

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

М.Ю. Готовский

Цент интеллектуальных медицинских систем «ИМЕДИС» (г. Москва)

Biological action of the alternating electric and magnetic fields

M.Yu. Gotovskiy

Center of Intellectual Medical Systems «IMEDIS» (Moscow, Russia)

РЕЗЮМЕ

В статье, носящей обзорный характер, рассмотрены биологические эффекты, наблюдающиеся при действии крайненизкочастотных переменных и импульсных магнитных полей от источников естественного и искусственного происхождения. Проанализированы молекулярные и мембранные механизмы взаимодействия магнитных полей с биологическими объектами. Приведены результаты экспериментальных исследований воздействия переменных и импульсных магнитных полей на функциональные системы организма: нервную (поведение и нейрофизиология), сердечно-сосудистую, иммунную, эндокринную системы и др.

Ключевые слова: переменные магнитные поля, импульсные магнитные поля, естественные и искусственные источники полей, механизмы биологического действия, молекулярные и мембранные механизмы взаимодействия, биологические эффекты действия, влияние на функциональные системы организма.

RESUME

A survey article considers biological effects observed during the action extremely low frequency alternating and pulse magnetic fields from the sources of natural and artificial origin. The molecular and membrane mechanisms of interaction between magnetic fields and biological objects are analyzed. The results of experimental studies of the effects of alternating and pulse magnetic fields on the functional systems of the body: nervous (behavior and neurophysiology), cardiovascular, immune, endocrine system, etc. are presented.

Keywords: alternating magnetic fields, pulse magnetic fields, natural and artificial sources of fields, the mechanisms of biological effects, mechanisms of molecular and membrane interaction, biological effects on functional systems of the body.

ВВЕДЕНИЕ

Переменные электрические (ПЕЭП) и магнитные поля (ПЕМП) являются частью крайненизкочастотного (КНЧ) диапазона электромагнитных полей, которые наиболее распространены в производственных условиях и быту, а также используются в лечебных целях. Анализ публикаций, посвященных биологическому действию ЭМП КНЧ-диапазона, свидетельствует, что большинство исследований проводилось и проводится в отношении полей промышленной частоты (50 или 60 Гц). Основная направленность подавляющего числа этих исследований – гигиеническая, ориентированная на оценку риска для здоровья человека, обоснования и разработки рекомендаций и стандартов, регламентирующих безопасные уровни воздействия.

Число публикаций, посвященных биологическому действию ПЕЭП и ПЕМП, в настоящее время огромно, и в рамках одной статьи нет возможности коснуться всех тонкостей этой интереснейшей проблематики [1–7]. В связи с этим, основное внимание было сосредоточено на теоретических концепциях и исследованиях, которые в настоящее время считаются наиболее экспериментально обоснованными. Следует отметить, что проблема биологического действия ПЕЭП и ПЕМП касается не только экологической и медико-биологической значимости природных электромагнитных полей, но и в большей степени электромагнитных излучений техногенного происхождения в этом диапазоне частот. В связи с этим, в статье будут рассмотрены только принципиально важные вопросы биологического действия ПЕЭП и ПЕМП, необходимые для

понимания механизмов влияния полей на процессы, происходящие в живом организме.

ПеЭП и ПеМП естественного и искусственного происхождения

Рассматриваемые частоты находятся в диапазоне от 0 Гц до 100 кГц, включающем и промышленные частоты (50/60 Гц), в области которых, как уже упоминалось, сосредоточено наибольшее количество экспериментальных исследований. Электрическая и магнитная составляющие электромагнитных полей в этом диапазоне частот рассматриваются отдельно.

Естественные ПеЭП и ПеМП – в основном земного происхождения. Рассматривая каждый из элементов земного магнетизма, следует отметить, что они не являются стабильными во времени и испытывают периодические колебания или вариации, которые по своему характеру разделяются на медленные и быстрые. Составляющая с медленными или вековыми вариациями носит название главного (постоянного) магнитного поля и обусловлена преимущественно расположенными внутри Земли источниками. Переменная составляющая помимо магнитной компоненты содержит еще и электрическую составляющую, являясь тем самым частью электромагнитного поля (ЭМП) Земли, обязанного своим появлением деятельности Солнца [8].

Помимо электромагнитного излучения от Солнца постоянно движется поток заряженных частиц (в основном протонов и нейтронов), образуя распространяющийся во всех направлениях солнечный ветер, который, обтекая Землю, образует вокруг нее магнитосферу. Геомагнитное поле (ГМП) препятствует проникновению солнечного ветра до поверхности Земли, однако частично его энергия трансформируется в магнитосфере, которая сама становится источником ЭМП в диапазоне КНЧ-частот. Они не экранируются ионосферой и наблюдаются в атмосфере как микропульсации. В более высокочастотном диапазоне лежат ПеЭП грозового происхождения – атмосферники, основная часть которых приходится на участок частот порядка 10 кГц. Пространство между поверхностью Земли и нижними слоями ионосферы рассматривается как полость, в которой длина распространяющейся волны соизмерима с линейными размерами, т.е. образует своеобразный волновод. Колебания ПеЭП в волноводе «Земля-ионосфера» возбужда-

ются разрядом молнии, образующимся в процессе постоянно происходящих в атмосфере более чем 2000 гроз, во время которых молнии ударяют в земную поверхность около 16 раз в секунду, и характеризуются максимумами на определенных (резонансных) частотах около 8 Гц, 14 Гц, 26 Гц и 32 Гц. Эти частоты по имени открывшего их немецкого физика (W.O. Schumann) получили названия шумановских резонансов.

