

ПАРАДОКС МАГНИТОБИОЛОГИИ: АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕШЕНИЯ

© 2006 г. В.Н. Бинги, В.А. Миляев, Д.С. Чернавский*, А.Б. Рубин**

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38;

**Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский просп., 53;*

***Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119899, Москва, Воробьевы горы*

Поступила в редакцию 24.11.05 г.

Рассмотрена так называемая «проблема kT » – ее формулировка, содержание и следствия. Проблема указывает на парадокс биологического действия слабых низкочастотных магнитных полей. Традиционная формулировка проблемы содержит скрытые предположения, анализ которых показывает их неполную состоятельность.

Ключевые слова: биологические эффекты слабых магнитных полей, проблема kT , предел чувствительности.

Природа биологических эффектов слабых электромагнитных полей остается неясной, несмотря на большой объем фактического материала. Трудность объяснения этих эффектов обычно связывают с тем, что квант электромагнитного поля низкой частоты существенно меньше характерной энергии химических превращений порядка kT . Распространено мнение, что этот факт указывает на парадокс или даже служит доказательством невозможности магнитобиологических эффектов. Данный тезис получил в литературе специальное название – «проблема kT ».

Уточним, что речь идет о магнитных полях (МП) с интенсивностью порядка геомагнитного поля и частотой от единиц до сотен герц; такие поля не вызывают сколько-нибудь существенного индукционного нагрева.

По-видимому, впервые проблема kT была сформулирована в шестидесятых годах прошлого века, в широком смысле, по отношению к открытым тогда биологическим эффектам микроволновых ЭМП с достаточно малой плотностью потока энергии, менее 100 мкВт/см^2 [1]. Особенно эффективны были микроволны, модулированные низкочастотным сигналом. Позднее было обнаружено, что и сам модулирующий сигнал в виде слабого магнитного поля способен оказывать заметное действие на организмы. Для таких эффектов проблема kT приобрела

особенно драматический смысл, так как квант поля на много, 11–12, порядков меньше kT .

Между тем, очевидно, проблема kT в вышеприведенной формулировке содержит три неявных предположения:

- первичный акт магниторецепции развивается на атомно-молекулярном уровне,
- взаимодействие переменного МП и молекулярной мишени есть одноквантовый процесс,
- взаимодействие поля и мишени происходит в условиях теплового равновесия.

Эти предположения или постулаты, однако, не совсем обоснованы и нуждаются в уточнениях. В разное время проблему kT в той или иной форме обсуждали в работах [2–5], но единой точки зрения на корректность ее формулировки до сих пор нет. В настоящей статье постулаты проблемы обсуждены и показана их неполная состоятельность: помимо молекулярных мишеней, в организме могут присутствовать относительно крупные частицы с почти макроскопическим магнитным моментом. В отношении же молекулярных мишеней, их взаимодействие с низкочастотным МП имеет многоквантовый характер и может развиваться в отсутствие теплового равновесия.

СУБМИКРОННЫЙ УРОВЕНЬ МАГНИТОРЕЦЕПЦИИ

Обратим внимание на найденные во многих живых объектах наноразмерные частицы, преимущественно из кристаллического магнетита, обладающие магнитным моментом. Магнитный

момент μ этих частиц превышает элементарный на семь-девять порядков. Энергия их поворота в слабом магнитном поле H существенно больше энергии тепловых флуктуаций kT .

Особый интерес представляют частицы магнетита, обнаруженные в мозге многих животных и человека. Установлено, что они имеют биогенное происхождение, т.е. образуются со временем в результате кристаллизации непосредственно в мозге. Биогенные частицы магнетита часто называют «магнитосомами»; первые их наблюдали в бактериях, проявляющих магнитотаксис [6]. Недавно показано, что магнитные наночастицы могли бы образовываться и в ДНК-комплексах [7]. Содержание магнитосом в тканях мозга человека составляет около $5 \cdot 10^6$, в мозговой оболочке более 10^8 кристаллов на грамм [8], в среднем 50 нг/г по порядку величины [9].

