

УДК 571.1

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В МАГНИТОБИОЛОГИИ: КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИДЕЙ АРБЕРА, КИАБРЕРА, ЛЕДНЕВА, ЖАДИНА, БЛЭКМАНА И БИНГИ

В.Н. Бинги

Институт общей физики РАН, Москва

В статье исследовано соотношение концепций, моделей и взглядов нескольких авторов на возможную природу нетепловых биологических эффектов слабых электромагнитных полей, — концепций, объединенных общей темой параметрического резонанса. Определены приоритеты оригинальных результатов.

Ключевые слова: электромагнитные поля, параметрический резонанс, интерференция ионных состояний, биологические эффекты.

Хотя сам факт вовлеченности параметрического резонанса в той или иной форме в магнитобиологию является спорным, оценка приоритетов важна для поддержания нормального развития работ в области теоретической магнитобиологии.

Известно, что слабые магнитные поля (МП) иногда вызывают резонансоподобный отклик в биологических системах, т.н. магнитобиологический эффект (МБЭ). Физическая природа этого эффекта до сих пор остается неясной. Особенно парадоксален МБЭ, вызванный слабыми низкочастотными МП: квант энергии такого поля на много порядков меньше энергетического масштаба химических реакций (проблема кТ).

Прежде всего, неясно, на какой объект внутри организма действует МП, и что может меняться в состоянии этого объекта.

Предложено множество объяснений МБЭ, краткое их описание можно найти в [1], а детальный разбор в [2]. Здесь мы ограничимся моделями, связанными с параметрическим резонансом ионов. Именно эти модели вызвали наиболее острую полемику, которая продолжается и сегодня.

В 1970 годах Боуин, Качмарек и Эйди [3,4] наблюдали изменения скорости выхода изотопа ⁴⁵Са из тканей мозга под действием низкочастотных, радиочастотных и СВЧ ЭМП. К тому времени было известно, что ионы кальция действуют во многих биологических процессах, таких, как синаптическая передача, секреция, жгутиковая подвижность, ферментная активация, процессы мышечного сокращения, размножения, роста и развития. Внутриклеточная концентрация кальция на четыре порядка меньше, чем во внешней среде и поддерживается несколькими мембранными

механизмами. Это обеспечивает работу быстрых сигнальных механизмов реакций на внешние условия. Особенно чувствителен к концентрации внутриклеточного кальция белок кальмодулин, влияющий на активность многих ферментов.

В дальнейшем данные Боуин и др. получили независимые экспериментальные подтверждения. Возникло обоснованное предположение, что именно ионы кальция в кальмодулине, универсальном биологическом сигнализаторе, являются мишенью ЭМП.

Вряд ли это простое умозаключение, не требующее сколько-нибудь значительных усилий ума, может быть приписано одному исследователю или связано с работой одной исследовательской группы. Например, Кисловский [5] еще в 1971 г. указывал на важную роль кальция в биологических эффектах ЭМП; в 1976 г. Боуин и Эйди обсуждали процессы связывания кальция в слабых низкочастотных электромагнитных полях [4]. Однако формально, в виде публикации специальной статьи [6], посвященной связыванию ионов кальция с кальмодулином в ЭМП, эта идея подробно разбиралась Арбером в 1985 г. Он также проанализировал биохимические процессы, вовлеченные в передачу сигнала ЭМП через изменение константы связи кальций–кальмодулин на уровень наблюдаемых биологических процессов. Рис. 1 из этой статьи иллюстрирует сказанное.

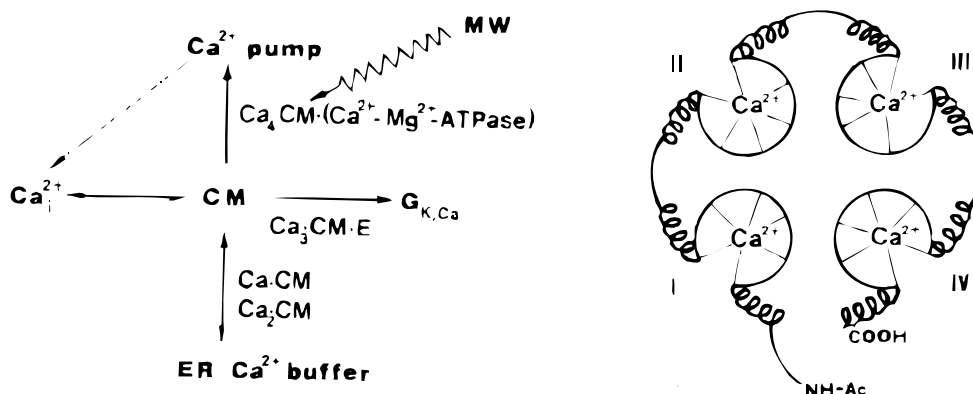


Рис. 1. Действие микроволнового ЭМП на процессы связывания ионов кальция кальмодулином, [6].