Искусственные, или антропогенные, ПеЭП и ПеМП имеют, как правило, более высокую интенсивность, чем природные, что особенно относится к полям, создаваемым источниками, работающими на промышленных частотах 50 Гц (Европа, Россия, Китай) или 60 Гц (США и Австралия). В окружающем пространстве эти источники образуют поля интенсивностью на много порядков выше, чем природные поля тех же частот. Другие антропогенные источники применяются в исследованиях, промышленности и медицине, а также в некоторых технологических процессах, связанных с производством и передачей энергии на расстоянии. Присутствие ПеЭП и ПеМП в жилых и производственных помещениях обусловлено работой множества технических средств и устройств, окружающих человека, среди которых можно выделить: бытовые приборы, воздушные линии электропередачи, транспорт, системы безопасности, промышленное производство.

В медицине ПеЭП и ПеМП используются для диагностики и лечения [9, 10]. Диагностические методы с использованием ядерного магнитного резонанса (ЯМР) сопряжены с воздействием полей высокой интенсивности. Современное поколение аппаратов для получения ЯМР-изображений, применяемых в клинической практике, использует поля с интенсивностью от 0,3 до 2 Тл. Для ускорения сращения костных переломов, а также улучшения заживления ран и регенерации тканей используется лечение импульсными магнитными полями (ИМП). С этой целью используются ИМП с величиной индукции от 0,3 до 2,5 мТл, которые индуцируют пиковые напряженности электрического поля в кости в пределах 0,075–0,175 В/м. Используются ИМП и в биорезонансной терапии с частотами наиболее приближенными к собственным организму человека сигналам. Лечебное воздействие реализуется в диапазоне частот 0,01 Гц до 15 кГц с интенсивностями ИМП

от 0,05 до 5 мТл. Использование в медицине терапевтических аппаратов, генерирующих ПеМП и ИМП, расширяется особенно быстро.

Взаимодействие ПеЭП и ПеМП с биологическими объектами и механизмы действия

ПеЭП и ПеМП на макроскопическом уровне в органах и тканях могут индуцировать токи с интенсивностью, вызывающей биологически значимые эффекты, но на клеточном уровне их влияние сказывается существенно меньше [11–13]. Важным фактором, который следует учитывать при оценке реакции биологических систем на ПеЭП и ПеМП, является форма волны: синусоидальная или импульсная (прямоугольная, пилообразная, экспоненциальная и т.д.). Для этих полей ключевое значение имеют два параметра: время нарастания и спада сигнала, которое определяет максимальную скорость изменения интенсивности поля. В этих случаях большое значение имеют электрические свойства тканей (проводимость и емкость), которые существенно различаются для разных тканей и, в свою очередь, зависят от частоты.

Концепция дозиметрии для ПеЭП и ПеМП заключается в количественной оценке воздействия поля на биологические объекты и системы различных уровней организации и, соответственно, сложности [11–14]. Для детальной оценки данных, полученных при изучении биологических эффектов ПеЭП и ПеМП, условия воздействия необходимо тщательно контролировать и измерять. В этих случаях «дозиметрия» ПеЭП и ПеМП очень сложна, так как при этом необходимо учитывать очень многие, часто неоднозначные факторы.

Современное понимание механизмов взаимодействия ПеМП с биологическими средами позволяет рассматривать исключительно предварительные дозиметрические концепции для низкочастотных полей, поскольку все они очень сложны [15]. В организме ПеЭП и ПеМП

индуцируют токи, величины которых определяются радиусом пути тока, частотой поля и его интенсивностью в данном месте организма. В отличие от ПеЭП, для которого напряженность поля внутри на много порядков меньше, чем внешнего поля, величина плотности потока ПеМП внутри организма примерно такая же, как и вне его. Напряженности индуцированного ПеЭП и, для ПеМП, плотности тока наиболее велики на периферии тела, где пути тока самые длинные. На величину плотности тока также влияет электрическая проводимость тканей, поскольку конкретные пути прохождения тока сложным образом зависят от их проводящих свойств, существенно отличающихся в различных тканях. Следует отметить, что особенное значение величина индуцированного в тканях тока имеет не только в гигиеническом аспекте, с точки зрения безопасности для человека, но при проведении магнитотерапии [16].

Напряженность наведенного или магнитоиндуцированного электрического поля и, соответственно, плотность тока в тканях может являться количественной величиной, определяющей биологические эффекты действия ПеЭП и ПеМП на клеточном уровне [12, 13]. Основные значения индуцированных токов приведены в табл. 1 [6]. Согласно расчетам ПеМП в диапазоне частот 1–100 Гц, которые могут вызывать ток в тканях плотностью примерно 1 мА/м² или менее, не оказывают непосредственного воздействия на электрическую активность мозга. Изучение восприятия человеком ПеМП с индукцией 2,1 мТл и частотой 60 Гц не выявило достоверно чувствительных лиц среди более чем 200 обследованных. Несколько поведенческих тестов у мышей, которых подвергали воздействию ПеМП частотой 60 Гц, вызывавшего плотность тока приблизительно 1 мА/м² в периферическом участке черепа, также дали отрицательные результаты. Результаты этих исследований позволили предположить, что ПеМП КНЧ диапазона

Таблица 1

Биологические эффекты, вызванные индуцированной плотностью тока в организме. По [6] с измен.

