ее помощью констатируется основное большинство необходимых для кардиологической диагностики показателей: ритм, позиция сердца, варианты нормы, функциональное состояние проводящей системы и патология сократительного миокарда,

В связи с понятием «отведение» целесообразно упомянуть об одной из модификаций метода магнитокардиографии - вектор-

магнитокардиографии (ВМКГ), что является записью во времени вектора МП, связанного с электрической активностью сердца.

Как известно, векторная характеристика (например, при электровекторкардиограмме) имеет физический смысл только в том случае, если электрическое поле сердца может быть описано при помощи эквивалентного дипольного генератора. Применительно к ВМКГ простейший эквивалентный генератор - это магнитный диполь с переменной ориентацией и величиной момента, расположенный в геометрическом центре сердца.

Для определения магнитного диполя объемного источника детектируемой системой отведения должны быть выполнены 3 ортогональных измерения. Имеются 2 основных геометрических построения датчика прибора для выполнения этих измерений: 1) XYZ система отведения, состоящая из детекторных петель, расположенных в трех взаимно перпендикулярных направлениях; 2) однопозиционная система отведения—такая конфигурация измерительного устройства, при котором поле измеряется на передней сагиттальной оси датчиком, состоящим из трех петель, расположенных в одной и той же позиции и ориентированных перпендикулярно друг к другу.

В работе [137] обсуждается вопрос: насколько близки эти системы отведения к идеальной системе отведения МКГ. Для решения этого вопроса авторы смоделировали туловище человека с помощью плексигласовой емкости, заполненной раствором NaCl с применением пористых материалов. Элементарные дипольные источники в сердечной мышце моделировались с помощью трех пар медных шариков, ориентированных перпендикулярно друг Другу. Они перемещались механизмом, управляемым снаружи. Магнитное поле записывалось дважды для каждого диполя в 25 позициях. Помимо XYZ и однопозиционной системы отведения исследованы 10 улучшенных отведений. Результаты такого моделирования показали, что на направление чувствительности отведения к МП изменение радиуса петли или расстояния, на котором проводились измерения, оказывало лишь слабое влияние. Решающее же влияние на чувствительность в большинстве отведений оказывало расположение датчика относительно источников поля. Работы, подобные этой,

позволяют сделать вывод о возможности улучшения поля отведения с использованием усовершенствованной отводящей системы. Но для исследований, не требующих детального изучения магнитного вектора сердца, вполне пригодна однопозиционная система отведения ВМКГ. Модельные эксперименты и сравнение регистрирующей системы с применяемыми в ВКГ выявили ряд ее достоинств: простоту реализации, хорошую ортогональность, симметрию.

Почти все авторы работ в области магнитокардиографии, изучающие амплитуды зубцов МКГ взрослого человека в норме, указывают на значительные колебания интенсивностей магнитных полей сердца.

Крайние значения амплитуд зубцов МКГ в пТл следующие: P - 4 - +7, Q —7 - +98, R - 300 - +110, S 0 - +50, T - 32 - +28, U - 0 - +15. Знак «-» указывает на отрицательный зубец, а знак «+» — на положительный зубец.

Как видно, вариабельность амплитуд зубцов МКГ выше, чем вариабельность амплитуд зубцов ЭКГ в норме у взрослого человека. При этом полосы частот при регистрации как МКГ, так и ЭКГ примерно одинаковы.

Выбор полосы частот регистрирующей аппаратуры зависит прежде всего от целей, которые ставил перед собой экспериментатор. Так, при исследовании МКГ взрослых здоровых людей одни авторы [137] выбрали диапазон частот регистрации от 0,05 - 100 Гц, а другие [125] - 0,03-40 Гц.

В нашей работе по выявлению магнитокардиографической нормы не было замечено изменения информативности МКГ при полосе частот 0.1 - 40 Гц. Для других задач, например, для регистрации сдвигов S — T сегмента на МКГ. преимущества магнитокардиографии очевидны: нижняя частота регистрируемых сигналов для магнитометра может быть около 0 Гц, верхняя - 1 кГц. Указано, что при регистрации ЭКГ и МКГ с одной точки у испытуемого со здоровым сердцем наблюдалась задержка МКГ на 25 - 30 мс относительно ЭКГ, в то время как у испытуемого с больным сердцем оба процесса были синхронны.

В работе [79] описано сравнение спектров МКГ и ЭКГ человека. До 4 Гц на спектре МКГ авторы наблюдали сигналы, не видимые на спектре ЭКГ. При дозированной физической

нагрузке наблюдалось расширение спектров как на МКГ, так и на ЭКГ до 25 Гц. Наиболее простое описание источников, генерирующих изображенные на картах картины, представляет диполь тока, расположенный в неограниченном проводнике. Согласно этой модели источника линии изомагнитного поля, обозначающие его нулевое значение, должны быть перпендикулярны токовым на изопотенциальной карте.

Каждая карта относится к определенному моменту времени сердечного цикла. Детали карт просты, что делает их удобными для сопоставления как экспериментальных, так и моделированных электрических потенциалов и напряженностей магнитных полей. Замечено Петерсом с соавт. [85], что карты, построенные по данным со стороны спины, по своим характеристикам более подобны дипольным, чем снятие со стороны грудины. Этого следовало ожидать, так как спина более удалена от источников магнитного поля сердца, чем стенка грудной клетки.

Еще один способ отображения электромагнитной активности сердца был предложен группой исследователей из Бразилии [143]. Способ состоит в нанесении на оси x и y графика амплитуд магнитного и электрического сигналов и отражает, таким образом, амплитудные и фазовые соотношения обоих процессов как замкнутого цикла. Результат этой записи был назван электромагнитокардиограммой (ЭМКГ). ЭМКГ можно регистрировать с помощью обычного магнитометра, электрокардиографа и запоминающего осциллографа. Так как ЭКГ и МКГ особенно чувствительны соответственно к радиальным и тангенциальным токам сердца, одновременная их запись будет содержать наиболее полную информацию о деятельности сердца.

В работе (Стюарт [65]) показано, что, рассматривая ось инверсии, например T и R зубцов, при анализе магнитокардиографических карт, у одних испытуемых можно наблюдать совпадение линии инверсии R и T зубцов, у других - образование угла между этими осями [85].

Говоря предварительно об особенностях МКГ до сравнения с ЭКГ (отведения Франка), можно отметить [116], что QRS комплекс чаще является трехфазным в МКГ, чем в ЭКГ, P волна максимальна около атриа и быстро уменьшается в амплитуде при

движе датчика в любом направлении; S—T смещения относительно больше в МКГ, чем в ЭКГ; T волны имеют тенденцию к противоположной полярности по отношению к QRS комплексу более часто в МКГ, чем в ЭКГ. а иногда бывают двухфазными.

Высокоразрешающий кардиомагнетизм - это совокупность методических приемов, позволяющих сконцентрировать интерес экспериментаторов на изучении:

1. Активности проводящей системы сердца [система волокон Гиса — Пуркинье).
2. Патологической задержки желудочковой деполяризации (поздние потенциалы).

Напомним, что миокардиальная ткань состоит и) двух типов клеточных элементов: 1) обычных мышечных клеток, функция которых - сократительная (предсердия. желудочки); 2) специализированных мышечных клеток, функция которых - генерация и проведение возбуждения в сердце. К такому типу мышечных клеток относятся: синоартериальный узел, атриовентрикулярный узел, волокна Гиса—Пуркинье. Единственной структурой в сердце, которую можно рассматривать как однородное волокно, являются относительно редко ветвящиеся волокна системы Гиса—Пуркинье.

До настоящего времени изучение потенциалов проводящей системы осуществлялось с помощью регистрации электрограмм-кривых, получаемых при прямом отведении, когда хотя бы один электрод помещен непосредственно на наружной или внутренней поверхности сердца. Разработка такого метода позволила в клинических условиях уточнить механизм ряда нарушений ритма, ранее исследовавшийся только в условиях эксперимента, проводить более тонкую дифференциальную диагностику аритмий и блокад. Однако электрография проводящей системы не безразлична для больного и может давать все те же осложнения, которые наблюдаются при катетеризации правых отделов сердца. Поэтому принципиально важна с методической точки зрения попытка регистрации электрической активности проводящей системы сердца без инвазивного вмешательства. При специальной обработке стандартной ЭКГ можно выделить активность, отражающую изменения потенциала общего ствола. Однако по информативной ценности полученные результаты пока не могут заменить обычной методики.

Фарелл с соавт. [143] с помощью СКВИДа регистрировали изменения МП сердца, связанные с активацией пучка Гиса и прекращающиеся при начале деполяризации желудочка Система измерения имела самый слабый шум из всего действующего биомагнитного оборудования - $6 \cdot 10^{-15}$ Тл/Гц. Для использования преимущества предельно низкого инструментального шума испытуемый, лежащий на деревянной кровати в немагнитной одежде, не получал еду и питье в течение 2 часов перед экспериментом, так как желудочная активность создает заметное усиление общего шума Деревянная кровать могла быть аккуратно передвинута вдоль деревянных рельсов, установленных на полу. Конструкция системы, поддерживающая СКВИД, позволяла подводить датчик к груди с точностью, большей чем ± 1 см. Измеряемой величиной являлся вертикальный компонент МП в точках, лежащих в горизонтальной плоскости. Наблюдения проводились в 49 точках по одной в каждой ячейке сетки, центрированной около мечевидной кости.

Система обработки данных располагалась в 100 м от камеры и включала ЭВМ MLS-11 с памятью 32К, с гибким диском, телетайпом, аналого-цифровым преобразователем. Сигналы усреднялись по 100 сердечным сокращениям для каждого из 49 положений детектора. Запуск усреднения мог быть осуществлен, используя R или Q зубцы ЭКГ. Для ряда испытуемых предварительно с помощью фронтальной и латеральной грудной рентгенографии были локализованы сосуды сердца.

Полученные результаты сводили в детализированные карты, которые затем анализировали. Авторам удалось показать, что магнитная регистрация, хотя и технически сложная, дает два преимущества для изучения проводящей системы сердца: 1) возможность хорошо записывать активность в полосе частот, расширенной вплоть до постоянных токов; 2) обеспечивать более точную степень локализации в изучении проводящей системы сердца при картировании.

Неконтактная клиническая регистрация поздних потенциалов сердца особо желательна, так как она может быть ценным индикатором при риске внезапной смерти. Больные, страдающие желудочковой аритмией или ишемией миокарда, обнаруживали отсроченную активацию желудочков, как это установлено на

основании записей, полученных путем отведения от эпикарда или с помощью катетера. Это специфическое» нарушение активации может быть причиной возникновения опасных для жизни желудочковых тахоаритмий.

Эрне и соавт. [85], используя магнитокардиографию высокого разрешения, первые записи с анализом $S-T$ сегмента на больных сделали в экранированной камере. Электрические и магнитные измерения выполнялись одновременно.

Для регистрации ЭКГ высокого разрешения использовали все возможные комбинации из 4 грудных электродов. При этом общий шум этого канала регистрации при полосе 0,1 Гц - 300 Гц был меньше 0,4 мкВ. Сигналы от ЭКГ низкого разрешения предназначались для запуска аппаратуры усреднения в полосе 0,1 - 140 Гц. Магнитные измерения были выполнены СКВИД-магнитометром с 5-сантиметровым датчиком в диаметре. Полоса частот этого канала — 0,5 Гц - 250 Гц. Чтобы уменьшить нагрузку на пациентов, каждое из 6 магнитных отведений определяли в течение 300 с.

Описываемый метод характеризует пути технического усовершенствования метода МКГ, но существуют проблемы, связанные с особенностями источника МКГ. Сюда относятся не только патологические изменения сердца взрослого человека, но и регистрация МКГ у плода и у новорожденных детей а также изучение МКГ у животных. Последнее направление может явиться теоретической основой МКГ человека и послужить практическим целям ветеринарии

Магнитокардиограмма плода человека впервые записана [120] в 1974 г. Датчик СКВИД-градиометра располагался выше живота матери над сердцем плода без какого-либо физического контакта с матерью. Магнитные измерения делались в окружении с низким уровнем магнитного шума без какого-либо экранирования. Важно, чтобы мать не имела каких-либо ферромагнитных материалов в одежде.

Электронное оборудование, необходимое для обеспечения работы измерительного прибора, располагалось вблизи пациента, а регистраторы - на расстоянии нескольких метров, чтобы избежать магнитной помехи.

Регистрация МКГ плода является важным дополнительным методом изучения развития плода в теле матери и контроля за его

функциональным состоянием. Это связано, во-первых, с тем, что электрический сигнал сердца матери затрудняет выделение фетальной ЭКГ, а иногда делает невозможным такую процедуру, тогда как быстрое убывание магнитного сигнала с расстоянием обеспечивает регистрацию детектирующей катушкой только самого сильного близлежащего источника, которым в данном случае является сердце плода.