Энергия 100-нанометровой магнитосомы в геомагнитном поле равна приблизительно $24kT$. Следовательно, регулярные изменения этой энергии в дополнительном переменном магнитном поле h составят около $(h/H_{\text{geo}})24kT$. Если эти регулярные изменения превышают случайные, имеющие порядок $kT/2$, то они могут вызвать биологическую реакцию. Это обстоятельство накладывает естественное ограничение на величину переменного МП, способного оказать заметное влияние на биофизическую или биохимическую систему: $h > 1 - 2$ мкТл. Как показано в [10], предельная величина МП, детектируемого на биологическом уровне, может быть еще на порядок меньше при движении магнитосом в потенциале общего вида с двумя минимумами. В этом случае тепловые возмущения не маскируют, а, напротив, помогают слабым магнитным силам вызывать ответную реакцию организма.

Собственное МП частицы имеет величину до 0,1 Тл вблизи самой частицы и сильно зависит от ее ориентации. Поэтому поворот частицы может заметно изменить скорость химических реакций с участием свободных радикалов.

Очевидно, здесь проблема kT в ее традиционной формулировке попросту не стоит, поскольку первичный акт магниторецепции происходит не на молекулярном, а на субмикронном уровне относительно крупных частиц, взаимодействующих с МП. В настоящее время надежно установлено, что такие эффекты, как безошибочная ориентация многих видов животных во время их сезонных миграций, обусловлены взаимодействием геомагнитного поля

с магнитосомами [11]. Речь теперь идет об определении конкретных биофизических механизмов такого рода магниторецепции и уточнении пределов чувствительности к постоянным и переменным МП [12,13].

МНОГОКВАНТОВЫЙ ХАРАКТЕР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛЯ С МОЛЕКУЛЯРНОЙ МИШЕНЬЮ

Теоретически мишенью МП в магнитобиологических эффектах могли бы быть и атомно-молекулярные процессы, как предположено в традиционной формулировке проблемы kT . Насколько тогда обоснованы другие постулаты проблемы kT в таких механизмах, например постулат об одноквантовом характере взаимодействия поля и мишени? Этот вопрос тесно связан со способом описания электромагнитного поля – классическим или квантовым.

Критерий применимости классического описания опирается на требование больших квантовых чисел элементарных осцилляторов ЭМП в квантовом описании. В [14] такой критерий, полученный на основе общих оценок, связывает частоту f и амплитуду H магнитной или E электрической компоненты переменного поля (в гауссовой системе единиц размерности E и H одинаковы):

$$H > \sqrt{\hbar c} \left(\frac{f}{c} \right)^2. \quad (1)$$

Численно $H \gg 10^{-29} f^2$. Отсюда следует, что в области низкочастотных магнитных полей вплоть до исчезающе малых амплитуд применимо классическое описание электромагнитного поля. Критерий (1) предполагает изотропность и достаточно широкий спектр ($\Delta f - f$) излучения. Учет характеристик направленности поля лабораторных соленоидов и стабильности частоты НЧ-генераторов лишь увеличивает применимость классического описания низкочастотного (НЧ) МП.

Таким образом, для описания состояния молекулярной мишени взаимодействующей с НЧ МП, достаточно так называемого полуклассического приближения, в рамках которого квантовая динамика частиц рассматривается в классическом ЭМП. В этом приближении динамическое уравнение частицы имеет вид уравнения Шредингера, а ЭМП входит в уравнение не в виде переменных поля или квантов, а в виде параметров – векторного $\mathbf{A}$ и скалярного A_0 потенциалов классического ЭМП.

Известно, что состояния ЭМП, близкие к классическим, описываются в квантовой электродинамике при помощи так называемых когерентных состояний, минимизирующих квантовую неопределенность. Когерентные состояния являются многоквантовыми возбуждениями поля. Поэтому и процессы взаимодействия с классическим полем – это также процессы многоквантовые. Следовательно, говорить о поглощении одного кванта НЧ-поля при взаимодействии с молекулярной мишенью можно лишь в некотором абстрактном смысле, и, конечно, такой умозрительный процесс не может быть основанием для суждений о возможности или невозможности биологических эффектов от слабых НЧ МП.