Биологический эффект	Величина индуцированного тока
Отсутствие подтвержденного биологического эффекта	< 10 мА/м ²
Болевая чувствительность, магнитофосфены, стимуляция роста костей	10–100 мА/м ²
Возможное неблагоприятное действия, возбуждение в нервной системе	> 100 мА/м ²
Экстрасистолия, фибрилляция желудочков	> 1000 мА/м ²

должны иметь существенно большие амплитуды, чем теоретически рассчитанные пороговые величины, для того, чтобы вызывать изменения поведения животного.

Не лишено основания предположение, что одним из механизмов является взаимодействие индуцированных электрических полей и токов с оболочкой нерва и мышечных клеток. Такие взаимодействия способны вызывать изменения в электрической возбудимости этих клеток, что может привести к развитию дальнейших биологических реакций [11, 14]. Проницаемость для ионов оболочки нервной или мышечной клетки зависит от мембранного потенциала, благодаря чему клетка электрически возбудима. При воздействии электрического поля различные заряженные боковые группы некоторых белков клеточной мембраны изменяют свою конформацию, вызывая тем самым более значительные изменения в мембранной проницаемости, и влияние индуцированного электрического поля может заключаться в изменении соотношения ионных каналов. Тем самым, в ответ на деполяризующее влияние электрического поля происходит значительное увеличение проницаемости оболочки нервной клетки для Na^+ , что способствует дальнейшей ее деполяризации. Это сопровождается более медленным изменением проницаемости для K^+ и инактивацией Na^+ -каналов, что приводит к реполяризации мембраны. Наведенные поля, превышающие пороговый уровень деполяризации, могут вызывать потенциал действия, который способен стимулировать другие возбудимые клетки. Вызывающие такую значительную деполяризацию ПеМП могут приводить к раздражению нерва или сокращению мышц, а иногда даже и к фибрилляции. Низкоинтенсивные электрические поля, индуцированные ПеМП, также могут взаимодействовать с нервной системой или модулировать ее активность, однако механизмы этого явления недостаточно изучены. Эти взаимодействия могут вызывать изменения в электрической возбудимости и способствовать, например, возникновению магнито- или электрофосфенов у человека, которые будут рассмотрены ниже.

Описанные выше взаимодействия ПеЭП и ПеМП указывают на наличие у нервной ткани частотно зависимой пороговой характеристики, которая достаточно хорошо изучена [5–7]. Основными факторами, регулирующими эту зависимость, являются аккомодация и ион-

ная подвижность. В результате наблюдается характеристическая U-образная зависимость пороговой плотности тока от частоты с наименьшими величинами для большинства нервных тканей в пределах 10 Гц–10 кГц и выше. На низких частотах преобладают эффекты аккомодации, которые, как предполагается, связаны с медленной инактивацией Na^+ -каналов. На более высоких частотах время, необходимое в каждом цикле для прохождения ионов через мембрану, становится лимитирующим параметром; непосредственное электрическое возбуждение способствует нагреву при воздействии частот в диапазоне 100 Гц–300 кГц.

Механизм преобразования ПеЭП и ПеМП для КНЧ диапазона получил подтверждение в экспериментах, выполненных на электрически возбудимых тканях. Для других биологических эффектов полей КНЧ, индуцирующих плотность тока меньших уровней (ниже уровня, который может значимо воздействовать на мембранный потенциал клетки), предполагаются и другие механизмы преобразования. Например, изменения в рецепторных молекулах поверхности клетки и связывание ионов с поверхностью мембраны, которое может возникнуть в результате воздействия ПеЭП и ПеМП. Все это может вызывать электрохимические изменения в компонентах поверхности клеточной мембраны, которые способствуют изменениям внутриклеточных биохимических и физиологических функций. В рамках развития этих концепций W. Adey были предложены многочисленные теоретические модели, которые могут быть объединены в следующие 2 больших класса [17–19]:

- дальнедействующие сочетанные процессы, возникающие в матрице гликопротеидов и липопротеидов, которые образуют клеточную мембрану;

- локализованные процессы, возникающие в специфических лигандсвязывающих сайтах (рецепторах) на наружной поверхности мембраны, или явления, возникающие в ионселективных каналах, которые соединяют мембрану и электрически связывают внутри- и внеклеточную среду.

ПеЭП, индуцированные в тканях внешними ПеМП, на несколько порядков ниже, чем градиент напряжения на клеточной мембране, в связи с чем предполагается, что клеточная реакция на внешние КНЧ поля может включать процесс усиления, при котором низкоинтенсивное ПеЭП, индуцированное во вне-

клеточной жидкости, действует как пусковой механизм для инициирования в мембране клетки кооперативных явлений с большим радиусом действия. Главное положение, лежащее в основе этой теоретической концепции, заключается в том, что мембрана клетки находится в метастабильном, неравновесном состоянии, которое может быть изменено слабыми электрическими раздражителями. В рамках различных физических моделей таких взаимодействий обычно исходят из того, что клеточная мембрана представляет собой решетку, в которой ПеЭП вызывают нелинейные колебания, которые усиливаются в результате коллективного возбуждения молекул в определенных участках мембраны. Накопленная в результате такого коллективного возбуждения молекул энергия затем реализуется как метаболическая химическая энергия путем активации ионных насосов или ферментных реакций в мембране клетки [19].