Приемлемое отношение сигнал/шум в МКГ плода позволяет успешно решить задачу по длительному автоматизированному слежению за частотой сердечных сокращений плода, что до сих пор не удавалось.

Было замечено [118], что МКГ плода регистрируется в тот период (между 26-й и 30-й неделей развития), когда электрический сигнал сердца плода по неясным причинам резко ослабляется, а магнитный сигнал не меняет своей амплитуды.

МКГ шестидневных мальчиков была зарегистрирована в Университете г. Хельсинки [120]. Измерялся компонент магнитного поля, перпендикулярный грудной клетке, с помощью СКВИД-градиентометра вне экранированного помещения. Обращают на себя внимание значительные отличия в морфологии МКГ новорожденных и морфологии МКГ взрослого человека. Амплитудные значения МКГ новорожденных отличаются от МКГ взрослого человека значительно больше чем отличается неонатальная ЭКГ от ЭКГ взрослого человека.

Магнитокардиограмма животных. Д. Коен с соавг. в 1971 г. регистрировали МКГ у собак в магнитоэкранированной камере в процессе записи постоянных токов МКГ препарированных животных [100].

Постоянные токи повреждения в мышце сердца связаны с локальными повреждениями миокарда при острой ишемии, инфаркте, перикардите. В этом случае в сердечной ткани появляется некротический участок, который в электрическом смысле представляет собой «немую» зону. Наличие постоянной разности потенциалов между здоровой и некротизированной тканью и вызывает токи повреждения. Эта область представляет собой генератор, имеющий дипольную структуру. По своей структуре он подобен генератору при обычном распространяющемся возбуждении сердца, однако, в отличие от последнего, не находит отражения на ЭКГ, так как

интенсивность тока изменяется во времени очень медленно.

Вставляя лист картона между грудиной и сердцем анестезированной собаки и измеряя затем МКГ и ЭКГ одновременно, исследователи экспериментально определили вклад дипольного элемента генератора тока и вклад объемных токов в МКГ.

Альбрехт и соавт. в 1982 г., изучая МКГ кролика, вынимали сердце из грудной клетки животного и вращали его в разных направлениях [79].

Лейфер и соавт. в 1983 г. изучали вклад реполяризации предсердий и активности системы Гиса—Пур-кинье в вектормагнитокардиограмму собак ($P-R$ участок) [85].

Каждое животное при этом наркотизировали и подвергали трахеотомии, чтобы иметь возможность помещать магнитометр непосредственно поверх перикарда. R зубец электрограммы, записанной с помощью вживленных в правое предсердие электродов, запускал аппаратуру усреднения магнитных сигналов. После проведения контрольных экспериментов внутривенно вливали медикаментозные препараты, вызывая существенное удлинение интервала $P-R$ и атриовентрикулярную блокаду второй степени. Авторы сделали вывод, что наклоненные участки $P-R$ сегментов нч МКГ отражают также и начальную стадию реполяризации предсердий.

Нужно признать, что МКГ животных изучена удивительно мало, что можно объяснить удаленностью физических лабораторий (где расположены магнитометры) от вивариев (где расположены животные). В ближайшее время можно ожидать значительный прогресс в этой области биомагнетизма.

Для сравнения ЭКГ и МКГ производится их одновременная запись с испытуемых, находящихся в сидячем, лежащем или стоячем положениях. Для регистрации ЭКГ используются классические, грудные, модифицированные по Франку отведения. Для отведения МКГ исследователи применяют несколько способов сканирования области грудной клетки. Финские исследователи используют сетку из 36 квадратов, накладывающуюся спереди на грудную клетку испытуемого, и из 8 квадратов на спину испытуемого. В США используют сетку, сторона которой 2,5 - 5 см. Мы в своих исследованиях применяли сетку в 16 квадратов, располагаемую на передней

стороне грудной клетки испытуемого. ЭКГ регистрировалась в полосе частот 0,02 - 140 - 200 Гц, МКГ—0 - 40 Гц. Датчик МКГ располагали на расстоянии 2—3 см от кожного покрова над каждым квадратом.

Финские исследователи изучали изменчивость МКГ у нормальных испытуемых и установили критерии нормальности. Найдено несколько отведений от передней области груди, при которых магнитокардиографический сигнал наиболее информативен [122].

В экспериментах нашей группы совместно с ИЗМИРАН с помощью МОН была проведена одновременная регистрация МКГ с записью ЭКГ в трех стандартных отведениях. Установлено, что наибольшее сходство с МКГ имеет ЭКГ II стандартного отведения. При визуальном сравнении легко обнаружить, что соотношение временных параметров при магнитной и электрической регистрации идентично (особенно для желудочного комплекса), т. е. возникновение зубцов на МКГ и ЭКГ происходит синхронно. Это совершенно естественно, так как МП, регистрируемое магнитометром, обусловлено той же причиной, а именно: протеканием ионов в живом организме, что и регистрируется на ЭКГ. Поэтому МКГ и ЭКГ имеют примерно одинаковую форму. Было показано, что при определенных ориентациях оси катушек магнитометра, напряжение, наведенное в тороидальном чувствительном элементе, имеет форму первой производной по времени от ЭКГ.

Однако наблюдаются и существенные различия между этими двумя способами регистрации электромагнитной активности сердца. Различны изменения фаз и амплитуды отдельных зубцов ЭКГ и МКГ. Так, для МКГ соотношение величин зубцов T и R составило 20%, а для ЭКГ (II) - 41%. Очевидно, эта разница обусловлена различием в физических основах регистрации ЭКГ и МКГ.

Результаты анализа МКГ и сравнения с ЭКГ нормальных испытуемых на основании литературных источников приводят к следующим выводам:

- 1) по внешнему виду МКГ похоже на ЭКГ (те же зубцы) и по крайней мере не менее информативна;
- 2) для каждого зубца и комплекса МКГ получена информация:
а) об области максимальной выраженности, б) амплитудах

зубцов, в) о форме и знаке зубцов;

3) отмечено влияние падения веса испытуемого на МКГ (для этой ситуации МКГ оказалась более чувствительной, чем ЭКГ) и изменение МКГ данных в зависимости от положения испытуемых.

Анализ МКГ при заболеваниях сердца был проведен в США на 25 больных, в Финляндии на 41 пациенте и во Франции на 140 человеках.

Исследовали МКГ испытуемых со следующими заболеваниями сердца: миокардиальный инфаркт, грудная жаба, нарушение внутрисердечного проведения, желудочковая гипертрофия. Эксперименты показали, что: 1) у каждого испытуемого наблюдались МКГ изменения, 2) при инфаркте переднего отдела сердца МКГ отражает изменения в активности перегородки, расстройства интрамурального проведения или аномалии *T* зубца, не видимые на ЭКГ, 3) при инфаркте заднего отдела сердца ЭКГ более информативна, чем МКГ, 4) МКГ гораздо более информативна в определении ранней гипертрофии с нарушением внутри-сердечной проводимости, связанной с инфарктом миокарда, 5) МКГ позволяет зарегистрировать сдвиг *S—T*-сегмента, вызываемый «токами поражения», что не удается зарегистрировать с помощью ЭКГ ввиду наличия поляризации электродов и гальванического спин-эффекта [122].

Магнитокардиография обладает рядом потенциальных преимуществ перед электрокардиографией:

магнитометры безопасны (они не соприкасаются с телом пациента), обеспечивают быстрое получение данных, но самое существенное, МКГ, по мнению специалистов, позволяет получить некоторую дополнительную информацию о деятельности сердца (как здорового, так и больного). Это информация следующего характера.

1. МП сердца менее подвержено искажениям, чем электрические сигналы, снимаемые электрокардиографом. Исследователи отмечают большую локализацию измеряемых магнитных полей. Это допускает лучшую «фокусировку» прибора на выбранную область.

2. Воспроизводимость и повторяемость МКГ зубцов говорит о том, что они носят не случайный характер, а свидетельствуют о колебании разности потенциалов сердца в течение систолы и диастолы.

3. МКГ позволяет определить направление токов, генерируемых сердцем. Форма МКГ существенно зависит от положения детектора по отношению к телу пациента. Векторный характер МКГ является их большим преимуществом.

4. МКГ регистрируют и стационарные эффекты, в частности, постоянные МП, вызываемые так называемыми «токами поражения», возникающими в аневризмах желудочков. Эти поля обычно изменяют ЭКГ на интервале между концом комплекса *QRS* и началом зубца *T*, т. е. сегмент *S—T*. Потенциалы, порождаемые этими токами, настолько малы по сравнению с большими и изменчивыми потенциалами поверхности кожи, что их нельзя зарегистрировать электрокардиографическим методом. Генераторы этих слабых потенциалов расположены очень далеко от поверхности кожи, и их регистрация затрудняется ввиду наличия сильных локальных эффектов, таких, как поляризация электродов и контактная разность потенциалов между электродами и телом пациента. К тому же стандартная ЭКГ обычно имеет частоту среза порядка 0,1 Гц. Поэтому постоянные потенциалы обычно измеряли непосредственно на поверхности сердца при вскрытии грудной клетки подопытных животных, где величина этих потенциалов гораздо больше, чем на поверхности кожи.

На основании проведенных экспериментов удалось собрать обширный материал для обоснования взаимосвязи между появлением токов поражения и смещением *S—T*-сегмента, отражающим деполяризацию обоих желудочков. В экспериментах на собаках, у которых искусственным сжатием коронарной артерии вызывали инфаркт миокарда, были с помощью МКГ показаны смещения *S—T*-сегмента и базовой линии. По положению базовой линии можно было измерять уровень постоянного МП, вызванного токами поражения.

В связи с этим выявилось новое направление исследований: сравнение МКГ здоровых и больных пациентов, перенесших сердечные заболевания. Так, в лаборатории сердечных заболеваний медицинского факультета университета Хельсинки с помощью СКВИДа изучались МКГ 24 здоровых людей и 31 пациент с различными нарушениями сердечной деятельности. Так называемые предсердечные МКГ напоминали обычные ЭКГ с 12 отведениями, но несли и дополнительную информацию в

сравнении со стандартными ЭКГ. МКГ у пациентов с различными заболеваниями отличались друг от друга, однако малое число случаев и записей в различных положениях не позволили сделать каких-либо однозначных выводов. Различия между ЭКГ (с 12 отведениями) и МКГ состояли главным образом в разнице относительной чувствительности этих методов регистрации к различным фазам генерируемых сердечных ЭДС. Например, величина смещения S— T-сегмента (в отношении к амплитуде QRS-комплекса) была больше на МКГ, что, по-видимому, объясняется большим «эффектом близости», присущим магнитокардиографии. Исследователи поэтому полагают, что она может оказаться более ценным клиническим методом диагностики сердечных заболеваний, особенно в тех случаях, когда они вызываются первичными нарушениями процесса реполяризации миокарда.

5. Важен тот факт, что МКГ можно регистрировать бесконтактно и в некоторых случаях на расстоянии до 7 см от поверхности тела. Причем на качество регистрации не влияет заполнитель между датчиком и источником МП, лишь бы он был немагнитный. Это объясняется тем, что МП остается непрерывным при переходе через границы раздела разных сред (магнитная проницаемость тела и воздуха примерно одинакова), отсюда—независимость МКГ от вещества (и условий на границе раздела), заполняющего пространство между телом человека и датчиком.

6. Главное же отличие этих двух методов диагностики состоит в том, что поля, регистрируемые магнитокардиографическими отведениями, обычно характеризуются циркуляционными токами в периферических областях мышцы сердца, имеющих низкое удельное сопротивление. Этот эффект усиливается анизотропностью мышц сердца. Кроме того, радиальные ЭДС в желудочках, а также радиальные и тангенциальные ЭДС в межжелудочковой перегородке, обычно не воспринимаемые электрокардиографами, фиксируются на МКГ. Тот факт, что у здоровых людей преобладает ЭДС радиального направления, а при магнитокардиографии усиливаются тангенциальные ЭДС, позволил предположить, что МКГ может оказаться более чувствительной к патологическим изменениям волны возбуждения в сердце, чем ЭКГ.

В настоящее время наметились два пути анализа МКГ. Первый путь [95] - это прямое сопоставление ЭКГ и МКГ пациента, страдающего какими-либо нарушениями сердечной деятельности, а затем сравнение их с МКГ здоровых пациентов. Исследователи надеются с помощью визуального анализа выявить какие-либо закономерности, специфические аномалии поведения кривых, которые дали бы ключ к проведению более детального анализа.