Таким образом, работой Арбера [6] в электромагнитобиологию вводится новый объект исследования — ион кальция в кальций-связывающей полости кальмодулина, или, вообще, ион в белковой полости в электромагнитном поле. Тема получает название ‘кальмодулиновая гипотеза’.

Динамику ионов с целью объяснения МБЭ рассматривали и вне ‘кальмодулиновой гипотезы’. Киабрера и др. [7] в 1985 г. исследовали параметрический резонанс свободной частицы, находящейся около белка вблизи связывающего центра. В постоянном МП движение иона финитно, в среднем по времени смещения частицы не происходит. В параллельных постоянном и переменном полях $H(t) = H + h \cos(\Omega t)$, если частота переменного МП Ω есть циклотронная частота или ее n -я субгармоника, движение иона становится инфинитным. Это, по мнению авторов, влияло на константу связи иона с белком. На циклотронной частоте магнитозависимая часть средней энергии частицы (и

вероятности связывания, с точностью до коэффициента) приблизительно пропорциональна квадрату функции Бесселя первого порядка

$$J_1^2\left(2\frac{h}{H}\right),$$

см. кривую 1 на рис. 2. Здесь первый нуль функции возникает при определенном отношении амплитуды переменного к величине постоянного МП $h/H \sim 1.8$, а максимум при $h/H \sim 0.9$. Применение этой модели к иону Ca^{2+} приводило к частичному согласию с экспериментальными данными Блэкмана [8] по скорости истечения ионов кальция из тканей мозга, полученными на разных частотах ЭМП и в разных постоянных МП.

По-видимому, это была первая, хотя и далекая от совершенства, модель магниточувствительного связывания ионов: было показано, что важные параметры движения заряда в комбинированном МП сложным образом, на манер функций Бесселя, зависят от отношения амплитуды переменного и величины постоянного МП. По ряду причин модель неприменима к реальным условиям движения ионов в биологических структурах. Однако, наличие амплитудных и частотных окон эффективности МП в модели Киабрера, которые удачно соответствовали окнам, наблюдаемым в эксперименте, указывало на перспективность поиска механизмов МБЭ, связанных с динамикой ионов.

Таким образом, ко времени появления в 1991 г. модели Леднева [9] о параметрическом резонансе ионов кальция в белковой полости были известны: 1) ион в белковой полости как мишень ЭМП и объект исследования в электромагнитобиологии (1985), 2) частотные спектры и нелинейные амплитудные зависимости Блэкмана биологических эффектов в комбинированном постоянном МП и РЧ и низкочастотном электрическом поле [8], Блэкман тогда не использовал в эксперименте переменное МП (с 1979), 3) модель Киабрера, объясняющая эти нелинейные зависимости на манер бесселевых функций (1985). Наблюдению и объяснению нелинейных (с экстремумами) амплитудных зависимостей уделяли большое внимание, поскольку они очевидным образом опровергали господствовавшее в то время представление, что только тепловые эффекты могут лежать в основе биологических эффектов ЭМП. Обсуждали вопрос, не вредит ли здоровью человека хроническое фоновое облучение магнитными полями, создаваемыми электрическим оборудованием на производствах в домашних условиях.

Поэтому работы Леднева 1991 г. по наблюдению эффекта слабых МП на биохимическую реакцию [10] и объяснению таких эффектов в рамках теории параметрического резонанса не остались без внимания и повлекли научную дискуссию. Работа [9] получила название ‘модель Леднева’. Надо сказать, что свое объяснение Леднев противопоставлял модели Либова [11], которая постулировала циклотронный резонанс ионов, но испытывала хорошо известные противоречия с физикой. Однако, как мы увидим, главное в объяснении Леднева — это нелинейные амплитудные зависимости, ибо частотный спектр одинаков во всех моделях: других ‘характерных’ частот иона в МП, помимо циклотронной и ларморовой, не существует. Поэтому модель Леднева надо сопоставлять именно с экспериментами Блэкмана и моделями Киабреры по нелинейным амплитудным зависимостям. В [9] такой анализ отсутствовал.