Представление о квантах ЭМП, пусть даже и низкочастотных, полезно, когда мы интересуемся передачей сигнала слабого ЭМП от поля к мишени. Этот процесс передачи энергии естественно характеризовать числом квантов поглощенных мишенью в единицу времени. Важно различать вопрос о конкретном устройстве или о природе молекулярной мишени и общий принцип взаимодействия низкочастотного ЭМП с квантовой системой.

В общем случае для характеристики чувствительности приемника используют поток энергии p , т.е. число N квантов $\hbar\Omega$, поглощенных системой в течение некоторого интервала времени t ее взаимодействия с полем:

$$p = n\hbar\Omega/t.$$

Таким образом, для того, чтобы определить чувствительность, надо задаться некоторым интервалом времени t и посчитать число поглощенных за это время квантов. Мы хотим определить те ограничения на чувствительность, которые следуют из наиболее общих законов квантовой физики, и поэтому рассматриваем идеализированную квантовую систему, достаточно хорошо изолированную от термостата.

Интервал t должен вполне характеризовать процесс взаимодействия в смысле определения чувствительности и допускать подсчет числа квантов в принципе. Понятно, что t не может быть произвольно большим. Изменение энергии системы в переменном МП представляет собой колебания с частотой Раби, наложенные на экспоненциальное приближение к некоторому асимптотическому уровню. С ростом времени наблюдения t среднее изменение энергии стремится к нулю. Не может быть t и произвольно малым: изменение энергии ϵ квантовой системы требует определенного времени θ .

Удобно выбрать интервал времени $t > \theta$, в течение которого энергия квантовой системы не приобрела квазистационарного значения. Очевидно, это время, время когерентного взаимодействия, является меньшим из двух времен – времени жизни квантового состояния и времени автокорреляции МП. Для лабораторного низкочастотного МП время автокорреляции составляет обычно не менее нескольких секунд, поэтому время когерентного взаимодействия есть, главным образом, время жизни квантового состояния τ . Последнее определяется особенностями взаимодействия квантовой системы с термостатом. Далее полагаем:

$$p = n\hbar\Omega/\tau. \quad (2)$$

Ограничения на величину p следуют из фундаментального соотношения квантовой механики между изменением энергии квантовой системы ϵ и временем θ , необходимым для регистрации этого изменения [15]:

$$\epsilon\theta > \hbar.$$

В случае регистрации n квантов, так как $\epsilon \sim n\hbar\Omega$, это соотношение можно записать в виде $\theta > 1/n\theta$. Однако время регистрации изменений в любом случае не может превышать время когерентного взаимодействия поля с атомной системой. Следовательно, имеет место неравенство:

$$\tau > \theta > \frac{1}{n\Omega},$$

т.е. $\tau > 1/n\Omega$, что после подстановки в выражение (2) дает простую оценку предельной чувствительности:

$$p \sim \hbar/\tau^2. \quad (3)$$

Таким образом, предел чувствительности к низкочастотному ЭМП определяется временем жизни квантового состояния мишени приемника [16]. Меньшие, чем (3), потоки энергии не могут быть зарегистрированы. Это надо понимать следующим образом. Если за время τ , не большее времени жизни квантовых состояний мишени, регистрируется n квантов переменного поля частоты Ω , причем $n > 1/\Omega\tau > 1$, то с необходимостью плотность потока энергии через мишень размером a равна:

$$S \sim p/a^2 \sim \hbar \left(\frac{n\Omega}{a} \right)^2.$$

В приближении плоских волн плотность S равна $cH^2/4\pi$, т.е. необходимо, чтобы МП равнялось:

$$H \sim \frac{2n\Omega}{a} \sqrt{\frac{\pi\hbar}{c}}.$$

Например, для значений параметров $\tau = 10$ мс, $\Omega = 100$ рад/с, $n = 10^9$, $a = 10^{-7}$ см, указанное МП равно 1 Гс по порядку величины.

Из этого, конечно, не следует, что в МП данной амплитуды мишень указанного размера будет обязательно поглощать 10^9 квантов за 10 мс. Напомним, что предел (3) следует только из фундаментального квантово-механического соотношения. Чувствительность устройств, в том числе биофизических мишеней, зависит также от вероятности поглощения ими квантов ЭМП и существенно ниже, а предел чувствительности, соответственно, существенно больше, чем (3). Принципиально, однако, что вероятность поглощения квантов ЭМП определяется уже конкретным устройством мишеней. От природы мишени зависит также и то, насколько и какие из ее параметров изменяются вследствие «суммирования» квантов МП за время когерентного взаимодействия с системой.