Второй подход заключается в синтезе по параметрам данной кривой (МКГ) моделей электрических «генераторов» (токовых диполей - токовых аналогов заряженного диполя) сердца по аналогии с генераторами, «вырабатывающими» поверхностные потенциалы, регистрируемые с помощью ЭКГ. Так, с использованием методики машинного моделирования были рассчитаны параметры «токовых диполей» сердца по величине нормальной (по отношению к груди пациента) компоненты МП. При этом оказалось, что можно считать появлению нормальной компоненты поля результатом действия эквивалентного генератора—токового диполя, «находящегося» непосредственно внутри сердца; влиянием остальных токов, которые возникают во всем объеме тела человека, можно практически пренебречь. Этот факт значительно упрощает решение задачи и фактически сводит ее к аналогичной задаче расчета генераторов—зарядовых диполей для случая, когда регистрируются поверхностные потенциалы (ЭКГ).

Таким образом, регистрация МП человека, и в частности сердца, является в настоящее время существующим фактом. Получены отчетливые и воспроизводимые МКГ. С их помощью исследователь может получить такие данные, которые невозможно получить другими способами, так как МКГ отражает некоторые стороны электрической активности сердца, не проявляющиеся на ЭКГ. Широкие перспективы развития магнитокардиографии связаны с целым рядом ее преимуществ перед другими методами диагностики, а именно: безопасностью, возможно большей информативностью, возможностью бесконтактной регистрации и другими. Большой интерес представляет создание единой полной картины МП биообъекта (человека), его распределение в пространстве, изменения во времени, а также характер его взаимодействия с окружающими МП различного происхождения.

В наших опытах для борьбы с помехами был осуществлен выбор места для проведения экспериментов. Измерение уровня помех в разных помещениях нашего Института показало, что даже на небольших расстояниях могут быть участки, различающиеся по шуму на порядок, а порой и на два. Уменьшение скоплений ферромагнитных материалов, электрических машин (вентиляторов, насосов, работающих в районе измерений) резко повышает прием сигналов, характерных для магнитокардиограммы.

Было проведено магнитное картирование ряда помещений института. Оптимальными для приема слабых сигналов оказались условия в помещении конференц-зала на пятом этаже в нерабочее время, когда экспериментальные установки и лифт выключены. Поэтому опыты проводились в вечерние часы.

Поскольку работа с магнитометром требует строгого соблюдения правил «магнитной гигиены», для размещения испытуемого мастерской института были изготовлены специальное кресло, а затем кровать из дерева без металлических креплений. Датчик также крепился на специальной деревянной подставке, которая давала возможность перемещать его в двух плоскостях (см. рис.12).

Подставка для датчика и мебель для испытуемых были установлены на колесах из немагнитного материала, с тем чтобы облегчить изменение места съема и приближение прибора к испытуемому.

Опыты проводили при положении испытуемых сидя и лежа. Параллельно с МКГ производилась запись электрокардиограммы в трех стандартных отведениях—I, II, III. Регистрация ЭКГ и МКГ осуществлялась одновременно с помощью кардиографа ЭЛКАР. Регистрирующая аппаратура располагалась на расстоянии не менее 7 м от испытуемого.

Для измерения МП сердца в разных участках грудной клетки испытуемого и соотнесения магнитных сигналов с местом их снятия на грудную клетку испытуемых надевали сетку, состоящую из 30 квадратов со стороной 5 см (рис. 18). Сетка надевалась таким образом, чтобы ее средняя линия приходилась на центе мечевидной кости, а верхняя граница шла по ключицам. Датчик градиентометра располагали у грудной клетки испытуемого в месте отведения так, чтобы нижняя часть

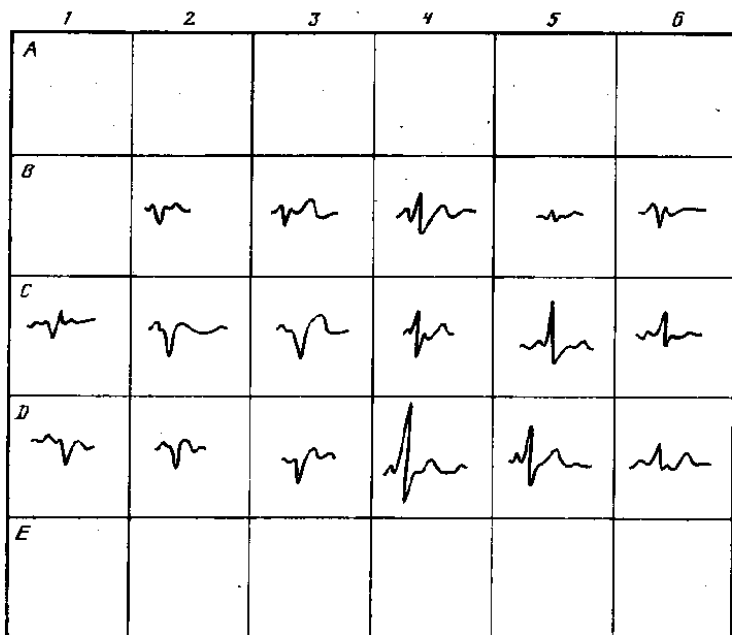


Рис. 19. Выраженность зубцов магнитокардиограммы при картировании грудной клетки испытуемого

приемной колбы приходилась на центр квадрата, от которого осуществляли отведение,

На трех здоровых испытуемых (мужчины) было проведено 9 экспериментов, в ходе которых производили магнитокардиографическое картирование грудных клеток с одновременной записью ЭКГ.

Эксперименты показали, что МКГ может быть зарегистрирована на расстоянии до 5 и в ряде случаев до 10 см от поверхности грудной клетки. Расстояние, на котором можно было зарегистрировать магнитный сигнал сердца, определялось местом отведения. Магнитокардиографическое картирование обнаружило, что не от всех участков грудной клетки регистрируется МП сердца, что может быть связано: 1) с локальностью магнитных сигналов—наиболее вероятная причина и 2) с недостаточной разрешающей способностью датчика и поэтому чем дальше от места анатомического расположения сердца в грудной клетке, т. е. от источника активности, тем сигнал слабее и он регистрируется на уровне помех.

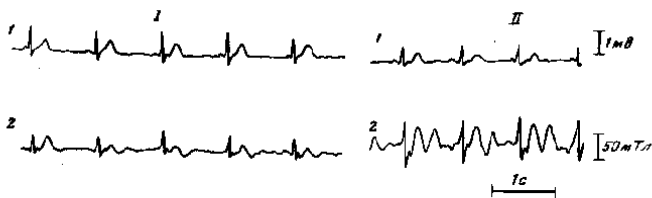


Рис. 20. Одновременная регистрация электрокардиограммы (1) и магнитокардиограммы (2) и у двух испытуемых (I, II)

Максимальная выраженность зубцов МКГ и соответственно наилучшее соотношение сигнал—шум приходилось на отведения в области квадратов D4, D5 и C4, C5, соответствующих примерно области третьего грудного отведения по Небу, применяющегося в электрокардиографии.

Исследования показали, что МКГ и ЭКГ имеют сходство в генерации основных зубцов (рис. 19). Наилучшим образом в МКГ представлен соответствующий ЭКГ комплекс зубцов *QRST*, связанный с проведением в желудочках сердца. Максимальная амплитуда *R*-зубца (максимального зубца ЭКГ) в МКГ составляла около 60 пТл, она варьировала в разных отведениях у одного испытуемого и в одних и тех же отведениях от испытуемого к испытуемому. Возможность датчика ИЗМИРАН позволяла с достаточно хорошим пеством регистрировать МКГ без усреднения сигнала. Кроме того, датчик давал возможность получать в ряде отведений МКГ с таким разрешением, как и ЭКГ, и в этих записях МКГ был представлен предсердный зубец *P*.

Рис. 20 иллюстрирует записи ЭКГ (II стандартное отведение) и МКГ в области квадратов C4 (I исп.) и D4 (II исп.) у двух испытуемых. Видно, что наряду с большим сходством ЭКГ и МКГ в МКГ могут присутствовать дополнительные зубцы. Так, в МКГ у II испытуемого после комплекса *QRS* возникает четкий дополнительный зубец по временным и амплитудным характеристикам, напоминающий зубец *T* у этого испытуемого. Его амплитуда колеблется от 30 до 50 пТл

Появление дополнительных зубцов в МКГ у двух из трех испытуемых, обследованных нами, не было закономерным в каждом опыте у данного испытуемого. Но если в каком-то

эксперименте зубец регистрировался, то он присутствовал в течение всего опыта. Непостоянство возникновения дополнительных колебаний в МКГ от опыта к опыту не свидетельствует об их шумовой природе (во всяком случае, привносного характера), так как, как видно из рисунка, они возникали всегда в определенной последовательности и с достаточно четко повторяющимися характеристиками по времени и амплитуде. Наличие их только в МКГ заставляет предположить, что они, возможно, несут дополнительную информацию о работе сердца, не проявляющуюся в электрокардиографических записях. Не исключено, что они являются проявлением кинетокардиографических признаков, которые по-разному могут быть выражены у испытуемых и у одного испытуемого в зависимости от его состояния.

При сравнении МКГ одного испытуемого, полученных в разных сериях опытов, видна значительная вариабельность в амплитудах, а порой даже фазах зубцов в одном и том же квадрате. Причиной этих явлений могут быть: 1) влияние внешних МП; 2) колебание чувствительности прибора от опыта к опыту в зависимости от фона; 3) разное функциональное состояние испытуемого; 4) незначительные смещения сетки и положения испытуемого, что представляется наименее вероятным.

Возникновение такого рода явлений предполагает выяснение их природы, поэтому в последующем предполагается провести эксперименты с нахождением повторяющейся, стандартной МКГ для каждого испытуемого и влияние на нее вышеуказанных факторов.

Представляется целесообразным и в дальнейшем проводить картирование, что дает возможность строить линии инверсии отдельных зубцов и получать по МКГ информацию о направленности диполей и сердечных процессов.

Регистрацию МКГ у больных людей мы проводили совместно с доктором мед наук С. Б. Фельдманом и врачом А. Л. Яровым в условиях подмосковного санатория описанным выше методом с использованием МОНа. Методом МКГ обследовано 10 больных ише-мической болезнью сердца (ИБС) в возрасте от 52 до 76 лет и 6 практически здоровых лиц в возрасте от 30 до 50 лет. Все обследованные были мужского пола. Больные были направлены в

санаторий с диагнозом ИБС после комплексного обследования в стационарных условиях.

В зависимости от данных анамнеза, клинических проявлений болезни, а также лабораторных и инструментальных методов исследования больные ИБС были разбиты на две группы. 1 — пять больных со стабильной стенокардией напряжения с редкими приступами, атеросклеротическим кардиосклерозом, 2 — пять больных со стабильной стенокардией напряжения и покоя с частыми приступами, постинфарктным и атеросклеротическим кардиосклерозом, атеросклерозом аорты. Больные были без застойной сердечной недостаточности. У всех больных после острого периода инфаркта миокарда прошло более двух лет. На МКГ проводили анализ только желудочкового комплекса.

У здоровых лиц с нормальной электрической осью сердца на МКГ комплекс QRS был типа R_s , qR_s в средних и нижних отведениях с наибольшей амплитудой зубца P в области мечевидного отростка грудины — +50 пТл в D4. В большинстве верхних левых позиций: A3-6, V_{5-6} желудочковый комплекс имел форму rSr' с двумя маленькими зубцами r — около +7 пТл и глубоким зубцом S — до — 22 пТл в квадрате A6. Зубец Q регистрировался только в левых средних и нижних отведениях, а также в V_4 , с наибольшей глубиной — 8 пТл в D6 — 1/6 высоты зубца P . Магнитная ось сердца (равнодействующая всех магнитных векторов во время деполяризации миокарда) была направлена из верхнего левого в правый нижний угол грудной клетки, образуя с электрической осью угол в 90° . У здоровых лиц с горизонтальной электрической осью сердца во всех правых и верхних левых, за исключением V_4 , отведениях регистрировались желудочковые комплексы типа qR_s с наиболее глубоким зубцом S — 35 пТл в D3. В остальных отведениях желудочковый комплекс был типа R_s , с наибольшей амплитудой -j-55 пТл в C5, а также мог быть типа qRS в левых средних. C5-6 и V_4 отведениях. Зубец Q' был не глубже — 3 пТл. Магнитная ось сердца была направлена из верхнего правого в нижний левый угол грудной клетки, образуя с электрической осью угол в 90° .

При ЭКГ обследовании первой группы больных у двоих, с нормальной электрической осью сердца, существенной патологии выявлено не было, а у остальных трех (двое из них

были с нормальной электрической осью сердца и один с горизонтальной) отмечено увеличение амплитуды комплекса *QRS*, его уширение до 0,13с в левых грудных отведениях с некоторым снижением сегмента *S—T* и зубца *T*. На МКГ у больных с нормальной ЭКГ отмечалось углубление *S*-зубца во всех отведениях, особенно в верхних — до — 64 пТл в В4, и увеличение амплитуды *R*-зубца в левых нижних — до +70 пТл в Е4.

