В. Бинги, зав. лаб. радиобиологии института общей физики РАН, к.ф.-м.н., член Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений.

Нетепловые биологические эффекты электромагнитных полей

Всемирная организация здравоохранения рассматривает рост электромагнитного загрязнения на рабочих местах и в жилых помещениях как фактор стресса для человеческого организма. Линии электропередач, бытовые электроприборы, мобильные телефоны... Люди погружены в естественные и техногенные электромагнитные поля. Они не безразличны к этим полям так же, как и другие живые системы. Данный факт подтверждается огромным числом научных работ. Однако большинство авторов отмечает наличие проблемы: физическая причина явления до сих пор неизвестна и парадоксальна. В статье рассмотрены вопросы теории нетепловых биологических эффектов электромагнитных полей.

К настоящему времени в мире накоплен обширный экспериментальный материал, свидетельствующий о существовании нетепловых, то есть, не связанных с нагревом, биологических эффектов слабых электромагнитных полей [1, 2, 4]. Нетепловая природа таких эффектов следует из того, что интенсивность действующих электромагнитных полей (ЭМП) далеко недостаточна для сколько-нибудь заметного нагрева биологического материала; реакции биологической системы на ЭМП и нагрев разнонаправлены и данные эффекты обладают выраженной частотной избирательностью, то есть имеют место лишь в некоторых частотных интервалах ЭМП, — так называемых «частотных окнах эффективности». В литературе такие эффекты иногда называют «магнитобиологическими эффектами» или МБЭ. Наблюдают также амплитудные окна эффективности, когда биологический эффект сначала растет, а затем спадает при увеличении амплитуды. Такие наблюдения противоречат представлению об исключительно тепловом происхождении биологических эффектов ЭМП — идее, положенной в основу большинства действующих в мире стандартов электромагнитной безопасности.

В то же время оконные режимы эффектов ЭМП наблюдают не всегда, что порождает сомнения в корректности и безартефактности соответствующих экспериментов. Подобные сомнения проявляют главным образом представители науки, связанной с производством средств мобильной связи и электрически емкого оборудования. При этом настаивают на том, что необходима стопроцентная воспроизводимость МБЭ для пересмотра стандартов электромагнитной безопасности. Однако подобной воспроизводимостью обладают лишь тепловые эффекты, к которым относятся и электрохимические эффекты, порождаемые вихревыми токами. Воспроизводимость же МБЭ, значительно превосходя минимально необходимую грань научной объективности, все же далека от стопроцентной.

До четверти работ по магнитобиологии сообщают о неудачных попытках наблюдения МБЭ. В силу большой длины и неконтролируемости цепи процессов трансформации сигнала ЭМП в измеряемый биологический параметр, отсутствие эффекта в конкретном эксперименте само по себе нормально. Наблюдение МБЭ, как отмечено многими исследователями, обусловлено одновременным попаданием как в электромагнитные, так и физиологические окна. Наблюдают и временные окна - интервалы времени, когда биологическая система в состоянии проявить чувствительность к МП. В большинстве случаев экспериментаторам потребовался целенаправленный поиск относительно редких удачных сочетаний электромагнитных и физиологических условий.

В одной и той же лаборатории конкретный МБЭ, как правило, надежно воспроизводим. Однако многие МБЭ пока не подтверждены исследованиями независимых лабораторий. Причина затруднений с повторением экспериментов может быть связана с разными электромагнитными условиями проведения экспериментов: в число существенных параметров входят не только частота и амплитуда ЭМП, но и постоянные магнитное и электрическое поля и их ориентация. Поэтому экспериментальное наблюдение МБЭ носит в определенном смысле вероятностный характер. Но это не означает, что МБЭ не существует, и не снижает экологической значимости фоновых ЭМП.

Опыт многолетних наблюдений говорит о том, что некоторые электромагнитные поля представляют потенциальную угрозу для здоровья людей и являются не менее существенным климатическим фактором, чем температура, давление и влажность. Накоплены опытные данные, показывающие потенциальную опасность этих полей и излучений [3, 7-9], часто скрытый характер их действия. Последствия могут проявиться через месяцы и даже годы. ***Расчеты показывают, что если вероятность онкологических заболеваний увеличивается вследствие повышенного ЭМ-фона всего на один процент, то потери 150-миллионного населения страны могут составить около трех тысяч человек в год! Это уже социальная проблема, поэтому ее решение финансируют как вовлеченные индустриальные предприятия, так и правительства многих стран мира.***

Сомнения в существовании МБЭ происходят также из-за отсутствия общепризнанного физического объяснения природы этих эффектов.