Взаимодействия ПеЭП и ПеМП полей со структурами клеточной мембраны

Современные экспериментальные данные и теоретические модели подтверждают концепцию о том, что взаимодействия ПеЭП и ПеМП с клетками происходят в специфичных локусах клеточной мембраны [6, 7, 19]. Современные теоретические подходы обосновывают возможность того, что эти воздействия низких интенсивностей могут существенно изменять либо взаимодействия между лигандами и рецепторами на поверхности мембраны, либо трансмембранный перенос основных электролитов клетки. В этой области имеются следующие теоретические и экспериментальные разработки.

а) взаимодействия между лигандами и рецепторами

В предложенной А. Chiabrera модели микроэлектрофоретическое перемещение, индуцированное в мембране клетки ПеЭП, оказывает влияние на среднее расстояние между заряженными лигандами и рецепторами, расположенными на поверхности клетки [20]. Согласно этой теоретической модели, влияние ПеЭП заключается в уменьшении средней продолжительности жизни комплекса лиганд-рецептор на поверхности мембраны. Предполагается, что этот эффект может влиять на различные биологические процессы, такие как активация лейкоцитов антигенами и различ-

ными пектинами или на механизмы регулирующие мембранный транспорт различных катионов, например, ионов Ca^{2+} .

б) комбинированные взаимодействия постоянного и ПеМП

Некоторые экспериментальные данные дают основание предполагать, что эффекты ионного циклотронного резонанса могут возникнуть между постоянными и ПеМП, причем при таких уровнях интенсивности, значения которых сопоставимы с уровнями интенсивности ГМП Земли [21]. Имеются результаты, касающиеся влияния на рост дрожжевых клеток, реакцию лизоцима с субстратом клеточной мембраны, поведение крыс и скорость высвобождения ионов Ca^{2+} из клеток мозга, подвергнутых воздействию в условиях *in vitro*.

Некоторые аспекты биологического действия ПеЭП и ПеМП

Исследование биологического действия ПеЭП и ПеМП представляет значительный практический интерес вследствие большей распространенности полей промышленной частоты 50/60 Гц как в бытовых условиях, так и в индустриальной сфере [2, 3]. ЭМП в диапазоне КНЧ используются в системах связи с погруженными подводными лодками, и изучение их биологического действия в первую очередь направлено на оценку возможных экологических последствий [22]. Все эти исследования представляют самостоятельный интерес, хотя накопленный в течение многих лет значительный объем фактического материала не позволяет утверждать, что проблема биологического действия полей КНЧ диапазона окончательно решена. В исследованиях биологических эффектов ИМП существенную долю занимает терапевтическое применение ИМП, благодаря которому удается ускорить заживление переломов или предотвратить остеопороз, возникающий, например, после действия невесомости во время длительных космических полетов [9, 10]. Последующий аналитический обзор биологических эффектов, возникающих при действии ПеЭП и ПеМП, основан на современных литературных данных, изложенных в коллективных монографиях, опубликованных материалах и рекомендациях Всемирной организации здравоохранения и Международная комиссия по защите от неионизирующих излучений ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) [5–7, 9, 23].

Поведение. Как показали исследования поведенческих реакций животных на действие ПеЭП и ПеМП, они способны к их восприятию: мыши избегают ПеЭП частотой 10 Гц с напряженностью 3,5 кВ/м, хомяки и крысы – ПеЭП частотой 50 Гц при 0,9 кВ/м и 10 кВ/м, соответственно. Способность мигрирующих птиц к ориентации под действием ПеЭП с напряженностью 0,07 В/м и ПеМП с индукцией 0,1–0,5 мкТл с частотами 72–60 Гц нарушается. Следует отметить, насколько высока их чувствительность к ПеМП – в данном случае индукция составляет менее 1 % от ГМП Земли. Процесс запоминания у крыс под действием ПеЭП частотой 50 Гц на протяжении всего эксперимента с напряженностью 50–70 кВ/м, как показали исследования с условными рефлексам, нарушался, причем отмечалась тенденция к пролонгации этого эффекта.

Нейрофизиологические изменения при действии ПеЭП и ПеМП отчетливо регистрировались в первых и в дальнейших исследованиях биологических эффектов действия полей.

Сокращение времени реакции наблюдалось у обезьян, подвергавшихся воздействию ПеЭП при напряженности 56 В/м в диапазоне частот от 7 до 75 Гц, причем для полей с частотой 7 Гц была установлена зависимость от напряженности. В исследованиях на испытуемых-добровольцах был обнаружен сложный характер изменений времени сенсомоторной реакции человека на световой раздражитель в зависимости от величины ПеМП частотой 50 Гц. От 0,4 до 6 кА/м время реакции увеличивалось, что свидетельствовало о развитии тормозных процессов, при дальнейшем повышении до интенсивности 7,8 кА/м снижалось, при 7,8 кА/м не изменялось, а при 8,2–8,8 кА/м отмечалось ускорение времени реакции, характерное для повышенной возбудимости. Полученные результаты соответствуют концепции о трех фазах в реакции организма на возрастающий стимул: ПеМП с напряженностью до 8 кА/м относится к слабым раздражителям, которые вызывают «превентивное» охранительное торможение, а свыше 8 кА/м – к раздражителям средней силы, вызывающим повышение возбудимости или фазу «активации». По некоторым данным, напряженность ПеЭП в 1 мВ/м является для большинства людей пороговой величиной для изменения времени их реакций. Существует также и частотная зависимость этого параметра: ПеЭП с частотой 3 Гц замедляет время

реакции, а с частотой выше 10 Гц – напротив, ускоряет.