Леднев обратил внимание на сходство экспериментальных зависимостей величины эффекта от относительной амплитуды МП h/H с аналогичными

зависимостями, возникающими при рассеянии оптического излучения атомной системой, помещенной в МП. Такие зависимости, на манер бесселевых функций, возникают вследствие переходов между квантовыми состояниями электрона в атоме. Леднев предположил, что динамика ионов в связывающих полостях некоторых белков также могла бы следовать закономерностям параметрического резонанса атомной системы — ион, связанный в полости чем-то похож на электрон, ‘привязанный’ к ядру атома.

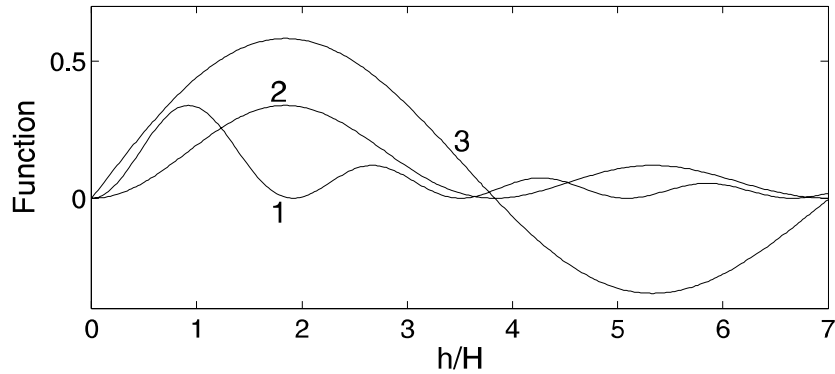


Рис. 2. Вид функций, приведенных в тексте: 1 — $J_1^2(2h/H)$, 2 — $J_1^2(h/H)$, 3 — $J_1(h/H)$.

Параметрический резонанс состоит в том, что в поле возбуждающего электромагнитного излучения оптического диапазона, в постоянном МП с параллельной ему низкочастотной компонентой, интенсивность излучения системы атомов (рассеянное излучение в некотором направлении) испытывает максимум, когда частота модуляции МП совпадает с частотой зеемановского дублета, равной циклотронной частоте электрона в МП H , или с ее субгармониками [12]. При этом в среднем интенсивность излучения приблизительно пропорциональна квадрату Бесселевой функции безразмерной амплитуды МП, т.е.,

$$J_1^2\left(\frac{h}{H}\right), \quad (1)$$

достигающей первого максимума вблизи $h/H = 1.8$, кривая 2 на рис. 2.

Теория этого явления сложна, но допускает довольно простую и краткую иллюстрацию. Приведем ее здесь полностью для отдельной двухуровневой системы, единственный возбужденный уровень которой расщеплен в МП на два подуровня, рис. 3.

Внешнее излучение возбуждает квантовые переходы и заселяет верхние состояния. Обратные переходы сопровождаются излучением электромагнитных волн. Амплитуды волн, излученных с верхнего и нижнего зеемановских подуровней, равны $A_{\pm} = \exp[i(\nu \pm \gamma H)t]$. Если МП меняется во времени, то правильная запись этого выражения такая: $A_{\pm} = \exp\left[i(\nu t \pm \gamma \int H(t)dt)\right]$. Если же МП содержит постоянную часть и переменную компоненту, например $H(t) = -H + h \cos(\Omega t)$, то, взяв интеграл, амплитуды излученных волн записываем в виде $A_{\pm} = \exp[i(\nu t \mp \gamma Ht \pm \gamma h \sin(\Omega t)/\Omega)]$.

Амплитуда суммарной волны равна $A = A_+ + A_-$, а ее интенсивность есть усредненный квадрат амплитуды:

$$I \sim \overline{A_+ A_+^*} + \overline{A_- A_-^*} + \overline{A_+ A_-^*} + \overline{A_- A_+^*}.$$

Здесь горизонтальная черта означает усреднение по времени, а * — комплексное сопряжение. Первые два члена создают неизменную часть в интенсивности излучения, а вторые — часть, зависимую от параметров МП. Оба эти члена дают одинаковый вклад, поэтому рассмотрим один из них. После несложных преобразований с учетом обозначений $\omega_0 \equiv 2\gamma H$, $\omega_1 \equiv 2\gamma h$, получаем

$$A_+ A_-^* = \exp(-i\omega_0 t) \exp[i\omega_1 \sin(\Omega t)/\Omega] = \sum_n J_n\left(\frac{\omega_1}{\Omega}\right) \exp[-i(\omega_0 - n\Omega)t].$$