Наука и технологии в промышленности, 2002, №.3-4, стр.74-77

Данное обстоятельство породило так называемый принцип предупредительности, предписывающий снижать электромагнитную экспозицию людей даже в отсутствие понимания природы возможных биологических эффектов слабых ЭМП. Известно множество гипотез о природе МБЭ, модели механизмов создаются регулярно, изобретательность исследователей удивительна, но, к сожалению, в этой работе практически не участвуют профессиональные физики. Как следствие, модели страдают повторяющимися концептуальными недостатками и не способствуют признанию МБЭ как важного экологического фактора.

Эксперименты демонстрируют определенную общность в проявлениях МБЭ в разных лабораториях, во множестве экспериментальных конфигураций и на разных биологических объектах. Эти общие элементы или факты и должны быть основой теоретического обобщения. Каждый факт с необходимостью закрывает определенное множество объяснений, указывая на недопустимые с точки зрения физики механизмы МБЭ и, тем самым, сужает зону поиска механизмов допустимых. Каковы же эти факты и какие ограничения они накладывают на физические механизмы МБЭ?

Первый из важнейших фактов состоит в том, что наблюдают совпадение эффективных частот МБЭ с циклотронными частотами и частотами ядерного магнитного резонанса биологически важных ионов Ca, Mg и других в геомагнитном поле. Наблюдали не только численное совпадение частот, но и прямую пропорциональность эффективных частот магнитному полю. Отсюда следует, что слабое (менее 100 мкТл) низкочастотное (менее 1 кГц) магнитное поле воздействует в биологических тканях на мишени атомно-молекулярного масштаба. В то же время нельзя заключить, что циклотронный резонанс является первичным механизмом МБЭ: любой механизм с участием ионов, движущихся в МП, будет оперировать частотами циклотронного ряда, так как других комбинаций из параметров иона и МП не существует. Второй вывод — это вовлеченность эффекта Зеемана, то есть, линейная зависимость энергии стационарного движения заряда в МП от уровня МП. При этом движущаяся частица должна обладать магнитным моментом, орбитальным или спиновым.

Второй важный факт состоит в несопоставимости масштабов энергии магнитного поля (как причины) и энергии биохимической реакции (как следствия). Обычно это обстоятельство формулируют в виде так называемой «проблемы кТ»: квант энергии слабого низкочастотного МП на много порядков меньше характерной энергии единичного акта химических превращений, как тогда возможна реакция? Отметим некорректность данной формулировки: ведь в низкочастотной области даже очень слабое МП с большим запасом является классическим полем и применимость понятия кванта такого поля серьезно ограничена. Но даже рассмотрение ЭМП как классического поля не снимает парадокса. Парадокс также связан с тем, что, согласно широко распространенному мнению, заряд или ион, вступающий в химическую реакцию должен иметь достаточную энергию, чтобы преодолеть энергетический барьер реакции. Обыкновенно эта энергия сообщается ему окружающими частицами, и вклад МП здесь исчезающе мал. Можно оценить время, необходимое для того, чтобы низкочастотное МП сообщило иону энергию, необходимую для инициирования химического процесса. В идеальных условиях, когда ион является частью осциллятора (а только так и можно накопить энергию) и полностью отсутствует затухание или трение, потребуется около года даже в условиях резонанса. Следовательно, первичный физический механизм, отвечающий за магниторецепцию, не может быть резонансом.

Третий существенный факт — это яркая нелинейность МБЭ. С ростом амплитуды поля эффект сначала растет, а затем падает. Наблюдаются и два пика на амплитудной зависимости, и вообще - сложные амплитудные спектры. Нелинейный характер МБЭ проявляется также и в том, что биологическая реакция на сумму электромагнитных стимулов не равна сумме реакций на каждый из стимулов по отдельности. В частности, МБЭ может быть разрушен добавлением магнитного шума в поле экспозиции. Такие явления невозможны для линейных систем. Казалось бы, наличие эффективных частот или частотных окон (частотного спектра) говорит о резонансном действии МП на первичную мишень. Однако факт нелинейности МБЭ опровергает такой вывод. Резонанс (рост скорости обмена энергии в системе при совпадении частоты возбуждения и собственной частоты осциллятора) — это линейный эффект; единственная нелинейность, которая здесь может быть, связана с насыщением в относительно сильных полях, но не с разрушением резонанса. Известное же явление нелинейного резонанса далеко не соответствует тем условиям возбуждения, которые имеются в экспериментах по наблюдению МБЭ. Итак, первичный физический механизм МБЭ не связан с резонансными процессами также и по причине нелинейности МБЭ.