В экспериментах, выполненных под руководством W. Adey, были получены результаты, которые до настоящего времени не получили удовлетворительного объяснения: воздействие ПеЭП частотой 1, 6, 16, 32 и 75 Гц при напряженностях 5, 10, 56 и 100 В/м приводили к увеличению выхода ионов меченого кальция [$^{45}\text{Ca}^{2+}$] из ткани мозга цыпленка и кошки в условиях *in vitro*. Парадоксальность полученных результатов заключалась в том, что статистически достоверное увеличение выхода $^{45}\text{Ca}^{2+}$ из ткани мозга происходило только на определенных частотах и только при определенных напряженностях ПеЭП. Так, эффект выхода $^{45}\text{Ca}^{2+}$ наблюдался после 20-минутной экспозиции образца ткани мозга при напряженностях 10 и 56 В/м и частоте 6 и 16 Гц и, в то же время, отсутствовал при интенсивностях 5 и 100 В/м и частотах 6, 16 и 32 Гц [24]. После подтверждения полученных данных тщательно контролируемые экспериментами эти феномены получили название «частотных» и «энергетических окон». Эти результаты легли в основу дальнейших многочисленных исследований, выполненных как самими первооткрывателями этого явления, так и во многих других научных коллективах. Так, например, были получены достоверные результаты, свидетельствующие о наличии двух амплитудных максимумов для выхода ионов $^{45}\text{Ca}^{2+}$ из ткани мозга цыпленка в условиях *in vitro* после 20-минутной экспозиции в ПеЭП частотой 16 Гц при 5–7 и 35–50 В/м и отсутствии влияния при напряженностях 1–2; 10–30 и 60–70 В/м на этой же частоте. Несколько позднее были получены новые результаты для диапазона частот ПеЭП от 1 до 120 Гц и напряженностей поля от 25 до 65 В/м при экспозиции в течение 20 минут. Эффект повышения выхода ионов $^{45}\text{Ca}^{2+}$ из ткани мозга цыпленка достоверно наблюдался при напряженностях: 35, 40, 45 и 50 В/м (частота 45 Гц), 45 и 50 В/м (частота 50 Гц) и 35 и 40 В/м (частота 60 Гц) и не проявлялся при интенсивности 40 В/м на частотах 1; 30; 42 и 120 Гц.

Сенсорные системы явились одним из первых объектов исследования действия ПеМП. Хорошо изученным биологическим эффектом, связанным с непосредственным восприятием человеком ПеМП, является, так называемый, магнитофосфен. Это давно известный (его открыл Д'Арсонваль в 1896 г.) феномен заключа-

ется в появлении у людей с закрытыми глазами ощущений вспышек света при облучении головы ПеМП с индукцией более 10 мТл и частотами свыше 10 Гц. Одно время существовало представление, что возникновение магнитофосфена связано с влиянием ПеМП на возбудимые структуры головного мозга, но затем было обнаружено явление электрофосфена, возникающее и при действии ПеЭП. В результате исследований было сделано заключение, что механизмы, лежащие в основе фосфенов, вызванных воздействием ПеМП или ПеЭП, одни и те же. Исследованиями установлены оптимум чувствительности в диапазоне 20–30 Гц, как для электро-, так и для магнитофосфена при индукции в области 10–12 мТл. В дальнейшем в опытах на изолированной сетчатке глаза лягушки было показано, что влияние оказывается не на структуры головного мозга, а на фоторецепторный аппарат, и эффект реализуется скорее всего в фоторецепторах, а не в постсинаптических нейронах. В последнее время появились новые теории магнитофосфенов, которым еще предстоит получить экспериментальное доказательство их правдомерности [25, 26].

Сердечно-сосудистая система. Как показали результаты многих исследований, как правило, не наблюдается каких-либо выраженных эффектов влияния на сердечно-сосудистую систему как ПеЭП, так и ПеМП. Имеются лишь некоторые сведения о достоверно наблюдаемых эффектах. Так, например, спустя 15 минут после экспозиции мышей в ПеЭП с напряженностью 5,3 кВ/м была отмечена брадикардия, после чего частота сердечбиений медленно росла и сохранялась на одинаковом уровне в течение всего эксперимента, длившегося 21 день. В противоположность этим результатам, у крыс, подвергавшихся воздействию ПеЭП с напряженностью 80 кВ/м, которое чередовалось с периодами отдыха, в начале экспозиции значительно увеличивалась частота сердечных сокращений и дыхания, которые в дальнейшем возвращались к нормальным показателям. Воздействие ПеЭП с более высокой напряженностью (100 кВ/м) на протяжении 30 минут приводило к 10-минутной синусной аритмии у морских свинок спустя 10–20 минут после окончания экспозиции.