Усреднение этого выражения по времени дает ноль, за исключением случаев, когда частота МП Ω равна точно ω_0/n , где $n = 1, 2, \dots$. В таких случаях магнитозависимая часть интенсивности излучения определяется очевидным выражением $J_n(n\omega_1/\omega_0) = J_n(nh/H)$ или

$$J_1\left(\frac{h}{H}\right)$$

на ларморовой частоте, т.е. при $n = 1$ (кривая 3 на рис. 2). Как видно, это отличается от правильного выражения $J_1^2(h/H)$, что является следствием чрезмерного упрощения. Такое рассмотрение есть не более чем иллюстрация явления атомного параметрического резонанса. Никакой новой физики оно, разумеется, не содержит.

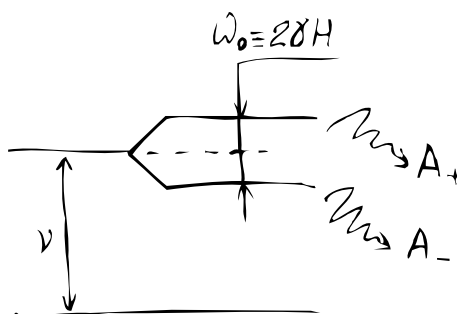


Рис. 3. Излучения и обозначения частот при квантовых переходах в модельной системе.

В работе [9] 1991 г. (препринт 1989 г.) Леднев привел подобную иллюстрацию и постулировал, что ион в белковой полости ведет себя как электрон в атоме. Он излучает ЭМП радиочастотного (ν) диапазона, а это излучение, интенсивность которого меняется в МП, и вызывает, неким загадочным образом, биологическую реакцию. В [13] Леднев дает больше физических пояснений, в частности, обсуждает известную идею [14,15] о возможной связи поляризации колебаний иона и МБЭ. Утверждалось даже, что состояние поляризации иона в белковой полости описывается теми же соотношениями, что и интенсивность рассеянного излучения. Обоснования этой идее, однако, не дано. И это естественно, поскольку теория интерференции атомных состояний (атомный параметрический резонанс) вообще не содержит

угловую переменную, необходимую для описания поляризации состояний электрона в атоме. Эта теория изучает поляризацию излучения электронов, которая конечно связана с поляризацией самих электронных волновых функций, но эта связь остается за рамками теории. Нельзя не отметить проницательность Леднева в отношении физики обсуждаемых явлений. Для реализации интересной идеи ему не хватило лишь опыта работы в области теоретической физики. Это было сделано через несколько лет в работах Бинги [16] и более поздних по теории интерференции угловых ионно-молекулярных состояний.

По сути дела, модель Леднева не является моделью. С точки зрения физики она не содержит ничего нового: утверждается, что известный результат известной теории описывает известный объект исследования. Обычно, модель явления содержит: 1) уравнения поведения объекта модели, в данном случае иона, 2) обсуждение идеализаций, при которых запись уравнений имеет смысл, 3) решения уравнений и их интерпретацию. Таковы, например, модели Либова, Киабрера, Жадина. Ничего подобного в работе Леднева нет. Нет и доказательств тому, что утверждается. В чем же ее ценность? Только в одном: в том, что она *обращает внимание* на вышеуказанное сходство зависимостей. В этой идее сходства и заключена новизна и оригинальность модели. В ней также присутствует и биохимия, подробно раскрытая в [17], но эта ее часть должна быть оценена биохимиками, нас же интересует лишь физико-математическая часть. В этой части у Леднева *нет результата*. Оттого, что электрон в теории атомного параметрического резонанса назвали ионом, никакой новой физики не появляется, а ошибки непременно возникают. Нельзя произвольно изменить массу объекта теории на три порядка — те идеализации, на которых построена теория, перестают работать.

Заметим, что в этой последней работе [17] 1996 г. содержится иная версия иллюстрации параметрического резонанса, в которой, однако, имеется серьезная математическая ошибка: появление по ходу математических преобразований нового аргумента у функции — независимой переменной, которой не было в исходных соотношениях. Леднев приходит к формуле, уже известной в теории атомной спектроскопии в МП, фактически к выражению (1), которое, в таком случае, и надо рассматривать только как уже известный результат. Значит, [17] не содержит ничего нового в смысле физики связывания ионов в МП в сравнении с работой [9].