Четвертый факт состоит в замечательном сходстве биологических эффектов слабых низкочастотных МП и микроволн. Оба типа эффектов неоднократно наблюдали в одних и тех же биологических системах. В частности, в эффектах модулированных микроволн имеются резонансноподобные зависимости от частоты модуляции, причем эффективные частоты совпадают с таковыми в эффектах низкочастотных МП. Это указывает на единую молекулярную физическую природу биологического действия как низкочастотных МП, так и микроволн. Добавим еще факт существенности состояния поляризации микроволн для наблюдения биологического эффекта. Подобная зависимость хорошо известна для ЭМП, взаимодействующих с молекулярными системами, обладающими собственным магнитным моментом.

Наконец, последний из важных фактов: наблюдают биологические эффекты ЭМП, имеющие противоположное направление по сравнению с эффектами, вызываемыми нагревом биологической системы. Это недвусмысленно указывает на нетепловую природу таких эффектов.

Таковы основные факты. Отсюда следует, что первичные физические процессы, ответственные за восприятие сигналов слабых ЭМП биологическими системами, развиваются на атомно–молекулярном уровне, связаны с эффектом Зеемана, но не являются резонансами. Тогда чем могли бы быть данные физические процессы?

Все физические процессы, в которых возможно влияние ЭМП на

движение заряда, удобно разделить на классы по типу динамики заряда, классической или квантовой, и по типу динамической переменной, значение которой существенно меняется в процессе взаимодействия с ЭМП. В классической динамике мгновенное состояние частицы задано ее координатами и скоростями, в квантовой — волновой функцией или матрицей плотности. Динамическими переменными являются координаты частицы, ее импульс (или момент импульса, или энергия) и спин — «внутренняя» переменная. Возникающие классы процессов, представленные в нижеследующей таблице, легко прокомментировать с точки зрения правдоподобности их участия в магниторецепции.

Характер воздействия магнитного поля на заряд

Переменные	Классическая динамика	Квантовая динамика
Координаты	Сила Лоренца	Интерференция квантовых состояний
Энергия, импульс, угловой момент	Накачка энергии	Квантовые переходы
Спин	—	Спиновая динамика

Об изменении энергии частицы в МП было сказано выше: накопление достаточной энергии даже в идеальных условиях резонанса невозможно на разумных интервалах времени и не соответствует наблюдаемой нелинейности магниторецепции слабых полей. Этот вывод не зависит от способа описания процесса, классического или квантового.

Спиновая динамика могла бы проявиться в реакциях с участием свободных радикалов. Реализация правил отбора пар радикалов по спину не требует накопления энергии МП. Однако имеется ряд физико-химических факторов, ограничивающих изменение скорости радикальных реакций не более 1 % на 1 мТл, что недостаточно для надежного объяснения биоэффектов слабых переменных МП с амплитудой порядка 50 мкТл и менее. Кроме того, данный механизм не обладает частотной избирательностью. Гипотетические частотно-избирательные спиновые механизмы МБЭ на сегодня не имеют надежных экспериментальных подтверждений.

Действие МП на координаты частицы допускает как классическое, так и квантовое описание. В классической динамике на частицу, движущуюся в МП, действует сила Лоренца, перпендикулярная вектору скорости. Частица отклоняется, но отклонение за время свободного пробега в среде (молекулярный масштаб) чрезвычайно мало, в миллиард раз меньше длины пробега. Этот процесс явно не имеет отношения к магниторецепции.

Остается действие МП на координаты квантовой частицы, точнее, на распределение вероятностей координат, то есть на волновую функцию частицы. Перераспределение волновой функции в МП не требует накопления энергии масштаба единичного акта химической реакции, так как происходит за счет сдвига фаз компонентов волновой функции. В то же время перераспределение волновой функции связано с возникновением нелинейных интерференционных эффектов, сопоставимых по энергии с энергией химического процесса. Впервые перспективность этого класса процессов для объяснения МБЭ была показана в 1997 г. в работе автора [6].

На рис. 1 показаны приблизительные частотные и амплитудные границы для 1) тепловых и 2) гальванических (связанных с протеканием тока на границе фаз) эффектов переменных ЭМП, 3) эффектов, связанных со свободно-радикальными реакциями и 4) квантовых интерференционных эффектов.