Эти рассуждения, вообще говоря, имеют условный характер. Использование понятий числа квантов ЭМП и энергетических состояний квантовой системы подразумевает их достаточно хорошую изолированность друг от друга, т.е. малость энергии их взаимодействия по сравнению с энергиями переходов $\hbar\Omega$ и $\Delta\epsilon$ в состояниях поля и квантовой системы соответственно. Например, при взаимодействии оптического излучения бытового HeNe-лазера с атомом имеем:

$$\hbar\Omega \sim \Delta\epsilon, \quad \frac{eEa}{\hbar\Omega} \sim 10^{-7}.$$

Здесь eEa – энергия взаимодействия заряда e в атоме размером a с электрическим полем E . Именно поэтому язык квантов поля и уровней атома оказывается эффективным. Другими словами, состояния полной системы атома в электромагнитном поле сводятся к комбинации состояний изолированных атома и поля. Иная ситуация имеет место при взаимодействии слабого НЧ МП с атомоподобной системой в геомагнитном поле: все три энергии есть величины одного порядка. Энергия взаимодействия μH магнитного поля H с магнитным моментом орбитального движения $\mu = e\hbar/2mc$ фактически совпадает как с зеемановским расщеплением

$\hbar\Omega_c$ (Ω_c – циклотронная частота), так и с квантом НЧ МП $\hbar\Omega$.

В этом случае отсутствует малый параметр – взаимодействие – и представление состояния полной системы в виде комбинации состояний атома и поля не совсем обосновано. Более надежное описание может дать квантовая электродинамика. Однако заранее ясно, что вывод о многоквантовом характере взаимодействия есть вполне адекватное описание ситуации в привычных терминах.

Таким образом, взаимодействие НЧ МП с квантовой мишенью является многоквантовым процессом; традиционная формулировка проблемы kT и следствия из нее несостоятельны по отношению к таким процессам. Первые физические принципы практически не накладывают ограничений на предельную чувствительность. Микроскопическое устройство биологического рецептора и время жизни его состояний определяют уровень чувствительности в каждом конкретном случае. Важно, что время жизни может быть достаточно большим, благодаря состоянию элементов биофизических структур, далекому от теплового равновесия.

НЕРАВНОВЕСНЫЕ СОСТОЯНИЯ КАК ОСНОВА МОЛЕКУЛЯРНЫХ МЕХАНИЗМОВ МАГНИТОРЕЦЕПЦИИ

Традиционная формулировка проблемы kT имеет негативный характер. Она фиксирует скепсис в отношении правдоподобности магнитобиологических явлений и не содержит импульса к преодолению парадокса. Имеет смысл поэтому и другая, конструктивная форма проблемы, уточняющая две ее стороны: 1) каков механизм преобразования сигнала слабого МП в (био)химический сигнал и 2) почему такой механизм работоспособен на фоне тепловых возмущений среды?

Здесь целесообразно иметь в виду следующие обстоятельства. Первое состоит в том, что само понятие kT происходит из статистической физики. Оно имеет смысл для систем, близких к тепловому равновесию. В таких системах ни единичный квант $\hbar\omega$, ни даже много квантов, соответствующих слабому низкочастотному МП, почти не меняют средней энергии степеней свободы. Но в системах, слабо связанных с термостатом, процесс термализации сравнительно медленный и такие системы могут длительное время находиться в условиях, далеких от равновесия. Тогда МП способно вызвать большое относительное изменение энергии некоторых динамических переменных, энер-

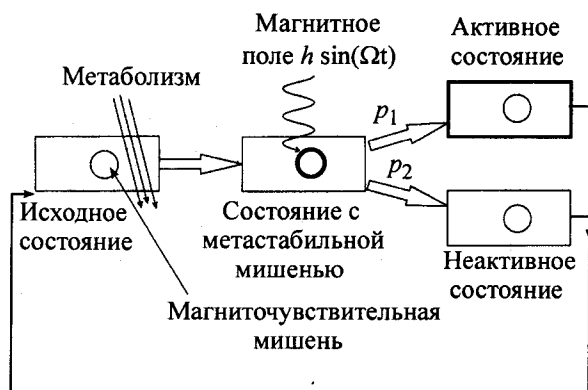


Рис. 1. Эволюция состояний белкового комплекса с магниточувствительной молекулярной мишенью.