Надо сказать, что физико-математическая часть в публикациях Леднева вообще очень *невнятно* написана. По-видимому, это побудило в 1994 г. Бланчард и Блэкман в [18] к усовершенствованию модели Леднева. Их неудовлетворенность происходила еще и оттого, что они владели экспериментальными данными, которые существенно отличались от предсказаний по модели Леднева. Амплитудная зависимость МБЭ в их экспериментах описывалась скорее функцией $J_1(2h/H)$, чем $J_1(h/H)$. Такая зависимость была ими получена, — вследствие ошибки при ‘иллюстрировании’ атомного параметрического резонанса своим образом. Они назвали все это ‘ионным параметрическим резонансом’. Полагали, что одноосное МП вызывает изменение населенностей квантовых состояний иона. Однако изменение средней интенсивности излучения в атомном параметрическом резонансе существует лишь в определенных направлениях. Интегральная интенсивность излучения постоянна, следовательно, постоянны и населенности излучающих зеемановских уровней.

Следует прокомментировать ту иногда высказываемую крайнюю точку зрения, что модель ионного параметрического резонанса полностью заимствована у Леднева.

Это поверхностное суждение. И дело здесь, конечно, не в двойке у аргумента бесселевой функции. Заимствовать можно лишь *результат* научного исследования. Поскольку у Леднева не было результата, вопрос о заимствованиях просто не стоит. Как Леднев, так и Бланчард–Блэкман использовали один и тот же объект исследования, предложенный Арбером в [6] — ион в полости белка в ЭМП, — однако без ссылок на эту работу. В обеих моделях использована иллюстрация известного явления атомного параметрического резонанса как метод исследования. Ссылка на авторство Леднева вышеуказанной идеи сходства у Бланчард имеется, а дальше — каждый имеет право пытаться применить известный метод к решению известной задачи. Монополии на объект исследования в науке не существует.

Как видим, идея параметрического резонанса ионов довольно запутана. Ее критиковали в [19,20]. Авторы этих статей, не вникая в теорию атомного параметрического резонанса, пытались доказать, что тепловые возмущения делают предложенный механизм неработоспособным при физиологической температуре 300 К. При этом они исходили из того, что механизм работоспособен в отсутствие тепловых возмущений, т.е. при 0 К. Все эти вопросы детально разобраны в монографии [2]: механизм не работает независимо от фактора температуры. Указанные две критические работы неприемлемы, поскольку основаны все на тех же иллюстративных представлениях об атомном параметрическом резонансе. Однако, существует масса других неоспоримых аргументов, почему параметрический резонанс ионов в белках невозможен.

В 1996 г. Жадин [21] рассмотрел ион как классический осциллятор в белковой полости при действии тепловых возмущений. Поскольку сила Лоренца перпендикулярна вектору скорости частицы, то она может менять лишь *параметры* в уравнениях движения. То есть осциллятор возбуждается параметрически очень слабым сигналом в присутствии гораздо более мощной аддитивной случайной силы. Предлагалась идея, согласно которой на частоте резонанса энергия осциллятора может возрасти на несколько градусов. Однако, даже в отсутствие шума и затухания в наиболее оптимальных условиях энергия иона могла бы заметно измениться лишь через несколько месяцев когерентной раскачки. Следовательно, речь могла бы идти о том, что МП управляет процессом обмена энергией иона и источника случайной силы. Но не предложено никакого механизма, который бы действовал *против* естественной тенденции к равномерному распределению тепловой энергии по всем степеням свободы.

Общий недостаток всех моделей параметрического резонанса ионов состоит в том, что они не обеспечивают необходимых изменений каких-либо свойств системы ион–среда даже в отсутствие шумовых факторов и, поэтому, не в состоянии объяснить МБЭ.

Этот недостаток впервые был преодолен Бинги в [16], где из уравнения Шредингера для иона в белковой полости была рассчитана плотность распределения волновой функции иона в МП. Неоднородность этого распределения, возникающая за счет интерференции волновых функций зеemanовских подуровней, нелинейно связана с вероятностью выхода иона из полости, т.е. с изменением константы связи ион–белок. Последующие биохимические процессы могут следовать схемам Арбера и Леднева, приводя в итоге к наблюдаемой биологической реакции.