Система крови при воздействии ПеЭП и ПеМП, как показали исследования, в подавляющем числе случаев реагирует изменением

со стороны лейкоцитов, тогда как на содержание остальных клеток влияние оказывается в значительно меньшей степени. Исследование крови крыс, находившихся в течение 1 года в ПеЭП с напряженностью 100 кВ/м, показало сокращение общего числа лейкоцитов, тогда как содержание остальных клеток крови осталось неизменным. В экспериментах с кроликами при ежедневной экспозиции животных по 8 часов в день на протяжении 3 месяцев ПеЭП с напряженностью 40 кВ/м было выявлено возрастание числа лейкоцитов и тенденция к лимфопении, которые сохранялись на протяжении всего воздействия. В крови крыс, находившихся на протяжении 3 часов в ПеМП частотой 0,5 и 8 Гц с напряженностью 4×10^3 А/м, отмечалось увеличение числа лейкоцитов, а также изменялось время свертывания крови, тогда как при тех же частотах и времени экспозиции, но при удвоенной интенсивности, отмечался противоположный эффект. Фазные изменения в содержании лейкоцитов крови крыс наблюдались в течение всего времени их пребывания (6 месяцев) в ПеМП частотой 50 Гц с интенсивностями 75, 750 и 7500 А/м, причем только в случае 7500 А/м в самом начале эксперимента отмечалась лейкопения. Динамика морфологических изменений в групповых лимфатических фолликулах кроликов в процессе ежедневного 6-часового воздействия ПеМП частотой 50 Гц при 16000 А/м носила синусоидальный характер.

Пребывание мышей в ИМП с напряженностью 3,5 кВ/м и частотой следования импульса 10 Гц на протяжении 56 часов снижало через 14 дней величину гематокрита, однако этот эффект в ходе дальнейшей экспозиции исчезал. В случае использования ИМП с частотой следования импульсов 6 Гц с напряженностью 4×10^3 А/м, при экспозиции крыс в течение 3 часов количество лейкоцитов периферической крови возрастало, а при увеличении до 4×10^6 А/м – снижалось.

Иммунная система исследовалась как со стороны неспецифического, так и специфического иммунитета. В процессе изменения фагоцитарной активности лейкоцитов крысы под влиянием в течение 14 суток ПеМП частотой 50 Гц при интенсивности 1600 А/м отмечалось три фазы: стимуляции, развивающаяся через 48 часов после начала воздействия, угнетения, формирующаяся на 3 сутки и, начиная с 5 суток, фаза адаптации. Динамика содержания комплемента в крови крыс при экспо-

зиции в ПеМП при аналогичных условиях эксперимента, но с повышенной интенсивностью поля до 16000 А/м характеризовалась максимальными значениями через 6 часов и 3 суток после начала эксперимента и снижением на 2 и 7 сутки. При полностью идентичных условиях экспозиции пролиферативные процессы в селезенке крыс, оцениваемые по числу пиронинофильных клеток, активировались в процессе воздействия ПеМП через 24 часа, на 3 и 14 сутки и были снижены на 7 сутки эксперимента. Динамика пролиферативных процессов в тимусе крыс (число лимфобластов) при аналогичных, как в предыдущем случае, параметрах и времени воздействия ПеМП также имела волнообразный характер: активация через 12 часов и 5 суток, ингибирование через 48 часов и на 7 сутки. Такие же изменения претерпевает содержание комплемента в крови кроликов и при экспозиции в ПеМП частотой 50 Гц с индукцией 45 мТл в течение 15 минут, заключающиеся в снижении на 1 и 3 сутки, повышении на 7 и снова снижении на 14 сутки.

Эндокринная система изучалась при нахождении крыс на протяжении 12 дней в ПеЭП частотой 50 Гц с напряженностью 100 кВ/м. Экспозиция приводила к увеличению содержания катехоламинов в крови и повышению уровня их экскреции с мочой. Спустя 6 часов у животных в крови преобладало повышение содержания адреналина, а после 12-дневного воздействия – норадреналина. В других исследованиях у крыс, в течение 30 дней находившихся в ПеЭП частотой 60 Гц при напряженности 15 кВ/м, падение уровня содержания кортикостероидов в сыворотке сопровождалось снижением массы тела животных, гипертрофии гипофиза и надпочечников. Однако способность крыс к реакции на холодовой стресс при этом не изменилась.

Содержание кортикостерона в крови крыс, находившихся в течение 5,5 часов в ПеЭП частотой 60 Гц, в ответ на введение АКТГ, возросло в 3 раза при интенсивности 10 кВ/м, при 5 кВ/м изменения были статистически недостоверны, а при 100 и 1000 кВ/м по сравнению с контрольными животными вообще отсутствовали. Однако в условиях *in vitro* наблюдался противоположный эффект, – после 2 часовой экспозиции в ПеЭП частотой 60 Гц при напряженностях 5, 10, 100 и 1000 кВ/м реакция тканей надпочечников после введения АКТГ отмечалась только при 1000 кВ/м.

Фазный характер реакций со стороны эндокринных желез отмечался у мышей в процессе их пребывания в течение от 5 до 320 суток в ПеЭП частотой 50 Гц и интенсивностью 40 кВ/м. При экспозиции в течение первых 5–10 суток у подопытных животных повышалась активность коры надпочечников и эпителия щитовидной железы, а к 20 суткам зарегистрировано угнетение функциональной активности обеих желез. Дальнейшее пребывание мышей в ПеЭП вызывало на 40-е и 80-е сутки новую волну повышения активности надпочечников и, в меньшей степени, щитовидной железы. Увеличение экспозиции до 160 и 320 суток приводило к срыву адаптационных процессов.