При МКГ обследовании остальных больных этой группы у всех имело место уширение комплекса *QRS* до 0,13с, как и на ЭКГ. Из них у одного больного с нормальной электрической осью сердца наблюдалось постепенное увеличение амплитуды зубца *P* к нижним левым отведениям до +76 пТл в Е4, а также углубление *S*-зубца в верхних отведениях до—32 пТл в А6. У другого больного с нормальной электрической осью сердца, помимо значительного увеличения амплитуды зубца *P* во всех отведениях, особенно в левых нижних — до +108 пТл в Е4, и углубления *S*-зубца в верхних, отмечалось также углубление зубца *Q* в левых нижних отведениях до 1/5, высоты зубца *R* в Е5. У больного с горизонтальной электрической осью сердца во всех левых верхних отведениях желудочковый комплекс стал типа *Rs*. В остальных отведениях возросла амплитуда зубцов *R* и *S*.

При ЭКГ обследовании больных второй группы у двоих были выявлены рубцовые изменения миокарда на переднебоковой стенке левого желудочка: зубец *Q* уширился до 0,04с и углубился более чем на *V_i* высоты зубца *R* в *AVL*, *V₅₋₆* отведениях. Из этих больных у одного была нормальная, а у другого горизонтальная электрическая ось сердца. Еще у двоих больных из этой группы были выявлены рубцовые изменения миокарда на заднебоковой стенке левого желудочка: глубокий и расширенный зубец *Q* в *III*, *AVF*, *V₅₋₆* отведениях. У одного из них были ЭКГ данные ишемии миокарда переднебоковой стенки левого желудочка с захватом перегородки и верхушки сердца: депрессия сегмента *S—T* и отрицательный зубец *T* в *AVL*, *V₅₋₆* отведениях. У этих больных была горизонтальная электрическая ось сердца.

И еще у одного больного, перенесшего по анамнестическим данным задний инфаркт миокарда, Рубцовых изменений на ЭКГ,

снятых в общепринятых отведениях, а также в ортогональных и по Небу, обнаружено не было. У этого больного была нормальная электрическая ось сердца. У всех больных второй группы были ЭКГ-признаки гипертрофии миокарда левого желудочка.

При МКГ обследовании больных с рубцово-вой стадией переднебокового инфаркта миокарда у больного с нормальной электрической осью сердца желудочковый комплекс появился в средних и

нижних рядах (C, D, E) типа qRs и QRs ; в большинстве отведений появился, а в левых нижних углубился до 1/2 высоты зубца P зубец Q, достигая — 75 пТл в E5. Максимальная амплитуда зубца P была +0,48 пТл в В3. У больного с горизонтальной электрической осью сердца желудочковый комплекс стал типа rSr' в левых нижних отведениях и типа qR и qRs в правых верхних отведениях.

У больных с рубцовой стадией заднебокового инфаркта миокарда мы имели неодинаковые МКГ-карты, хотя у обоих была горизонтальная электрическая ось сердца. У одного больного желудочковые комплексы типа rSr' регистрировались только в верхних и средних отведениях: ряды А, В, С с наиболее глубоким зубцом S — 52 пТл в А6, а в остальных отведениях желудочковый комплекс был типа Rs , qRs , QRs с наибольшей амплитудой зубца P — +52 пТл в E4, в отличие от нормы, где в правых нижних отведениях регистрируется желудочковый комплекс типа rSr' . У второго больного, с рубцовой стадией заднебокового инфаркта миокарда и ишемией переднебоковой стенки левого желудочка, желудочковые комплексы типа rSr' регистрировались во всех отведениях, с наиболее глубоким зубцом S — 45 пТл в D4, в отличие от нормы, где в левых и

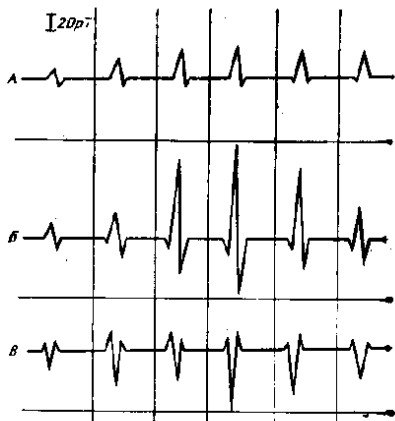


Рис. 21. Усредненные показатели QRS комплекса МКГ здоровых людей (А) с гипертрофией левого желудочка (Б) и с инфарктом миокарда (В)

нижних отведениях регистрируются желудочковые комплексы типа R_s , qR_s . У обоих больных появились зубцы Q в правых нижних отведениях по линии E, а в левых нижних у первого больною зубец Q стал глубоким — до $1/2$ высоты зубца R в D6.

У больного с недиагностируемой рубцовой стадией заднего инфаркта миокарда на МКГ регистрировался зубец Q не только в нижних левых, что бывает и в норме, но и во всех правых, кроме ряда A, отведениях, с (наибольшей его глубиной до V_s высоты зубца R , в D3 и C2. Имело место увеличение амплитуды P -зубца в центральных отведениях — до +82 пТл в D4.

Для интерпретации полученных данных нами предлагается ввести понятие о магнитной оси сердца по-анalogии с электрической осью, как равнодействующей всех магнитных векторов сердца во время деполяризации миокарда. В отличие от других работ нами выявлено различие в МКГ-картах у здоровых обследуемых с нормальной и горизонтальной электрической осью сердца. У лиц с нормальной электрической осью сердца магнитная ось направлена из верхнего левого в правый нижний угол грудной клетки, а - с горизонтальной электрической осью сердца - из верхнего правого в нижний левый угол грудной клетки, образуя в обоих случаях угол в 90° с электрической осью сердца. Этим объясняется регистрация на МКГ у больных с рубцовой стадией переднебокового инфаркта миокарда зубцов Q в правых нижних отведениях, в отличие от ЭКГ, регистрирующей их в левых грудных отведениях. Отсутствие аналогичных изменений на МКГ у больных первой группы говорит о специфичности таких изменений для рассматриваемой патологии.

Некоторое различие МКГ-карт у двух больных с заднебоквым инфарктом миокарда и горизонтальной электрической осью сердца, вероятно, связано с выраженной ишемией у одного из них переднебоковой стенки левого желудочка. У больных зубец Q был более глубоким, чем в норме, в нижних левых отведениях, и в отличие от МКГ-карт больных с рубцовой стадией переднебокового инфаркта зубец Q появился только в самых нижних правых отведениях в ряду E. что, возможно, связано с более отклоненной влево у этих больных электрической, а соответственно и магнитной осью сердца или с размером очага поражения.

Вероятным признаком рубцовой стадии бокового инфаркта миокарда, возможно, также является появление у всех больных с инфарктом, распространившимся на боковую стенку левого желудочка, желу-дочкового комплекса типа rSr' или QRS в левых нижних отведениях.

Обращает на себя внимание более глубокий, чем в норме, зубец Q в левых нижних отведениях и появление его в большинстве правых у больного с рубцовой стадией заднего инфаркта миокарда, не диагностируемого электрокардиографически в основных и дополнительных отведениях.

У трех больных первой группы были ЭКГ-признаки гипертрофии левого желудочка сердца. Регистрация на МКГ у этих больных более высоких, чем у здоровых лиц, зубцов R , преимущественно в нижних левых отведениях (рис. 21), и более глубоких зубцов S в верхних отведениях, а также отсутствие у больных этой группы достоверных данных о другой патологии позволяют рассматривать подобные МКГ-изменения как специфичные для гипертрофии левого желудочка сердца. У двух больных на ЭКГ патологических изменений выявлено не было. При МКГ-обследовании мы имели такие же изменения, как и у остальных больных первой группы, только менее выраженные. Это, как видно, говорит о начальной стадии гипертрофии миокарда левого желудочка сердца у этих больных.

Таким образом, магнитокардиография, как и электрокардиография, позволяет диагностировать гипертрофию миокарда левого желудочка сердца, а также лучше выявлять и топически локализовать рубцовые изменения миокарда. Магнитокардиография, будучи бесконтактным методом исследования, не требует предварительной подготовки больных и является более оперативным методом исследования, чем электрокардиографический.

Итак, наши результаты по регистрации МКГ у больных кардиологическими заболеваниями подтвердили литературные данные о том, что существует устойчивая связь между электрическими и магнитными векторами сердца человека и что имеется лучшее обнаружение и большая чувствительность метода ЭКГ к проявлениям сердечной патологии.

Оригинальность этих исследований заключается в использовании МОНа, а не каких-либо других магнитометров.

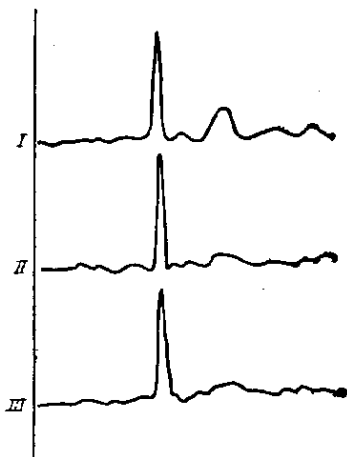


Рис. 22. Магнитокардиограмма человека при нормальном внешнем магнитном поле Земли ($I = 0,49 \cdot 10^{-4}$ Тл), при искусственном увеличении внешнего магнитного поля ($I = 1,1 \cdot 10^{-4}$ Тл) и при его уменьшении ($I = 0$) (Петерс и др., 1980)

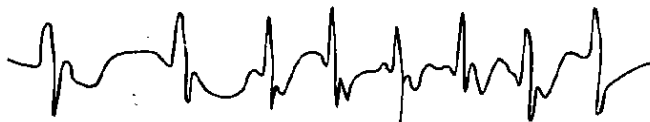
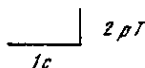


Рис. 23. Магнитокардиограмма кролика



Подобные результаты с использованием такого же прибора были опубликованы недавно [58]. Работа японских кардиологов [113] на основании исследования 60 нормальных людей и 95 пациентов показала, что МКГ может давать информацию, которую трудно получить при использовании стандартных ЭКГ. Отмечено увеличение R -зубца при гипертрофии левого желудочка. Чаще, чем в ЭКГ, в МКГ отмечали инверсию T -волны.

Следовательно, МКГ успешнее детектирует ранние ненормальности реполяризации.

О большой чувствительности T -волны МКГ свидетельствуют результаты М. Петере с соавт. [143] по регистрации МКГ человека в различных внешних МП. Как видно на рис. 22, волна T в МКГ увеличивалась по амплитуде с увеличением внешнего МП до $1,1 \cdot 10^{-4}$ Тл и уменьшалась почти до полного исчезновения при уменьшении внешнего МП до 0. Волна R в МКГ при этих манипуляциях не изменяла своей амплитуды.

Уместно заметить, что мы, используя СКВИД, могли зарегистрировать МКГ кролика, на которой выделялась волна R (рис. 23). Подобные записи были ранее получены в ГДР.

Заканчивая эту главу, мы должны отметить, что наша группа в какой-то мере повторяет путь других групп в процессе приобщения к биомагнитным исследованиям. Сначала мы регистрировали МКГ как наиболее сильный сигнал организма человека и животных, а потом переходили к регистрации МП мозга, что считаем основной нашей задачей.

3.6. Магнитные поля мозга

Как и в электрографии, в магнитографии вслед за регистрацией процессов в сердце исследователи перешли к регистрации бесконтактным способом МП мозга. Однако ускорение научно-технического прогресса сказалось и на этом процессе. Если Г. Бергер стал регистрировать ЭЭГ примерно через 45 лет после первой записи ЭКГ, то Д. Кoen сумел опубликовать сообщение о регистрации МЭГ уже через 5 лет после первого сообщения о МКГ, сделанного Боулом и Макфи в 1963 г.

В своих воспоминаниях Д. Кoen [85] указывает, что первые попытки приступить к биомагнитным исследованиям сопровождалась большим скептицизмом со стороны широкой научной общественности, Только упорство и настойчивость помогли преодолеть многочисленные трудности. Первая магнитоэкранированная комната была построена в Национальной магнитной лаборатории им. Ф. Биттера примерно в 1967 г. Уже в 1968 г. появилось первое сообщение о регистрации МЭГ методом усреднения с помощью индукционных датчиков при использовании ЭЭГ в пестве опорного сигнала A через 4 года появилось сообщение о возможности прямой регистрации МЭГ с помощью СКВИДа в магнитоэкранированной комнате. Еще через 2 года финские исследователи [7G] сообщили о возможности прямой регистрации МЭГ с помощью градиентметрической схемы СКВИДа в неэкранированных условиях пригородной зоны (в деревянном домике).