гия которых по тем или иным причинам мала. Другими словами, если время термализации некоторых степеней свободы, взаимодействующих с МП, больше характерного времени жизни самой системы, то понятие температуры в традиционном термодинамическом смысле к таким степеням свободы неприменимо и сравнение изменений их энергии с kT при поглощении квантов поля теряет смысл.

Общеизвестно, что метаболизм живых систем является совокупностью преимущественно неравновесных процессов. Зарождение и распад биофизических структур, происходящие на интервалах времени, меньших времени термализации некоторых степеней свободы этих структур, являются примерами неравновесных систем, в которых слабым МП не запрещено проявить себя в переменных структуры.

Второе обстоятельство связано с тем, что энергия взаимодействия МП с любой молекулярной мишенью мала. Например, требуется несколько лет, чтобы изменить энергию идеального молекулярного или ионного осциллятора на величину kT при помощи переменного МП в условиях резонанса [16]. Отсюда следует, что МП может лишь играть роль управляющего сигнала, а не энергетического фактора, подобного kT . Имеет смысл искать такие механизмы, в которых МП управляет не процессами, а вероятностями развития процессов в том или другом направлении.

Коротко, неравновесность или метастабильность мишени и вероятностный характер преобразования сигнала слабого МП в биохимический ответ – два неперенных свойства молекулярного механизма магнитоцепции. Рассмотрим подробнее, как они могли бы реали-

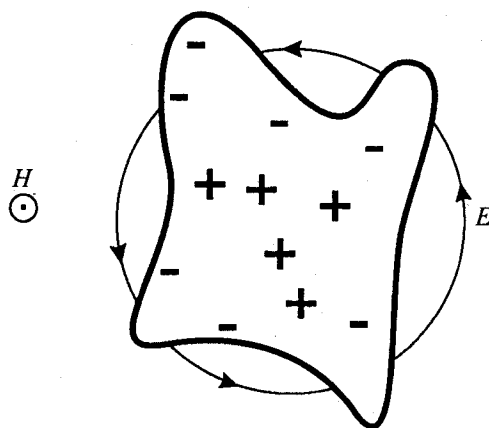


Рис. 2. Вихревое электрическое поле, порожденное переменным МП, влияет на вращения молекулы с неоднородным распределением плотности заряда.

зоваться в процессе магнитоцепции с участием белкового комплекса с магниточувствительной мишенью (рис. 1).

Вследствие конформационных перестроек, инициируемых метаболизмом, внутри некоторых белков возникают особым образом устроенные молекулярные группы. Они какое-то время «живут», а затем распадаются с переходом белка в измененные состояния – активное или неактивное по отношению к каким-то другим биохимическим процессам. Устройство молекулярной группы таково, что некоторые степени ее свободы, с одной стороны, чувствительны к МП, т.е. она является мишенью МП. С другой стороны, такая мишень влияет на вероятности эволюции белка из промежуточного состояния в конечные, активное или неактивное. Затем белок возвращается в исходное состояние и цикл повторяется. Количество белка в активном состоянии тогда зависит от МП. МП управляет состоянием мишени, поскольку время жизни мишени меньше времени ее термализации и мишень находится в неравновесном состоянии. Таким образом, МП определяет вероятность того или другого пути эволюции белка.

В рамках данной общей концепции можно представить различные механизмы магнитоцепции: метастабильная молекулярная мишень, управляющая вероятностью реакций, имеет в них разную природу.

Пример метастабильной мишени, молекулярный ротатор, вероятность реакции которого с окружением зависит от МП, описан в [17]. Суть примера в следующем. Переменное МП создает вихревое электрическое поле. Плотность заряда молекулы обычно распределена неравномерно, поэтому электрическое поле соз-

дает вращательный механический момент, ускоряющий или тормозящий случайные тепловые вращения молекулы (рис. 2). Если она закреплена парой ковалентных связей (опор) в белковой матрице, а пространства вокруг достаточно для более-менее свободных вращений либо вращательных осцилляций, то тепловые колебания не создают вращательного момента относительно оси вращения ротатора. Эта степень свободы термализуется медленно, за счет ван-дер-ваальсовых взаимодействий, и круговое электрическое поле эффективно управляет вращением молекулы.