Воспроизведение, развитие и рост стали особенно интенсивно изучаться после вызвавших в свое время определенный резонанс в научных кругах результатов, полученных в коллективе под руководством J. Delgado [27]. В этих исследованиях прослеживалось развитие куриных эмбрионов после их экспозиции в течение 40 часов в ПеМП на частотах 10, 100 и 1000 Гц с интенсивностями 0,12, 1,2 и 12 мкТл. Было обнаружено нарушение эмбриогенеза только на частоте 100 Гц при 1,2 мкТл, тогда как другие частоты и интенсивности не оказывали существенного действия или вызывали обратные эффекты.

Выращивание трех поколений мышей в условиях постоянного присутствия ПеЭП частотой 60 Гц с напряженностью 10 кВ/м не показало различий в частоте беременности самок или числе потомства по сравнению с контрольной группой животных. Однако смертность среди потомства увеличивалась в молодом возрасте после первого поколения, которая при повторной экспозиции сохранялась, но наблюдалась в более раннем возрасте. В течение длительного, длившегося 10 месяцев эксперимента по воздействию ПеЭП частотой 60 Гц при напряженности 160 В/м на мышей достоверных различий в частоте воспроизведения потомства по сравнению с контрольными животными обнаружено не было. В интервале напряженностей ПеЭП частотой 50 Гц от 1 В/м до 150 кВ/м количество индуцированных бактерий *E.coli* при 2-часовой экспозиции достоверно увеличивается только при 0,5 и 1 кВ/м в 3,4 и 2,18 раз, соответственно, тогда как увеличение интенсивности до 150 кВ/м ведет к их снижению.

Обмен веществ исследовался у мышей в процессе экспозиции в ПеЭП частотой 50 Гц с напряженностью 4,8 кВ/м. Результаты показали изменения по сравнению с животными, находящимися в условиях экранирования (клетка Фарадея): спустя 1 час возросло потребление кислорода печенью, а температура тела возросла.

Экспозиция крыс в ПеМП частотой 50 Гц с напряженностью 16 кА/м на протяжении 24 часов снижала активность гексокиназы в среднем на 25 %, а увеличение напряженности до 72 кА/м вызывало еще более выраженное ее снижение активности в печени (на 30 %), в почках (на 28 %) и в сердце (на 44 %), в то время как в ткани мозга подобных изменений не наблюдалось. Скорость реакции гликолиза (анаэробная стадия) *S. cerevisiae* в ПеМП частотой 1; 2 и 3 Гц ускорялась после 20–30-минутной экспозиции в поле от 4,8 до 40 А/м, тогда как при интенсивности свыше 40 А/м наблюдалась обратная реакция. В случае использования частот 0,01; 0,1; 10; 50 и 100 Гц при тех же интенсивностях ПеМП, общая направленность ответных реакций менялась на противоположную.

Современное состояние знаний о механизмах взаимодействия магнитных полей с живыми системами и возникающих биологических эффектах позволяет попытаться объяснить некоторые биофизические механизмы, путем которых ПеЭП и ПеМП низкой частоты взаимодействуют с биологическими объектами.

Существующие экспериментальные данные о биологических реакциях организмов на действие ПеЭП и ПеМП указывают на то, что феноменологически они могут быть объяснены тремя биологическими эффектами:

- индуцированием электрических потенциалов в системе кровообращения;
- индуцированием магнитофосфена низкочастотными импульсными и ПеМП с временными показателями изменений, составляющими более 1,3 Тл/с, или синусоидальными полями 15–60 Гц и напряженностью от 2 до 10 мТл, причем в последнем случае отмечается частотная зависимость;
- индуцированием ПеМП широкого спектра изменений на клеточном и тканевом уровнях при плотности индуцированного тока свыше 10 мА/м², когда многие из этих эффектов, вероятно, являются следствием взаимодействий с компонентами клеточной мембраны.

Следует особо отметить, что воздействию низкочастотных ПеЭП и ПеМП посвящено слишком мало систематических исследований, чтобы можно было определить те пороговые характеристики поля, которые вызывают зависимость типа «доза-эффект» в изменениях биологических функций. И несмотря на то, что хотя во многих исследованиях в условиях *in vitro* описаны различные феномены при индуцировании токов в диапазоне значений от 1 до 10 мА/м², их биологическая значимость не определена, что пока не позволяет их использовать для дозовой оценки воздействия низкочастотных ПеЭП и ПеМП применительно к магнитотерапии.

В заключение следует отметить, что проанализированные результаты экспериментальных данных позволяют сделать некоторые обобщения, касающиеся биологического действия ПеЭП и ПеМП КНЧ-диапазона. Биологические эффекты воздействия низкочастотных ПеЭП и ПеМП обнаруживаются практически на всех уровнях организации организмов – от молекулярного до организменного. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что при этом наиболее чувствительными физиологическими системами являются нервная, иммунная и эндокринная. В подавляющем большинстве случаев все отмеченные изменения физиологических и биохимических показателей протекают в рамках реакции организма на слабые или умеренные раздражители. Все эти изменения сложным образом зависят от энергетических и амплитудно-частотных характеристик ПеЭП и ПеМП и времени их действия. Весь комплекс наблюдаемых в экспериментах функциональных изменений, вызванных действием ПеЭП и ПеМП, можно рассматривать как свидетельство активации систем неспецифической адаптации организма, что способствует повышению его устойчивости к действию других неблагоприятных факторов. В то же время, нельзя не подчеркнуть, что остается еще много неясного в биологическом действии ПеЭП и ПеМП, хотя имеющиеся результаты исследований позволят по-новому осмыслить участие КНЧ электромагнитных полей в организации и регулировании биологических процессов, которые происходят на системном уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Marino A.A., Becker R.O. Biological effects of extremely low frequency electric and magnetic fields: a

review // *Physiol. Chem. & Phys.* – 1977. – V.9, N.2. – P.131–147.