Обе группы (и американская и финская) использовали в качестве испытуемых сотрудников (не более пяти человек), над

затылком которых помещали СКВИД и одновременно с этих областей регистрировали обычным способом ЭЭГ. Испытуемых просили открывать и закрывать глаза В последнем случае лучше выявляется альфа-ритм

Оказалось, что при закрытии глаз альфа-ритм выявлялся как в ЭЭГ, так и в МЭГ, хотя полного совпадения этих двух показателей деятельности мозга не наступало. Была отмечена асимметричность альфа-ритма в МЭГ при ее регистрации от двух полушарий. Источником МЭГ, как и ЭЭГ, считают медленные си-наптическио процессы, но не спайки нейронов. При обычной методике записи МЭГ 1 пТл и соответствовала 50 мкВ в ЭЭГ.

В своих экспериментах мы также регистрировали человека с помощью магнитометра, работающего в режиме градиентометрической схемы на основе датчиков с оптической накачкой в парах цезия. Прибор создан в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн АН СССР. Размеры маг-ниточувствительного элемента были 5X4 см, базовое расстояние между датчиками равнялось 6 см. Определенным образом ориентированные датчики фиксировали у головы лежащего на немагнитной кровати испытуемого на расстоянии нескольких миллиметров от поверхности черепа. ЭЭГ в двух отведениях регистрировали с помощью немагнитных посеребренных электродов, заполненных токопроводящей пастой. Один электрод укрепляли на 3 см выше — анион, а другой — под датчиком МЭГ. Индифферентный электрод располагали на мочке уха. Полоса регистрации МЭГ и ЭЭГ составляла 0,3—15 Гц, Уровень шумов при работе градиентометрической схемы достигал на указанных частотах в среднем $5 \cdot 10^{-11}$ Тл. После усиления сигналы МЭГ и ЭЭГ одновременно записывали на двух каналах магнитографа, а затем обрабатывали на ЭВМ в Институте дефектологии АПН СССР.

Опыты проводили в вечернее время в лабораторном здании Института ВНД и НФ АН СССР без экранировки. У 15 испытуемых регистрировали МЭГ и ЭЭГ при закрытых и открытых глазах на протяжении 20 мин. Анализировали 10-секундные отрезки записи ЭЭГ и МЭГ с частотой квантования 102,4 Гц. Обнаружили значимое совпадение спектров МЭГ и ЭЭГ на отдельных участках записи в диапазоне альфа-ритма

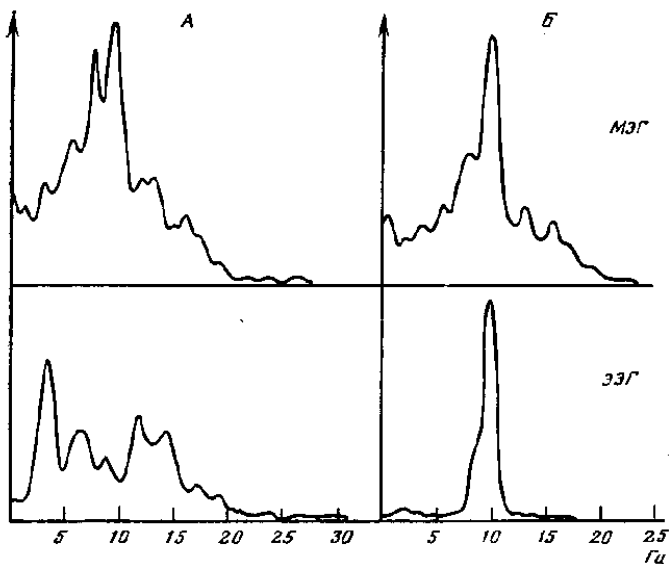


Рис. 24. Спектр мощности магнитоэнцефалограммы (МЭГ) и электроэнцефалограммы (ЭЭГ) под затылочной областью при открытых (А) и закрытых (Б) глазах

Абсцисса — частота в герцах; ордината — выраженность частот в относительных единицах

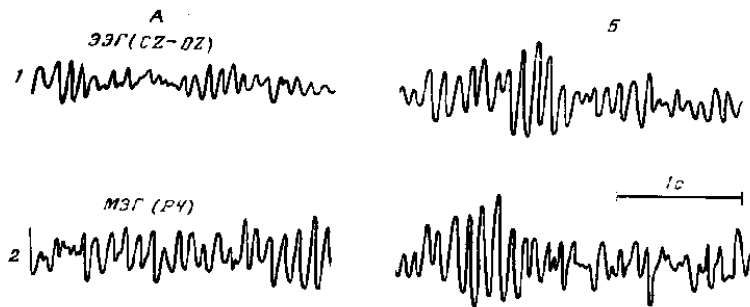


Рис. 25. Одновременная запись электроэнцефалограммы (1) и магнитоэнцефалограммы (2) под затылочной областью у одного и того же испытуемого при открытых (А) и закрытых (Б) глазах. Запись произведена с использованием биоманитной системы на основе СКВИДа

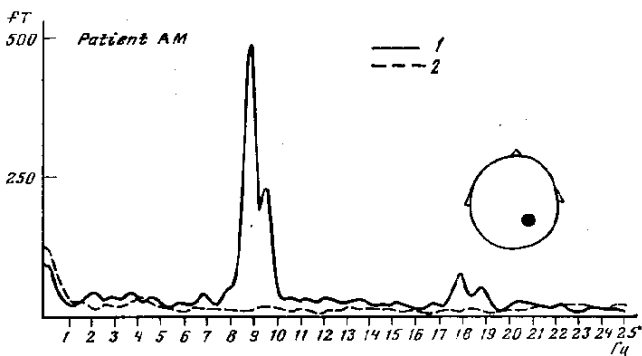


Рис. 26. Спектр мощности магнитоэнцефалограммы над затылочной областью (1) при закрытых глазах испытуемого и шума биомагнитной системы (2)

при закрытых глазах (рис. 24). Величина совпадения определялась индивидуальными особенностями испытуемых и их функциональным состоянием.

После наладки биомагнитной системы на основе СКВИДа нам удалось осуществить прямую запись МЭГ испытуемого при открытых и закрытых глазах. Опыты проводили в комнате, максимально удаленной от возможных промышленных помех, на 5-м этаже здания Института ВИД и НФ АН СССР. Результаты приведены на рис. 25, где видно, что МЭГ похожа на ЭЭГ и меняется при открывании и закрывании глаз.

Обработка данных МЭГ и ЭЭГ на ЭВМ фирмы «Лабтам» показала, что в спектре частот МЭГ при закрытых глазах испытуемого выявляется ярко выраженный пик в диапазоне альфа-ритма, т. е. в области 10 Гц. В контрольных записях работы биомагнитной системы этот пик не обнаруживался (рис. 26).

Таким образом, используя различные типы магнитомеров (а в будущем предполагается применять комбинацию этих типов для улучшения условий регистрации биомагнитных сигналов), можно регистрировать некоторые параметры деятельности мозга.

В работах многих других исследователей также обнаружено, что на ЭЭГ и МЭГ регистрируются одни и те же частотные составляющие, принадлежащие в основном альфа-диапазону. Сравнения МЭГ и ЭЭГ более часто обнаруживают отставание

или опережение одного из процессов, чем сравнения двух отведений ЭЭГ. МЭГ обычно отстает во времени от ЭЭГ, когда не наблюдается синхронизация в ЭЭГ-отведениях. В течение пробы на гипервентиляцию медленные волны можно наблюдать или в МЭГ, или в ЭЭГ. Во время сна нет строгой корреляции между МЭГ и ЭЭГ. В МЭГ почти не встречаются веретена, что, возможно, подтверждает внекорковое происхождение этой формы электрической активности мозга.

МЭГ регистрировали у 10 пациентов с различными неврологическими расстройствами. Выявлены 3 типа аномальных волновых форм, хуже представленных в МЭГ; 5 типов волновых форм, хорошо представленных как в МЭГ, так и в ЭЭГ, а также 3 типа волновых форм, лучше представленных в МЭГ, чем в ЭЭГ.

Таким образом, МЭГ вместе с ЭЭГ более полно, чем только ЭЭГ, отражает процессы, лежащие в основе деятельности ЦНС. Отмечено, что МЭГ регистрирует кортикальную активность лучше, чем субкортикальную, и отражает активность многополюсных источников, тангенциальных поверхностей кортекса. В ряде случаев МЭГ может дать принципиально новую информацию о головном мозге (постоянное магнитное поле мозга и т. д.).

Наибольшую популярность к настоящему времени получили вызванные магнитные поля (ВМП), которые отражают реакцию определенных структур мозга на адекватный раздражитель, зарегистрированную в виде изменения МП над этими структурами. Применялись сенсорные раздражители, широко используемые в электрофизиологии: зрительные, слуховые, тактильные. Одновременно с ВМП регистрировали и электрический вызванный потенциал (ВП). Впервые ВМП на вспышку света зарегистрировал Д. Кoen (1975) и на более сложный зрительный стимул Бреккер с соавт., 1975 [90]; Райт с соавт., 1978 [135], а также Вильямсон с соавт., 1977 [147] и т. д.

Создание лаборатории нейромагнетизма в результате кооперации сотрудников отделений физики и психологии Нью-Йоркского университета может служить удачным примером междисциплинарных исследований в области биомагнетизма. Сотрудники лаборатории, среди которых выделяется своей активностью С. Дж. Вильямсон, начали писать оригинальные

статьи с 1975 г, а обзоры с 1977 г. Работа проводится в неэкранированных условиях с помощью градиентметрической схемы СКВИДов в условиях городской лаборатории. Исследовали в основном зрительные и сенсомоторные ВМП.

Оказалось, что ВМП имеет значительно большую локализацию около соответствующих стимулу областей мозга по сравнению с локализацией ВП. ВМП противофазны над зрительными областями обоих полушарий, тогда как изменения ВП—синфазны (рис.27).

Амплитуда ВПМ растет при увеличении интенсивности стимулов при таких значениях, когда амплитуда ВП уже не увеличивается.

Латентный период ВМП является постоянной величиной, характеризующей свойства зрительной системы, и не зависит от продолжительности стимула.

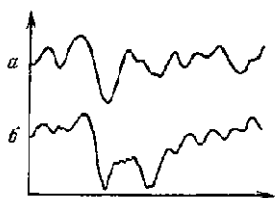


Рис. 27. Вызванный магнитный ответ (а) и записанный однофазно, вызванный потенциал (б), отведение 0

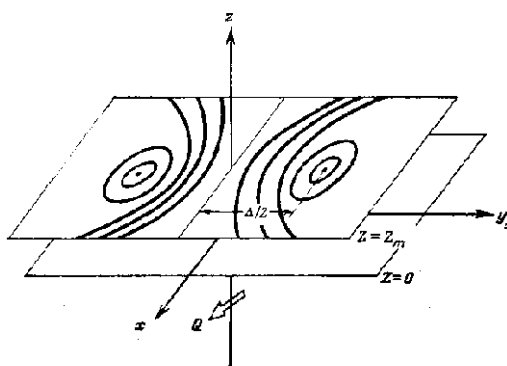


Рис. 28. Определение источника биоманнитного поля при картировании полей над поверхностью объекта

Описание в тексте

С возрастанием интенсивности стимула ВМП не уменьшается, как это происходит при регистрации ВП. У некоторых испытуемых наблюдается различие между ВМП двух полушарий, в то время как такой информации регистрация ВП не представляет.

Примерно с 1980 г. исследователи [143] стали представлять данные по изучению ВМП в виде карт распределения амплитуд и векторов регистрируемых МП. По этим картам относительно легко определить электрический источник, расположенный в глубине мозга. Для определения глубины диполя нужно расстояние между двумя наибольшими величинами ВМП противоположной полярности разделить на 2, а для определения глубины диполя на поверхности черепа достаточно очертить нулевое значение ВМП, разделяющее ВМП разной полярности (рис. 28).

Картинирование зрительных ВМП привело к выводу, что электрический источник этих полей располагается в борозде зрительной коры. Поскольку считается, что кора больших полушарий имеет столбчатое строение, а современные магнитометры могут измерять только тангенциальные токи относительно поверхности черепа, то сигнал, как логически следует из вышесказанного, может быть только над бороздой. Предполагается, что диполь располагается на глубине 2,1 см. Таким образом, пространственные возможности метода магнитометрии могут играть важную роль при определении сенсорных функций в коре мозга.

Сообщение о регистрации слуховых ВМП впервые появилось в США в 1978 г. [135], Его регистрировали над сильвиевой бороздой, повторяя звуковые щелчки с частотой 0,25 с и суммируя 512 реализации. Средняя амплитуда слухового ВМП достигала 0,4 пТл. Была предложена модель из двух вертикально ориентированных токовых диполей, расположенных с обеих сторон продольной щели на глубине около 3 см внутри височных долей.