Основная формула, которая позволяет рассчитывать величину возможного магнитобиологического эффекта в параллельных постоянном H и переменном h магнитном поле частотой Ω , имеет вид

$$P(h, H, \Omega) = \sum_{m \neq m'; n} |a_{mm'}|^2 \frac{\sin^2 A}{A^2} J_n^2 \left(\frac{\Delta m}{2} \frac{h\Omega_c}{H\Omega} \right), \quad A = \left(\frac{1}{2} \Delta m + n \frac{\Omega}{\Omega_c} \right) \Xi.$$

Здесь m — магнитное квантовое число, $\Delta m = m - m'$, $\Xi = T\Omega_c$ — безразмерный параметр, зависящий от свойств комплекса ион-белок, $\Omega_c = qH/Mc$ — циклотронная частота иона, T — время реакции белка на изменение состояния иона. Элементы $a_{mm'}$ есть постоянные коэффициенты, которые определяют начальные условия пребывания иона в белковой полости. Легко найти, что на ларморовой частоте $\Omega = \Omega_c/2$ основной вклад в P будет пропорционален $J_1^2(h/H)$.

В последующих работах были вычислены характерные частотные и амплитудные спектры интерференции, возникающие в различных электромагнитных условиях, в том числе в постоянных и импульсных полях, в электрических и микроволновых полях, в скрещенных полях, в условиях магнитного шума и магнитного вакуума [1,2]. Вычисления показывают высокий уровень соответствия с многими известными экспериментальными данными.

Учет собственных вращений макромолекул белка позволил объяснить возникновение двойки в аргументе бесселевой функции в амплитудной зависимости МБЭ: возможно, в вышеупомянутых экспериментах Блэкмана изменение скорости роста нейронных клеток в МП связано с тем, что ионно-белковые мишени МП прикреплены к нитям ДНК, и, следовательно, вращаются в процессах транскрипции или репликации.

В теории интерференции ионных состояний, очевидно, нет ничего из модели Леднева. Сходство чисто внешнее. Возникновение бесселевых функций в такого рода задачах является закономерным следствием центральной или осевой симметрии. Общим является лишь объект изучения — предложенный Арбером ион в белковой полости в поле ЭМП. А вот отличий — масса. Главное, теория интерференции ионных состояний — это не идея или догадка, а полноценная работающая теория, в рамках которой получено множество интересных результатов [2]. В отличие от теории интерференции атомных состояний, она позволяет рассчитать внутреннее устройство волновой функции иона в ЭМП и предсказать его влияние на вероятность диссоциации.

В настоящее время интерференционная теория МБЭ развивается в направлении исследования не ионной, а молекулярной интерференции. Это обусловлено общей для многих моделей МБЭ трудностью — проблемой кТ. Ионная интерференция решила только часть этой проблемы, связанную с несопоставимостью энергии сигнала МП и энергетического масштаба химической реакции. Вторая часть проблемы связана вот с чем. Чтобы биологический или биофизический рецептор мог различать МП разных частот из диапазона около Ω , необходимо, чтобы он мог сохранять свое собственное состояние неизменным в отсутствие МП по крайней мере в течение времени $1/\Omega$. В биологической ткани на молекулярном уровне такие долгоживущие конструкции выглядели невозможными вследствие тепловых возмущений. Однако, в [2] предложено и опубликовано в наиболее цитируемом физическом журнале [25] предположение о наличии в некоторых белковых полостях небольших молекул в связанном состоянии. Причем характер этих ковалентных связей, крепящих молекулу к стенкам полости, таков, что позволяет им почти свободно вращаться (молекулярный гироскоп). Расчеты показали, что если радиус полости превышает 10–15 ангстрем, то

время когерентного вращения составляет десятки миллисекунд, и этого достаточно для проявления интерференционных эффектов угловых молекулярных состояний. Характер предсказаний этой теории вполне аналогичен предсказаниям теории ионной интерференции. Таким образом, проблема кТ получает, по крайней мере, формальное решение. Этими работами опровергнуто стойкое в среде физиков мнение, что существование МБЭ противоречит физическим законам.

Читатель может оценить уровень соответствия теории и эксперимента в части амплитудных зависимостей. Приведем лишь некоторые данные Леднева и Блэкмана. Данные Блэкмана были подвергнуты критике Ледневым [26], поскольку они были получены в неоднородном МП и в условиях, когда переменная компонента поля не была параллельна постоянному МП, возможно это и было причиной наблюдения зависимости, которая не укладывалась в модель Леднева. Однако, обстоятельный анализ степени неоднородности и непараллельности показал, что результаты Блэкмана не могут быть отклонены по указанной причине [27]. Данные представлены на рис. 4 точками. К сожалению, эксперименты в области наблюдения биологических эффектов слабых низкочастотных МП трудно воспроизводимы. Еще только предстоит понять, почему это так. Но замечательный факт падения величины МБЭ с ростом амплитуды МП в некотором диапазоне подтвержден несколькими независимыми научными группами.