2. Tenforde T.S. Biological interactions and potential health effects of extremely-low-frequency magnetic fields from power lines and other common sources // *Annu. Rev. Publ. Health.* – 1992. – V.13. – P.173–196.

3. Kavet R., Stuchly M.A., Bailey W.H., Bracken T.D. Evaluation of biological effects, dosimetric models, and exposure assessment related to ELF electric- and magnetic-field guidelines // *Applied Occupational and Environmental Hygiene.* – 2001. – V.16, N.12. – P.1118–1138.

4. Volpe P. Interactions of zero-frequency and oscillating magnetic fields with biostructures and biosystems // *Photochem. Photobiol. Sci.* – 2003. – V.2. – P.637648.

5. *Electromagnetism in biology* / M. Kato ed. – Springer: Tokyo, Berlin, Heidelberg, New York, 2006.

6. Гигиенические критерии состояния окружающей среды 69. Магнитные поля. – Всемирная организация здравоохранения, Женева, 1992.

7. Extremely low frequency fields / *Environmental Health Criteria*; 238. – World Health Organization, Geneva, 2007.

8. Бенькова Н.П., Шевнин А.Д. Геомагнитные поля и их вариации // *Электромагнитные поля в биосфере (в 2-х томах)*. Т.1. Электромагнитные поля в атмосфере Земли и их биологическое значение. – М.: Наука, 1984. – С. 40–54.

9. Habash R.W.Y. Bioeffects and Therapeutic Applications of Electromagnetic Energy. – CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2008.

10. Markov M.S. Magnetic field therapy: a review // *Electromagn. Biol. Med.* – 2007. – V.26, N.1. – P.1–23.

11. Stuchly M.A., Esselle K.P. Factors affecting neural stimulation with magnetic fields // *Bioelectromagnetics.* – 1992. – Suppl.1. – P.191–204.

12. Stuchly M.A., Xi W. Modelling induced currents in biological cells exposed to low-frequency magnetic fields // *Phys. Med. Biol.* – 1994. – V.39, N.9. – P.1319–1330.

13. Fear E.C., Stuchly M.A. Modeling assemblies of biological cells exposed to electric fields // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* – 1998. – V.45, N.10. – P.1259–1271.

14. Stuchly M.A., Dawson T.W. Interaction of low-frequency electric and magnetic fields with the human body // *Proc. IEEE.* – 2000. – V.88, N.5. – P.643–664.

15. Готовский М.Ю., Перов С.Ю. Возможности использования численных методов в оценке воздействия низкочастотной импульсной магнитотерапии // *Традиционная медицина.* – 2010. – №2. – С. 4–8.

16. Готовский М.Ю. Магнитотерапия и ее место в современной медицине // *Традиционная медицина.* – 2010. – №3. – С. 4–10.

17. Adey W.R. Models of membranes of cerebral cells as substrates for information storage // *Biosystems.* – 1977. – V.8, N.4. – P.163–78.

18. Adey W.R. Tissue interactions with nonionizing electromagnetic fields // *Physiol. Rev.* – 1981. – V.61, N.2. – P.435–514.

19. Adey W.R. Biological effects of electromagnetic fields // *J. Cell. Biochem.* – 1993. – V.51, N.4. – P.410–416.

20. Chiabrera A., Grattarola M., Viviani R. Interaction between electromagnetic fields and cells microelectro-

phoretic effect on ligands and surface receptors // *Bioelectromagnetics.* – 1984. – V.5, N.2. – P.173–191.

21. Liboff A. Toward an electromagnetic paradigm for biology and medicine // *J. Altern. Complement. Med.* – 2004. – V.10, N.1. – P.41–47.

22. Grisett J.D. Biological effects of electric and magnetic fields associated with ELF communications systems // *Proc. IEEE.* – 1980. – V.68, N.1. – P.98–104.

23. Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz–300 GHz) / Vecchia P., Matthes R., Ziegelberger G., Lin J., Saunders R., Swerdlow A. eds. – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2009.

24. Adey W.R. Frequency and power windowing in tissue interactions with weak electromagnetic fields // *Proc. IEEE.* – 1980. – V.68, N.1. – P.119–125.

25. Bókkon I. Phosphene phenomenon: a new concept // *Biosystems.* – 2008. – V.92, N.2. – P.168–174.

26. Bókkon I., Vimal R.L. Retinal phosphenes and discrete dark noises in rods: a new biophysical framework // *J. Photochem. Photobiol. B.* – 2009. – V.96, N.3. – P.255–259.

27. Delgado J.M.R. Biological effects of extremely low frequency electromagnetic fields // *Electromagn. Biol. Med.* – 1985. – V.4, N.1. – P.75–92.

Адрес автора

К.т.н. Готовский М.Ю.
ООО «ЦИМС «ИМЕДИС»
info@imedis.ru