Айттониemi и др. [77]. а также Хари и др. [117] регистрировали слуховые ВМП на звук 1 кГц, длящийся 800 мс и подаваемый моноурально с помощью пластиковой трубочки. Ответы возникали в начале и в конце воздействия.

Датские исследователи [107] использовали подобный звук,

длящийся 500 мс. Максимальные амплитуды для компонента ВМП с латентностью 100 мс составили 0,5 пТл, а для компонента с латентностью 180 мс — 0,3 пТл.

Позже появилось значительное число работ, посвященных детальному изучению слуховых ВМП с целью составления тонотопической карты коры больших полушарий.

Удалось даже зарегистрировать слуховые ВМП у 7,5-месячного эмбриона человека, находящегося в утробе матери [88].

Соматические ВМП, вызываемые слабым электрическим раздражением различных участков конечностей человека, впервые начали изучать в лаборатории нейромагнетизма Нью-Йоркского университета. В МП раздражения локализовались вблизи ролландовой борозды полушария, противоположного, например, раздражаемому пальцу руки. Показано, что токовый диполь при раздражении мизинца расположен на 2 см выше диполя, возникающего при раздражении большого пальца.

Следовательно, метод ВМП дает возможность строить карты проекционных зон соматосенсорной активности с разрешением лучшим, чем при регистрации ВП при тех же локализациях раздражения.

Многие доклады на 5-й биомагнитной конференции были посвящены определению источников ВМП при зрительном, слуховом или электрическом раздражении отдельных нервов человека. Обсуждалась роль борозд в локализации этих источников, поскольку СКВИД может измерять только горизонтальные (тангенциальные) токи, а кора больших полушарий имеет колончатое строение.

Однако эта идеология, господствующая на предыдущем биомагнитном совещании, была поколеблена сообщением из лаборатории Дж. Битти (Калифорнийский университет, США), которого не было ни в программе, ни в тезисах о регистрации МЭГ у крыс после создания эпилептогенного очага [81]. Такого рода данные позволяют надеяться на ускорение нейрофизиологического анализа нейромагнитных данных при проведении опытов на животных и при наркозе и при осуществлении условнорефлекторной деятельности.

Уместно отметить, что практически важному вопросу об определении локализации эпилептогенного очага у больных людей с помощью магнитометрии было посвящено несколько

докладов. Тон здесь задавали итальянские исследователи во главе с Г. Л. Ро-мани.

Организаторы конференции — канадцы — представили интересные и оригинальные сообщения о регистрации нейромагнитных полей человека, возникающих примерно за 1 с перед произвольным движением конечности или перед произнесением слова. Эти исследования, проводимые под руководством Г. Вайнберга, позволяют надеяться, что магнитометрия будет полезна при анализе высших психических функций человека [109].

Другой аналитический путь связан с регистрацией МП от изолированных структур биообъектов. Этот новый раздел биомагнетизма, называемый иногда цитомагнитометрией, требует дополнительных устройств к выпускаемой стандартной аппаратуре по биомагнетизму и развивается пока только в одном месте, на физическом факультете Университета Вандербильта, Неш-вилль, США. Известный биомагнитолог Дж. Вискво, который в 1980 г. впервые надежно зафиксировал МП изолированного нервного волокна лягушки при его возбуждении, сообщил о регистрации МП от одиночного нервного волокна рака и от изолированной мышцы сердца кролика. Эти достижения позволяют надеяться, что в скором времени исследователи смогут зафиксировать МП отдельной нервной клетки при ее спайковом разряде.

Интересно в этой связи предположение о том, что МП возбужденного нерва способствует миэлинизации нервного волокна. В пользу такого предположения свидетельствуют факты высокой чувствительности нейроглии к внешним МП у взрослых животных [61], отсутствие эффекта обмотки в культуре глиальных клеток, повышенная реакция эмбрионов и молодых организмов, у которых происходит процесс миэлинизации, на воздействие внешних усиленных МП и ослабленных МП [61].

Данные нейромагнетизма позволяют также предположить, что достаточно сильное внешнее МП может менять ориентацию диполя, возникающего при различных сенсорных раздражениях. Поддержкой такого предположения могут служить данные об изменении под влиянием МП зрительного ВП у человека и у кролика, а также соматосенсорного ВП у крысы [61].

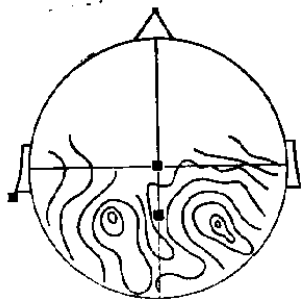


Рис. 29. Распределение изолиний магнитного поля МЭГ в альфа-диапазоне, подтверждающее дипольную структуру источника

анализа, что подтвердило дипольную структуру источника альфаритма (рис. 29).

Перспективно также изучение магниторетинограммы под влиянием внешних МП, поскольку они могут вызывать зрительное ощущение (магнитофосфен) у человека, по в этом случае важную роль могут играть и магнитные свойства родопсина. О магнитных свойствах биологических объектов и о их постоянных МП пойдет речь в следующих разделах книги.

Глава 4 Магнитные поля постоянных токов

До сих пор мы разбирали значение переменных МП биологических объектов (в основном человека). Именно здесь выявляется острая конкуренция между магнитографией и электрографией. Однако, когда речь заходит о характеристике МП постоянных токов, острота конкуренции уменьшается. И магнитометрия становится совсем уникальным методом при определении магнитных свойств биологических объектов и включений естественного или искусственного происхождения. Об этих МП речь пойдет в следующем подразделе. Мы уже упоминали о ПМГ1, когда говорили о МП рыб, о МП

Мы записывали МЭГ и ЭЭГ у человека с последующим картированием поля в альфа-диапазоне. Обработка фоновых МЭГ производили с применением спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье. Результаты анализа показали более богатый спектр в низкочастотном дельта-диапазоне по сравнению с ЭЭГ, что может быть перспективным в плане выявления медленноволновой патологической активности. Картирование МЭГ проводили с использованием ковариационного

поперечнополосатых мышц, о МП глаза. Этот показатель может информировать исследователя о деятельности постоянных и низкочастотных (меньше 0,1 Гц) токах кожи, о деятельности скелетных и гладких мышц. В последнем случае речь идет чаще всего о мышцах желудка. Одним из источников постоянных МП биологических объектов может являться потенциал повреждения. Вероятно, он служил источником МП раненой рыбы. Другой причиной будет формирование постоянных МП у развивающегося эмбриона курицы.

Неожиданностью, впервые обнаруженной при магнитных измерениях, явилось то, что после приема холодной воды в области брюшной полости человека возникало постоянное МП. Оно достигало величины 200 пТл, а затем медленно спадало в течение часа [95]. Через час после еды градиенты МП в области живота человека достигали 75 пТл/см и содержали ряд переменных компонент. После длительного перерыва в еде (более 12 ч) МП уменьшалось более чем в 3 раза и становилось постоянным во времени или колебалось с периодом 20 с [138].

Известно, что между слизистой и серозной оболочками желудка человека существует потенциал 60—80 мВ [50]. При поражении слизистой оболочки желудка в течение секреции кислоты этот потенциал уменьшается. Если бы такое изменение удалось зарегистрировать при изменении МП, то это могло бы служить способом диагностики без заглатывания неудобных специальных труб. Возможно сделать несложный эксперимент, проводя измерения после вызова секреции кислоты фармакологическим путем или при приеме аспирина. Интересно также измерение МП, связанных с гладкой мускулатурой кишечника, что позволит изучать дисфункции последнего [143].

Напомним, что в исследованиях электрической активности желудка у людей получил развитие метод электрогастрографии. В этом случае активный электрод вводится в желудок путем зондирования через рот, пассивный электрод фиксируется на каком либо участке тела снаружи. В этом случае перемещения электрода в полости желудка вносят большие помехи в регистрируемый сигнал. При обволакивании электрода пищей с большой диэлектрической постоянной, например жиром, запись вообще может прекратиться. Попытки регистрации потенциалов желудка у людей с поверхности тела связаны с зашумливанием

сигнала электрохимическими процессами на границе тело—отводящий электрод, наводками со стороны других органов, в частности сигналами, сопровождающими сокращения кишечника, электрокардиограммой. Электрические потенциалы, генерируемые желудочком, распределяются по всему телу как по объемному проводнику: их можно зарегистрировать на поверхности грудной клетки и рук. Можно надеяться, что развитие магнитогастрографического метода позволит избирательно регистрировать токи желудочно-кишечного тракта.

Если изучение гастроманетизма породили исследования МКГ, то миомагнетизм возник при развитии магнитомиографии - этого неинвазивного метода регистрации биоэлектрической активности поперечнополосатых мышц, в основе которой лежит измерение МП от постоянных и переменных токов действия мышц при их сокращении.

Структурной основой мышечного сокращения являются миофибриллы - продольные волокнистые структуры, располагающиеся в протоплазме мышечного волокна скелетной мускулатуры. Мышца сокращается под действием нервных импульсов, которые приходят по двигательным нервным волокнам к специализированным окончаниям—двигательным концевым пластинкам - и вызывают здесь освобождение ацетилхолина. Ацетилхолин деполяризует мембрану мышечного волокна, возбуждая таким образом потенциал действия. Суммарная кривая многих переменных потенциалов действия, зарегистрированная с помощью накожных электродов, представляет электромиограмму (ЭМГ). ЭМГ часто используется при изучении двигательных нарушений, уточнения локализации патологического процесса в нервной системе.

Впервые ММГ была зарегистрирована при изучении скелетной мускулатуры человека в области локтя при сжатии руки [99]. Сигнал имел как постоянную, так и переменную составляющую МП. Спектральный анализ ММГ показал наличие пика 40 Гц при измерениях выше локтя и пик 80 Гц при измерениях у ладони руки. Амплитуда ММГ—около 20 пТл. ММГ около предплечья имела амплитуду около 2 пТл. [134]. В работе Барбанера с соавт. [84] описана ММГ у локтя при расширенной полосе регистрации - до 400 Гц. Показано наличие сигналов ММГ и на этих частотах. Во всех случаях сигнал ММГ исчезал при отсутствии сокращения соответствующих мышц.

ММГ, записанная с правой ноги человека, описана в работе Кога с соавт. [85]. Эксперименты проводили с помощью СКВИД градиентометра первого порядка. Диаметр катушки датчика—4,4 см. Система имела ширину полосы пропускания 4 кГц, а уровень фонового белого шума составлял $1 \cdot 10^{-13}$ Тл Гц. В пестве объекта для изучения формы волны ММГ использована голень человека. Ось катушки датчика располагалась почти перпендикулярно к поверхности кожи над передней большеберцовой мышцей. Для получения четко выраженных волн использовали методику их усреднения; при этом триггер запуска усреднителя срабатывал от определенной заранее заданной амплитуды ММГ-сигнала. Дрейф базовой линии ММГ голени мал, поэтому такой запуск позволил надежно усреднить 32 первичные записи. Замечено, что волна ММГ обладает почти симметричной формой, при этом продолжительность импульса на уровне половины высоты пика составляет 4 мс. Асимметричная волна ММГ получается при вращении голени на 45° внутрь вокруг ее оси. Хотя спектр частот ММГ голени подобен тому, о котором сообщалось в работе Коена с соавт. [99], длительность импульса ММГ голени была 4 мс. Глубина расположения источника ММГ - сигналов под кожей определялась опытным путем на основе использования зависимости амплитуды импульса ММГ от расстояния между поверхностью кожи и нижним концом дюара и составила 1 см.

Предварительное изучение потенциалов действия при использовании вживленных электродов показало, что продолжительность потенциалов одной двигательной единицы верхней большеберцовой мышцы составляет 2 - 19 мс. Так как самая большая амплитуда ММГ зарегистрирована как раз над верхней большеберцовой мышцей и продолжительность этого ММГ импульса составляет 10 - 20 мс, авторы делают вывод, что источником ММГ в данном случае может быть одна двигательная единица верхних большеберцовых мышц.

Движения совершают не только конечности, но и другие органы организма. Если в этих органах есть биотоки или магнитные частицы, то магнитометрический метод сможет зарегистрировать движения этого органа. Например, электроокулограммой (ЭОГ) называется запись накожными электродами потенциалов у глаза при его движении. Магнитоокулограмма (МОГ) связана с магнитной составляющей,

порожденной токами действия глазных мышц. Амплитуда МОГ достигала 10 - 12 пТл [30]. Карп с соавт. [121] показали, что, так же как и на ЭОГ, на МОГ человека влияют изменения в освещенности. Изменения постоянной составляющей МОГ при адаптации глаза к различным световым условиям достигают 5 пТл за несколько минут.