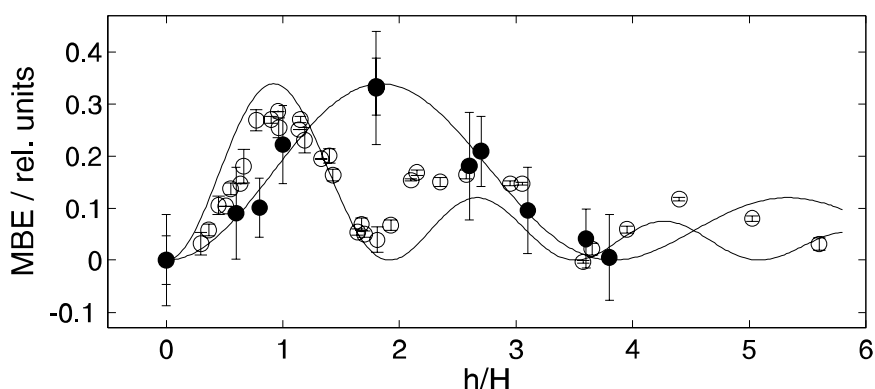


Рис. 4. Экспериментальные данные по МБЭ: ● — [22]; ○ — [23,24] и аппроксимирующие их функции $J_1^2(h/H)$ и $J_1^2(2h/H)$.

Таким образом, на основании анализа литературы, имеющей отношение к теме параметрического резонанса в магнитобиологии, автор этой статьи пришел к следующему выводу, который, несомненно, при наличии должной аргументации может быть оспорен другими исследователями:

С. Арбер впервые ввел в электромагнитобиологию объект исследования — ион в связывающей белковой полости как мишень электромагнитных воздействий. К. Блэкман впервые наблюдал зависимость эффективных частот от уровня постоянного МП и нелинейные амплитудные зависимости МБЭ. А. Киабрера впервые теоретически показал, что параметры движения иона в ЭМП могут зависеть от отношения переменного и постоянного магнитных полей на манер бесселевых функций и имеет смысл сопоставлять такие расчеты с наблюдаемыми нелинейными амплитудными зависимостями. В. Леднев впервые обнаружил резонансо-подобный

эффект МП на биохимическую реакцию и замечательное сходство амплитудных зависимостей МБЭ и атомного параметрического резонанса. В. Бинги впервые разработал теорию интерференции угловых молекулярных состояний [2], которая формально решает проблему кТ. Эта теория соединила в себе лучшее из того, что было достигнуто к 1997 г. многими авторами в поисках физического механизма биологического действия ЭМП. В заключение отметим, что и эта теория не приобрела пока статуса общепризнанной [28] и является на сегодня лишь хорошо обоснованной гипотезой, требующей дальнейших исследований.

Автор признателен В. Ледневу, К. Блэкману и И. Беляеву за многократные обсуждения, которые не всегда оканчивались согласием, но помогли сформировать вышеприведенную точку зрения.