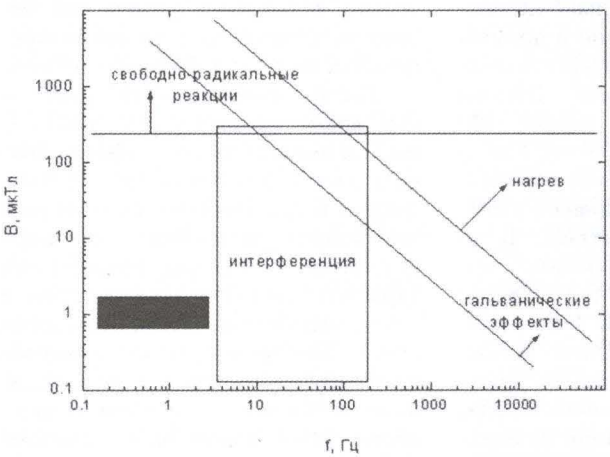

Рис. 1. Возможные механизмы МБЭ и их приближенные частотно-амплитудные границы

Отметим, что интерференционные эффекты занимают на плоскости рисунка центральную область, которая соответствует низкочастотным слабым магнитным полям. В частности, фоновые ЭМП попадают в этот диапазон. Особенно интересна квантовая интерференция вращающихся молекул; она объясняет нетепловые эффекты ЭМП как низкочастотного, так и микроволнового диапазона [5].

Проведем мысленный эксперимент с интерференцией волн микрочастиц. Заряженные частицы от источника могут проходить сквозь две щели и образуют, таким образом, интерференционный паттерн на экране, рис. 2.

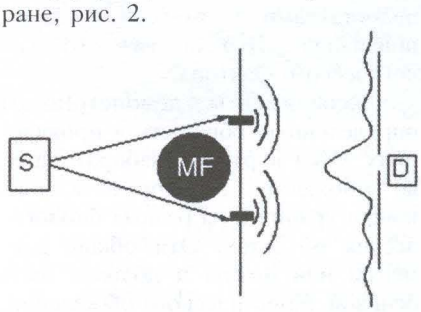

Рис. 2. Интерференция заряженных частиц в переменном магнитном поле: S - источник частиц, MF - МП, перпендикулярное плоскости рисунка, D - детектор частиц

В центре экрана имеется небольшое отверстие, за которым установлена мишень, счетчик частиц. Переменное МП индуцирует циркулярное электрическое поле, сдвигающее фазы волновых полей в противоположном направлении. В результате, интерференционная картина колеблется относительно положения, соответствующего нулевому магнитному полю, с частотой МП.

Характерной собственной частотой здесь, очевидно, является та комбинация параметров частиц и МП, которая обладает необходимой физической размерностью, то есть циклотронная частота. При варьировании МП наиболее значимые колебания интерференционного паттерна возникают в диапазоне частот, соответствующих циклотронной частоте частиц, хотя, разумеется, ни о каком циклотронном резонансе не может быть речи.

Амплитуда колебаний интерференционного паттерна будет ме-

няться при варьировании как частоты, так и амплитуды МП. В общем случае, зависимость отсчетов детектора от любого из параметров МП имеет полиэкстремальный характер.

Интерференционные явления, основанные на фазовых сдвигах, опираются на классические свойства электромагнитного поля. В квантовом описании интерференционным явлениям соответствуют многоквантовые процессы. Отсюда следует, что сравнение одного кванта энергии МП с тепловым масштабом в «проблеме кТ» некорректно и не может служить основанием для отрицания нетепловых эффектов ЭМП.

Условие наблюдаемости интерференции предполагает соразмерность характерной длины задачи и длины волны де Бройля частиц. Отсюда следует, что зависимая от МП интерференция ионов могла бы наблюдаться на микромасштабах: длина волны де Бройля для биологически важных ионов при физиологической температуре несколько меньше их размеров. Интересно, что полости некоторых белков, связывающие ионы, устроены так, что реализуют рассмотренную схему интерференции на микроуровне.

ЭМП низкочастотного и даже микроволнового диапазона не способны разорвать химические связи биологических молекул, т.е. не могут породить процесс диссоциации молекул. Однако ЭМП в состоянии управлять диссоциацией молекул, если она происходит по каким-либо другим причинам. В процессе метаболизма многие ионы и малые молекулы связываются с белками и, тем самым, меняют их биохимическую активность. Так, в частности, происходит передача биологических сигналов в организме. Происходит и обратный процесс — диссоциация. Оба процесса участвуют в формировании биологического равновесия — гомеостаза. Оказывается, что переменное ЭМП со специальными параметрами смещает равновесие и приводит к наблюдаемым биологическим эффектам. Отметим, что физическая природа явления не связана с нагревом биологических тканей за счет поглощения ЭМП. Поэтому такие явления могут происходить и в очень слабых ЭМП, которые заведомо не вызывают нагрева.