В области глаза можно зарегистрировать не только МОГ, но и магноретинограмму (МРГ) в ответ на засвет сетчатки [85] величиной в десятые доли пикотесла. Эти методы многое могут дать офтальмологам в их клинических исследованиях, но при регистрации МЭГ следует учитывать возможность артефактных влияний со стороны МП глаза. С этих позиций, т. е. возможности помех от МП других органов, следует оценивать каждое биомагнитное исследование.

МП от токов, порождаемых в конечностях, впервые было описано Д. Коеном и др. (1980). Обнаружено, что длинные мускульные волокна в руках и ногах порождают значительный (до 3 мА) ток, текущий вдоль конечности [101].

Магнитное поле в руках приписывается деятельности мышц, так как оно отсутствовало у пациентов с параличом рук, к тому же обширные повреждения кожи (наличие шрамов, ожогов) не влияли на распределение полей. Для рук требовался небольшой массаж, чтобы вызвать токи, порождающие эти МП. В местах, лишенных мускулатуры (например, женская грудь), МП от этих токов не наблюдали.

Основная цель, которую преследовали Д. Граймс с соавт. [85],—выявить роль ионных токов при регенерации тканей. С этой целью они изучали стационарные МП, возникающие в области голени у здоровых испытуемых: изменение этих полей в зависимости от положения конечности и времени, а также их взаимосвязь со степенью мышечного сокращения или расслабления. Испытуемый лежал расслабившись, положив ноги на горизонтальную платформу, высота которой могла регулироваться так, чтобы обеспечивать максимальную близость ног испытуемого к детектору. Изменяя положение испытуемого,

можно было исследовать МП вблизи передней/задней и боковой поверхности ноги. Метод сбора и усреднения данных обеспечивал среднеквадратический уровень шума $1 \cdot 10^{-12}$ Тл в диапазоне частот от 0 до 40 Гц.

Несмотря на наличие вариабельности от испытуемого к испытуемому, максимальные значения полей наблюдали в области, расположенной приблизительно на расстоянии одной трети длины книзу от диафиза большеберцовой кости, т. е. в месте максимального значения площади поперечного сечения мышцы. Представлены данные одного из испытуемых, на котором были зарегистрированы сигналы противоположного, нежели обычно, знака. Когда этот испытуемый расслаблялся, значение снимаемого сигнала возрастало в течение приблизительно 1 ч.

Вид сигналов, который обычно наблюдали авторы этой работы, согласуется с фактом наличия двух противоположно ориентированных и пространственно разделенных токов, проходящих параллельно и противо-параллельно мышечным волокнам.

Для исследования не глубоко протекающих постоянных токов кожи человека в работе [101] использован специализированный, так называемый 2D-градиентометр, способный определять как величину, так и направление токов.

Замечено, что при надавливании пальцем на поверхность головы человека, покрытую волосом, 2D-гра-диентометр регистрирует токи, распределение которых у всех обследованных мужчин одно и то же, причем оно не меняется при различных воздействиях на человека, включая локальный нагрев. Эти постоянные токи, создающие МП с градиентом 10 - 25 пТл/см, текут по коже головы, собираясь со всех сторон в районе темени. Они не найдены на лбу, лысине, под мышками, на лобке, но явно выражены на груди при развитом волосяном покрове. Направление этих токов совпадает с направлением волосяных фолликулл. Измеряя разность потенциалов, обнаружить такие явления невозможно.

Таким образом, мы можем говорить о зарождении дермомагнетизма, связанного с изучением МП кожи. Можно полагать, что такое направление будет перспективным, поскольку этот орган первым встречается с внешней средой.

Глава 5

Магнитные включения и магнитные свойства биологических объектов

Еще М. Фарадей определил, что дерево, кровь и мясо— диамагниты. Известно, что диамагнетизм некоторых бактерий увеличивается примерно на 4% после их гибели [82]. Савостин [см. 22] надеялся выяснить механизм действия внешних МП на пути поиска веществ с высокой магнитной восприимчивостью в биообъектах, В последнее десятилетие развитие исследований привело к обнаружению магнетита естественного происхождения [8, 33, 41, 127, 128]

Эти идеи наиболее ярко проявились при исследовании остеомагнетизма в организме позвоночных животных. Иллюстрацией такого подхода служат результаты Р. Бакера с соавт. [80], которые определяли после воздействия МП 0,2 Тл магнитную восприимчивость различных органов человека с помощью астатического магнитометра. Основные данные приведены в табл. 5.

Из табл. о видно, что магнитные свойства синусов человека отличаются от магнитных свойств других органов. Заметим, что и магнитные свойства пинеально-го органа выделяются среди других участков мозговой ткани, но авторы на это не обращают внимания. В то же время известно, как на основании нейрофизиологических данных Семм с соавт. приписывают пипе-альному органу магниторецепторную функцию [141].

Р. Бакер и соавт. [80] провели и гистологические исследования указанных образцов. Интенсивная концентрация железа отмечалась только в кости сфенои-да (этмоид слуховую комплекса). Концентрации железа имели форму слоев приблизительно 2 мкм толщиной и около 5 мкм ниже поверхности кости, образуя и внешнюю, и внутреннюю стенку синуса. У погибшего от ишемии магнетита не нашли (данные не вошли в таблицу). Авторы полагают, что артефактного магнитного загрязнения материала во время обработки не могло быть.

Казалось бы, такие исследования должны логично влиться в русло течений современного биомагнетизма и одновременно служить надежным связующим звеном между биомагнетизмом и магнитобиологией.

Таблица 5. Индуцированная остаточная намагниченность тканей человека, выраженная в электромагнитных единицах (э. м. е.)

Ткань	Участок тела	Число людей	Число проб	Средняя остаточная намагниченность (диапазон) э. м. е. $\times 10^{-4}$ на 1 г ткани
Мягкие ткани	Мозг	2	5	-0,004 (-0,007— -0,003)
	Обонятельная доля	1	1	0,008
	Зрительный перекрест	1	1	0,009
	Твердая оболочка (верхушка черепа)	3	4	0,215 (-1,790— -0,900)
	Твердая оболочка (сфеноид)	3	5	1,540 (-0,010— -6,520)
	Пинеальный орган	4	4	2,360 (-0,234— -8,360)
Кости	Ребро	1	1	0,780
	Череп	1	1	1,150
	Носовые раковины	1	1	2,050
	Сфеноид	1	1	0,190
Стежки	Синус сфеноида + этmoidные фрагменты	2	4	16,110 (5,810— -24,000)
	Синус сфеноида	4	7	13,000 (3,020— -31,580)

Однако поиски естественного магнетита остаются пока заботой геологов и зоологов, а биомагнетизмом продолжают увлекаться физики и клиницисты. Только на школе по биомагнетизму в Италии был представлен общий доклад Кишвинка [85], но в программу конференций эта тема пока не попадала.

В то же время на биомагнитных конференциях обсуждаются проблемы пневмомагнетизма, которые, строго говоря, к современному биомагнетизму притянуты искусственно. Это произошло, возможно, потому, что Д. Коем [95], изучая МКГ, случайно обнаружил искусственные магнитные включения в легких некоторых испытуемых. Так, пневмомагнетизм, о котором подробный разговор впереди, влился в семью современного биомагнетизма, хотя истинный родственник (поиск включений естественного магнетита) занимает сиротское положение, а похожие на пневмомагнетизм Проблемы магнитного транспорта

лекарств [52] совсем не обсуждаются на биомагнитных конференциях.

Если быть последовательным, то изучение искусственных магнитных включений в биообъектах следовало бы отделить от биомагнетизма (здесь магнетизм не биологического происхождения!) и разделить на пневмомагнетизм, вазомагнетизм (магнитный транспорт лекарств по кровеносному руслу) и гастромагнетизм (когда речь идет о магнитных включениях в пищеварительном тракте). В последнем случае можно определить, ел ли человек пищу, находящуюся в железной консервной банке или из другой посуды [95].

По поводу естественных магнитных включений в кости носа человека имеется несколько гипотез [80]

1. Синусовые кости являются частью депо железа. Случай с анемичным субъектом показывает, что материал отсутствует, когда субъект становится железо-дефицитным.

2. Магнитные отклонения связаны с восприятием внешних МП.

3. Магнитный материал связан с ростом и восстановлением костей.

Перечисленные гипотезы не исключают друг друга. Нужны дальнейшие исследования для уточнения высказанных гипотез.

Уместно заметить, что печень является главным локализованным местом хранения железа у человека. При заболеваниях концентрация железа может падать или возрастать. С помощью СКВИДа, внедренного в практику больницы для клинической диагностической работы, удастся количественно оценить избыток или недостаток железа в печени и этот метод имеет весомые преимущества перед другими. Таким образом, гепатомагнетизм может занять, достойное место среди перспективных методов магнитометрии.

Естественные магнитные включения были обнаружены также в надпочечниках человека [123], но это сообщение осталось пока в стороне от потока информации (своеобразный магнитовый бум) о содержании магнетита в костях черепа. С помощью методов магнитометрии в срезах мозга голубей, предварительно помещенных в МП, были обнаружены натуральные магнитные материалы в пространстве между твердой оболочкой мозга и черепом. Это позволяет предположить, что для ориентации в

пространстве голуби пользуются информацией о ГМП. Высказывалось мнение о возможности накопления железа в голове голубя за счет эритроцитов крови [124].

В этой связи уместно упомянуть об отрывочных сведениях по гематомагнетизму. Еще в 30-х годах было известно, что у деоксигенированного гемоглобина на 7% уменьшается магнитная восприимчивость [133]. В. И. Кармилов [22] в обзорной статье указывает на изменения магнитных свойств крови человека при заболевании раком. Теоретически обосновал возможность магнитного взаимодействия вращающихся эритроцитов А. Л. Чижевский [68]. М. Мурояма [120] показал, что достаточно сильное внешнее постоянное МП не влияет на эритроциты здорового человека, но ориентирует эритроциты больного серповидно-клеточной анемией. Советские физики, исследуя поведение эритроцитов крови человека во внешнем МП, пришли к выводу, что «магнитная восприимчивость функционирующей клетки является функцией ее физиологического состояния и поэтому изучение этой величины имеет существенное значение для разработки новых методов медицинской диагностики»*.

К подобным выводам при исследовании того же биологического объекта пришли и другие исследователи [39, 130].

Но наиболее подробно магнитная восприимчивость изучена у бактерий в связи с обнаружением у некоторых видов этих организмов магнитных включений [87] и специфических органелл-магнитосом [86]. Некоторые характеристики свойств этих бактерий и органелл приведены в табл. 6, взятой из работы Дэкхама с соавт. [104]. Бактерии содержат обычно линейную цепочку примерно из 20 кубовидных богатых железом частиц, каждая из которых имела сторону около 50 нанометров. Вместе с Калмин он отметил, что бактерии содержат постоянный магнитный диполь. И, наконец, используя мессбауэровскую спектроскопию, Франкел и Блекмор показали, что железные гранулы состоят из магнетита (Fe_3O_4), часто называемого магнитным железняком. Каждая из этих гранул была окружена мембраной или оболочкой. Блекмор и его коллеги окрестили их магнитосомами. Они составляют около

* Кондорский Е. И., Шалыгин А. Н. Магнетизм биологических микроорганизмов//ХУ Всесоюзная конференция по физике магнитных явлений. Пермь, 1981. Ч. 1. С. 144.

2% сухого веса бактерий и содержат в 10—100 раз больше железа, чем имеется у немагнитотактильных бактерий [128].

Магнитосомная цепочка достаточно велика и обладает существенным магнитным моментом, что с физической точки зрения объясняет ориентацию бактерий в МП. Например, мертвые бактерии продолжают ориентироваться вдоль магнитных силовых линий. Когда живые бактерии плывут, ориентация вынуждает их перемещаться вдоль силовых линий поля. В северном полушарии линии поля наклонены вниз в такой позиции, что передвижение к северному полюсу равносильно передвижению вниз. Блекмор предполагает, что магнитоттаксис может указывать бактериям направление вниз к обедненным кислородом осадкам, где они себя чувствуют лучше.

Чтобы проверить эту гипотезу, Блекмор и др. собрали бактерии из осадков в Новой Зеландии и в Танзании в 1980 г. Этот район имеет то же самое магнитное склонение, что и в Новой Англии, но противоположного знака. Было обнаружено, что бактерии были преимущественно ориентированы к югу, что опять указывало на движение ко дну. Независимо от них Киршвинк нашел южноориентированных бактерий в Австралии.

Френкел и Блекмор впоследствии собирали бактерии на магнитном экваторе в Бразилии, где магнитные силовые линии параллельны поверхности Земли. Здесь они обнаружили примерно равное число бактерий, ориентированных к югу и к северу [112].