Список литературы

- [1] Бинги В.Н., Савин А.В. Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы. *УФН*, 173(3):265–300, 2003.
- [2] Бинги В.Н. *Магнитобиология: эксперименты и модели*. ‘МИЛТА’, М., 2002. 592 с. www.biomag.info.
- [3] S.M. Bawin, L.K. Kazmarek, and W.R. Adey. Effects of modulated VHF fields on the central nervous system. *Ann. NY Acad. Sci.*, 247:74–81, 1975.
- [4] S.M. Bawin and W.R. Adey. Sensitivity of calcium binding in cerebral tissue to weak environmental electric fields oscillating at low frequency. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 73:1999–2003, 1976.
- [5] Л.Д. Кисловский. О возможном молекулярном механизме влияния солнечной активности на процессы в биосфере. In *Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли*, pages 147–164. Наука, Москва, 1971.
- [6] S.L. Arber. Microwave enhancement of membrane conductance: Calmodulin hypothesis. *Physiol. Chem. Phys. Med. NMR*, 17:227–233, 1985.
- [7] A. Chiabrera, B. Bianco, F. Caratozzolo, G. Giannetti, M. Grattarola, and R. Viviani. Electric and magnetic field effects on ligand binding to the cell membrane. In A. Chiabrera, C. Nicolini, and H.P. Schwan, editors, *Interaction Between Electromagnetic Fields and Cells*, pages 253–280. Plenum, New York, 1985.
- [8] Blackman C.F. The biological influences of low-frequency sinusoidal electromagnetic signals alone and superimposed on RF carrier waves. In A. Chiabrera, C. Nicolini, and H.P. Schwan, editors, *Interaction Between Electromagnetic Fields and Cells*, pages 521–535. Plenum, New York, 1985.
- [9] V.V. Lednev. Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems. *Bioelectromagnetics*, 12:71–75, 1991.
- [10] Л.А. Шувалова, М.В. Островская, Е.А. Сосунов, В.В. Леднев. Слабое магнитное поле настроенное на параметрический резонанс меняет скорость Ca^{2+} калмодулин-зависимого фосфорилирования миозина. *Доклады АН СССР*, 317(1):227–230, 1991.
- [11] A.R. Liboff. Geomagnetic cyclotron resonance in living cells. *J. Biol. Phys.*, 13:99–102, 1985.
- [12] Е.Б. Александров, Г.И. Хвостенко, М.П. Чайка. *Интерференция атомных состояний*. Наука, Москва, 1991. 256 с.
- [13] V.V. Lednev. Possible mechanism for the effect of weak magnetic fields on biological systems: Correction of the basic expression and its consequences. In M. Blank, editor, *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*, pages 550–551. San Francisco Press, 1993.
- [14] M.N. Zhadin and E.E. Fesenko. Ion cyclotron resonance in biomolecules. *Biomedical Sci.*, 1(3):245–250, 1990.
- [15] D.T. Edmonds. Larmor precession as a mechanism for the detection of static and alternating magnetic fields. *Bioelectroch. Bioener.*, 30:3–12, 1993.
- [16] 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.
- [17] В.В. Леднев. Биоэффекты слабых комбинированных, постоянных и переменных магнитных полей. *Биофизика*, 41(1):224–232, 1996.
- [18] J.P. Blanchard and C.F. Blackman. Clarification and application of an ion parametric resonance model for magnetic field interactions with biological systems. *Bioelectromagnetics*, 15:217–238, 1994.
- [19] R.K. Adair. Criticism of Lednev's mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems. *Bioelectromagnetics*, 13:231–235, 1992.
- [20] S. Engstrom. Dynamic properties of Lednev's parametric resonance mechanism. *Bioelectromagnetics*, 17:58–70, 1996.
- [21] М.Н. Жадин. Действие магнитных полей на движение иона в макромолекуле: теоретический анализ. *Биофизика*, 41(4):832–849, 1996.
- [22] В.В. Леднев, Л.К. Сребницкая, Е.Н. Ильясова, З.Е. Рождественская, А.А. Климов, Н.А. Белова, Х.П. Тирас. Магнитный параметрический резонанс в биосистемах: Экспериментальная проверка предсказаний теории с использованием регенерирующих планарий *Dugesia tigrina* в качестве тест-системы. *Биофизика*, 41(4):815–825, 1996.
- [23] C.F. Blackman, J.P. Blanchard, S.G. Benane, and D.E. House. Empirical test of an ion parametric resonance model for magnetic field interactions with PC-12 cells. *Bioelectromagnetics*, 15:239–260, 1994.
- [24] C.F. Blackman, S.G. Benane, and D.E. House. Frequency-dependent interference by magnetic fields of nerve growth factor-induced neurite outgrowth in PC-12 cells. *Bioelectromagnetics*, 16:387–395, 1995.
- [25] V.N. Binhi and A.V. Savin. Molecular gyroscopes and biological effects of weak extremely low-frequency magnetic fields. *Phys. Rev. E*, 65(051912):1–10, 2002.
- [26] Private communication, 2004.
- [27] В.Н. Бинги. Анализ ошибок определения магнитных полей в системе экспозиции К. Блэкмана. In *Ежегодник Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений 2003*, pages 188–195. Изд-во 'АЛЛАНА', М., 2004. 260 с.
- [28] В.Н. Бинги. За что и как критикуют магнитобиологию. In *Ежегодник Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений 2003*, pages 195–209. Изд-во 'АЛЛАНА', М., 2004. 260 с.

Поступила в редакцию 28.10.2004 г.