Квантово-механические расчеты динамики молекул, вращающихся в белковых полостях, дают математические формулы для вероятности диссоциации ион-белкового комплекса в зависимости от параметров МП. Эффекта возникает не при всех, а лишь при некоторых значениях частот и амплитуд МП. Как и в экспериментах, эффективные значения частот и амплитуд образуют интервалы или окна: для таких частот и амплитуд вероятность активации белковых комплексов резко возрастает.

Крайне важно, что не только частота и амплитуда переменного ЭМП, но также и величина постоянного МП относится к числу существенных параметров. Поскольку величина постоянного МП внутри зданий сильно отклоняется от локального геомагнитного поля, меняет как величину, так и направление уже на расстояниях порядка 1 м, то биологический эффект при фиксированной частоте и амплитуде может появляться и исчезать в зависимости от места нахождения облучаемой системы.

Теория квантовой молекулярной интерференции позволяет рассчитывать спектры зависимостей МБЭ от любых параметров электромагнитной экспозиции. Сравнение теоретических спектров и экспериментально найденных зависимостей показывает хорошее соответствие. Такое соответствие тем более необычно, что сравниваются результаты физической теории и биологического эксперимента. То, что измерение биологических характеристик при МБЭ следует поведению общей математической функции (типа Бесселевой) указывает на вовлеченность фундаментальных физических принципов в процесс магниторецепции.

Как опубликованные экспериментальные результаты, так и недавние теоретические достижения показывают, что ЭМП могут приводить к разнообразным биологическим эффектам, даже если они слишком слабы, чтобы вызвать сколько-нибудь опасный нагрев. Существующие стандарты электромагнитной безопасности не учитывают эту возможность. Поэтому люди, подвергающиеся воздействию ЭМП от бытовых приборов и вследствие профессиональной деятельности, — воздействию безопасному согласно существующим стандартам, — все же уязвимы с точки зрения нетепловых биологических эффектов, которые, возможно, вредны для здоровья. Примечательно, что существующие стандарты отличаются друг от друга в сотни и более раз в разных странах, что указывает на их недостаточную обоснованность.

Оказывается, что уровни потенциально эффективных ЭМП заметно ниже тех, которые считаются безопасными согласно существующим стандартам, что подтверждается и лабораторными экспериментами [9]. Это указывает на то, что сегодня стандарты электромагнитной безопасности не в состоянии обеспечить адекватную защиту пользователям электрически емкого оборудования.

Библиография

1. Бинги В.Н. Магнитобиология: эксперименты и модели. - М.: Изд. МИЛТА-ПКП ГИТ, 2002.
2. Грабовщинер А.Я. Состояние и перспективы развития квантовой медицины. //Сборник Трудов VII-й Международной научно-практической конференции по квантовой медицине (www.kvantmed.ru), - М.: Изд. МИЛТА-ПКП ГИТ, 2000. С. 21–24.
3. Григорьев Ю.Г. ЭМП сотовой связи — влияние на здоровье населения и оценка опасности. В кн.: Электромагнитные поля и здоровье человека /Под ред. Ю.Г. Григорьева – М.: Изд-во РУДН, 2002. С. 14–48.
4. F. Bersani, ed. «Electricity and Magnetism in Biology and Medicine.» Kluwer/Plenum, London, 1999.
5. V.N. Binhi and A.V. Savin. Molecular gyroscopes and biological effects of weak extremely low-frequency magnetic fields. Phys. Rev. E, 65(051912), 2002.
6. V.N. Binhi. Interference of ion quantum states within a protein explains weak magnetic field's effect on biosystems. Electro Magnetobiol., 16(3):203–214, 1997.
7. M. Nakagawa. A study on extremely low-frequency electric and magnetic fields and cancer: Discussion of EMF safety limits. J. Occupat. Health, 39:18–28, 1997.
8. R. Pool. Electromagnetic fields: The biological evidence. Science, 249:1378–1381, 1990.
9. L.G. Salford, A.E. Brun, J.L. Eberhardt, L. Malmgren, B.R.R. Persson. Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. Environmental Health Perspectives, Jan 28, 2003.

Институт общей физики РАН
119991, Москва
ул. Вавилова, 38
Тел/факс: 135-0158