К настоящему моменту Блекмор и др. определили около дюжины морфологически различных бактерий, имеющих магнитосомы. Некоторые из них, такие, как Аквасвириллум магнетотактикум, являются единственным видом, растущим в чистой культуре. Они имеют жгутики на обоих концах, что позволяет им плыть в любом направлении по линиям поля. Блекмор и др. показали, что они также чувствительны к О₂ и плывут вдоль линий поля, если в то же самое время имеется оптимальная концентрация О₂. Исследователи в настоящее время изучают физиологию бактерий и среди прочего определяют, как синтезируются магнитосомы и какую роль может играть железо в электронном транспорте.

Такой подход привел к успеху и в области фитомagnetизма.

Франкел с соавт. [128] сообщили об открытии магнитотаксиса у зеленых водорослей. Водоросли рода Хламидомонас были извлечены из загрязненной прибрежной лагуны реки Рио де Жанейро. Они были ориентированы к югу, и реакция была подобна той, которая наблюдалась у бактерий. Пассивная ориентация клеток осуществлялась через их магнитный момент (который, что интересно, был в 10 раз больше, чем у бактерий). Но исследователи еще не успели вырастить достаточно водорослей в культуре, чтобы определить расположение магнетита в клетке. Позднее Франкел изолировал подобные североориентированные водоросли. Эти открытия являются первыми ясными наблюдениями магнитотаксиса у эукариотных организмов (бактерии являются прокариотами, которые не обладают клеточным ядром и некоторыми другими внутриклеточными органеллами, в то время как водоросли и высшие организмы являются эукариотами и обладают ими).

Функция магнитотаксиса у водорослей неясна, хотя известно, что Хламидомонас могут быть гетеротрофами или автотрофами: отсюда следует, что они могут или абсорбировать всю пищу из окружающей водной среды, или производить некоторую ее часть посредством фотосинтеза. Франкел предполагает, что магнитотаксильные водоросли могут получать определенные преимущества при занятии гетеротрофной ниши в своей среде. Негативный фототаксис (миграция от света) еще раньше наблюдалась у хламидомонас [128].

Несколько исследователей обнаружили магнетит у других эукариот. Речь уже идет о зоомагнетизме. Фуллер и др. сообщили, что обнаружили магнетит в головах четырех дельфинов. Магнетит был найден между твердой оболочкой мозга и черепом, т. е. в том же самом месте, где обнаружили магнетит в голове у голубя. Фуллер и Зогер позже идентифицировали магнетит в том же месте головы кита Кавье. (Все опыты проведены на выбросившихся мертвых животных, предназначенных для музея натуральной истории Лос-Анжелеса).

Наблюдали также магнитные частицы у тунцов, голубого марлина и зеленых черепах. Магнитные частицы у черепах пронизывали все ткани, но у тунца и марлина они концентрировались в этмоидной полости, куда входят кости

стенок и перегородка носовой полости. Таким образом, это более или менее та же самая область, где был найден магнетит у дельфинов и голубей. Бакер с соавт. [80] сообщили, что обнаружили магнетит в этмоидной полости у грызунов и у людей; Киршвинк [124] сообщал о такой же локализации у обезьян. Во всех случаях исследователи отмечали, что магнитные частицы были окружены нервной тканью, подтверждая возможность взаимодействия между частицами и мозгом.

Примером цитомagnetизма может служить не только регистрация МП нерва. Киршвинк с соавт. наблюдали остаточный магнетизм в двух типах опухолей мышей—УС-8 лимфоме и легочной опухоли Левич. Ткани человеческой желудочной, кишечной и почечной карциномы не обнаружили значительного остаточного магнетизма, так же как и ткани здоровых мышей.

Исследователи нашли, что клетки опухолей мышей содержали примерно пять магнетитовых частиц на клетку (что было определено по их магнитному моменту) в сравнении с содержанием менее чем одна частица на тысячу клеток у опухолей человека и у других тканей. Габрах и Баткин помещали также культивируемые опухоли в различные МП, чтобы определить их влияние на рост опухоли. Опухоль Левис не реагировала на МП, а клетки УС-8 реагировали. Воздействие МП 10 мТл с частотой 2000 Гц значительно ускоряло рост клеток, тогда как воздействие подобного поля с частотой 60 Гц значительно задерживало рост. Исследователи пытаются точно определить, в какой части клеток локализованы частицы и какую возможную функцию они несут, кроме хранилища железа [см. 128].

Из данных табл. 6 [104] следует, что основные особенности магнитотактильных бактерий определяются наличием магнитосом, в которых сосредоточен почти весь магнетит. Открытие этих органелл является очень важным достижением современного биомagnetизма, включая этот боковой раздел биофизики в русло основных течений микробиологии.

Однако увлечение магнитосомами не должно нас приводить к выводу, что только при наличии этих органелл бактерии могут реагировать на внешнее МП, Если измерять магнитную

Таблица 6. Характеристика некоторых магнитных свойств бактерий

Объект	Концентрация сила, Э	Концентрация осредненная сила, Э	Сила насше- ния, Э	Насыщение магнитно- ности, Гс/см ³	Относительная магнитно- насыщенность вещества	Концентрация магнитов, %
Магнитотактивные бактерии	220	270	1750	0,9	0,47	1
Изолированные магнитосомы	105	140	2000	13	0,42	14
Немагнитотактивные бактерии	Не магнитны до 1 Тл					

восприимчивость у немагнитотактивных бактерий, как это делал С. А. Павлович [36], используя метод Гун, то можно обнаружить вариабельность в магнитной восприимчивости у микроорганизмов (что обусловлено, возможно, неодинаковым содержанием у них диа- и парамагнитных частиц или особенностью химического состава внутриклеточных органелл) и ее изменение после пассирования бактерий в течение 70 суток в пульсирующем каждые 3 мин МП с индукцией около 500 мкТл (табл. 7).

Как показывают результаты таблицы, наименьшей магнитной восприимчивостью обладали бактерии под номером 6, 7, 10, 12, 13, 14, а наивысшей магнитной восприимчивостью отличались номера 2, 5 и 8. Таким образом, различные виды бактерий по суммарной магнитной восприимчивости неоднородны.

После воздействия МП суммарная магнитная восприимчивость у микрококка лизодиктикуса снижалась в сравнении с контролем на 22,6%, а у Э. коли Р678 - на 40%. В то же время у Сальмтифимурилл. у Сальм-холера, у Э. коли С-85, у Э. коли С-Н2, у Бакт. субтилис и у Протеус вульгарис магнитная восприимчивость сухой биомассы достоверно увеличивалась на 4 - 19%. У остальных шести видов изученных микроорганизмов магнитная восприимчивость под воздействием МП избранных параметров не менялась.

Таким образом, более чем у трети тест-микробов, длительно пассированных в слабопульсирующем МП, возрастала магнитная восприимчивость клеточного вещества. Интересно, что популяция магниточувствительных видов бактерий по магнитной восприимчивости гетерогенна и клоны с высоким парамагнетизмом могут составить наибольший процент

Таблица 7. Магнитная восприимчивость некоторых бактерий и ее изменения после пребывания бактерий в магнитном поле [36]

№	Тест-микробы	Средняя магнитная восприимчивость ($\times 10^{-4}$ э. м. е.)		Критерий Стьюдента
		до МП	после МП	
1.	Э. коли К-12	-0,4543	-0,4338	1,9
2.	Э. коли Р678	-0,3295	-0,4622	15,5
3.	Э. коли С-85	-0,4160	-0,3399	4,1
4.	Э. коли С-Н2	-0,4386	-0,4109	4,2
5.	Сальм. холера	-0,3907	-0,3385	7,5
6.	Сальм. энтеритидис	-0,4742	-0,4844	1,2
7.	Сальм. тифимурилл	-0,4386	-0,4422	8,5
8.	Микрококк клизодиктикус	-0,3390	-4157	19,9
9.	Микрококк лютеус	-0,4707	-0,4756	0,0
10.	Стаф. ауреус 209	-0,4663	-0,4625	0,3
11.	Серрация маршеценс	-0,4530	-0,4548	0,0
12.	Бакт. субтилис	-0,5199	-0,4594	3,0
13.	Алкалигенес фекамос	-0,4647	-0,4855	2,4
14.	Протеус вульгарис	-0,4965	-0,4101	5,1

магнитных диссоциантов. Следовательно, магнитная восприимчивость может явиться важным инструментом в познании магнитной изменчивости микроорганизмов, которая может возникать под влиянием изменений ГМП.

Изучая методом ЭПР динамику магнитных свойств дрожжей, обнаружили, усиление сигнала через 30 мин после начала выращивания культуры. Затем интенсивность сигнала периодически менялась на протяжении 6 - 7 ч, после чего резко падала и к 8 - 10 ч снова повышалась. К этому времени обычно заканчивался рост культуры. Характерно, что динамика магнитных свойств дрожжей в какой-то мере соответствует их чувствительности к внешним МП [60].

Заканчивая характеристику сегодняшнего состояния бактериомагнетизма, следует отметить, что главная задача заключается в систематизации разрозненного материала по определению магнитной восприимчивости различных биологических объектов. К такой серии исследований С. А. Павлович [36], например, пришел через многолетний цикл магнитобиологических опытов с использованием

микроорганизмов в качестве основного объекта. При выяснении механизмов магнитобиологических исследований возникла необходимость биомагнитных исследований. Этот оригинальный и необходимый путь характеризует теоретическую значимость направления исследований.

Практическая направленность этой отрасли науки нацелена на использование биомагнитных данных для диагностики заболеваний, для оценки степени изменчивости микро- и макроорганизмов, для определения магниточувствительности биологических объектов, для выяснения гигиенической оценки действия физических факторов и т. д. Перечень практических приложений можно продолжать очень долго, поскольку здесь затрагиваются функциональные проблемы биологии, медицины и биотехнология.

К последнему направлению можно отнести методы определения искусственных магнитных включений в биосистему. Гораздо понятнее и зримее в сравнении с другими отраслями биомагнетизма становятся источники сигналов при исследовании магнитных включений в легких человека и животных, чему было посвящено значительное число публикаций [119]. Для этих исследований можно использовать не только СКВИДы, но и ФМ, поскольку сигнал достаточно велик.

В этих работах ярко выявляется гигиеническая направленность (определение содержания железа в легких людей, которые в силу производственной необходимости соприкасаются с металлической пылью) и поэтому в странах, где зародилось это направление, переходят к массовым обследованиям людей, создавая автобусы лаборатории для этих целей. Степень загрязнения легких магнитометрический метод определяет точнее и безопаснее, чем скажем, радиологический метод. Исследование клиранса, т. е. скорости выведения искусственно введенного в легкие железного порошка, судя по работам А. Фридмана и др. [109], покачало, что у некурящих людей железо выводится примерно вдвое быстрее, чем у курящих. Причем у курящих нарушается функция в основном глубоких отделов легких.

На испытуемых воздействовали предварительно внешним МП, а затем свипировали область легких магнитометрами. В результате проведенного картирования получены данные о

количественной оценке, локализации и скорости выведения магнитной пыли у испытуемых с профессиональными заболеваниями и у курильщиков.

Так, например, в опытах на курящих и некурящих обнаружено, что после 11 месяцев со дня введения безвредного порошка магнетика в легкие в легких курильщиков осталось 50% порошка, в то время как у некурящих только 10%. Таким образом, данный метод позволяет количественно оценить неконтактным способом загрязнение легких ферромагнитными частицами.

Процесс выведения таких частиц длится около года, что значительно надежнее радиологических и других методов. Благодаря относительной безвредности и дешевизне метод может быть уже сейчас внедрен для профилактических обследований. Метод может решать большой круг задач охраны среды, связанных с загрязненностью воды, воздуха, пищевых продуктов и т. д. ферромагнитными частицами.

Несколько исследователей из разных стран показали, что в процессе выведения железа из легких участвуют фагоциты, которые пускают в ход такие внутриклеточные образования, как митохондрии и микротрубочки. Эти опыты были проведены на животных (хомяках и крысах), а результаты демонстрировали в форме гистологических срезов, что ярко подтверждало убедительность выводов [109].

Пневмомагнетизм можно считать самым научно разработанным отделом антропогенного биомагнетизма (в отличие от биогенного биомагнетизма) как со стороны широко применяемой методики определения искусственных магнитных включений в легкие, так и со стороны гистохимических исследований путей введения и выведения магнитных включений. Можно упрекнуть представителей этого направления в отсутствии координации исследований с вазо- и гастрромагнетизмом, где могут решаться сходные задачи. Особенно интересен магнитный транспорт лекарств по кровеносному, дыхательному или пищеварительному трактам. Пока с этих позиций рассматривается только кровеносный тракт [52].

Антропогенный биомагнетизм должен также решать и магнитобиологические проблемы, т. е. учитывать возможность биологического влияния внешних МП.