При некоторых особых сочетаниях частот и амплитуд МП возникает специфический режим неоднородного вращения молекулы: в течение почти всего периода изменения МП она почти неподвижна, а затем сравнительно быстро поворачивается на полный угол и т.д. В этом режиме увеличена вероятность реакции боковых групп молекулы с окружением. Поскольку длина волны де Бройля по угловой переменной даже при комнатной температуре порядка π , вращения молекул описаны в [17] квантовым образом как интерференция угловых молекулярных состояний. Отметим, что вращения, частично изолированные от термостата, вполне реальны: известны спектральные проявления таких степеней свободы [18].

Два вопроса конструктивной формы проблемы kT решены здесь следующим образом: 1) механизм преобразования МП связан с управлением вероятностью реакции, 2) механизм устойчивости преобразования связан с метастабильностью мишени.

Другой пример молекулярной мишени – обобщенная координата реакции процессов с переносом протона или электрона в двукратном потенциале, управляемом магниточувствительной водной средой. На то, что водная среда может являться «медиатором» в передаче сигнала МП на уровень биологических реакций, обращали внимание многие исследователи. Имеются теоретические и экспериментальные работы в подтверждение этой идеи [19].

В данном случае мишень находится не внутри белка, а окружает его, что, конечно, не меняет сути дела. Состояние воды, окружающей поверхность белка, влияет на способность его к конформациям, а следовательно, и на высоту потенциального барьера вдоль обобщенной координаты реакции переноса. Элементарными

мишенями в водной матрице являются, скорее всего, магнитные моменты протонов водородных связей. Согласованное одновременное воздействие на магнитные моменты, а значит, и на спиновые состояния протонов, может повлиять на реализацию правил запрета по спину в перестройках водородных связей и, тем самым, на состояние конформационной подвижности. В этой модели МП управляет вероятностью реакции переноса заряда, а роль метастабильной локализованной мишени играет равновесная, но распределенная мишень – множество элементарных магнитных моментов протонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема kT в ее традиционной формулировке несостоятельна в качестве аргумента утверждения о невозможности магнитобиологических эффектов. Ее несостоятельность следует из а) противоречивости ее внутренних скрытых постулатов и б) контрпримеров построения мысленных механизмов магниторецепции, согласующихся с физическими законами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 04-04-97298 и Российского гуманитарного научного фонда, грант № 04-03-00069.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девятков Н.Д. // Успехи физ. наук. 1973. Т. 110, вып. 3. С. 453–454.
2. Fröhlich H. // Phys. Lett. A. 1968. V. 26. P. 402–403.
3. Чернавский Д.С. // Успехи физ. наук. 1973. Т. 110, вып. 3. С. 469.
4. Бецкий О.В. // Радиотехника и электроника. 1993. Вып. 10. С. 1760–1782.
5. Бинги В.Н., Савин А.В. // Успехи физ. наук. 2003. Т. 173, вып. 3. С. 265–300.
6. Blakemore R.P. // Science. 1975. V. 190, № 4212. P. 377–379.
7. Хомутов Г.Б. // Биофизика. 2004. Т. 49, вып. 1. С. 140–144.
8. Kirschvink J.L., Kobayashi-Kirschvink A., Woodford B.J. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1992. V. 89, № 16. P. 7683–7687.
9. Dobson J. // Exper. Brain Res. 2002. V. 144, № 1. P. 122–126.
10. Binhi V.N., Chernavskii D.S. // Europhys. Lett. 2005. V. 70, № 6. P. 850–856.
11. Walker M.M., Dennis T.E., Kirschvink J.L. // Curr. Opin. Neurobiol. 2002. V. 12. P. 735–744.

12. Ritz T., Thalau P., Phillips J.B. et al. // Nature. 2004. V. 429, № 6988. P. 177–180.
13. Бинги В.Н. // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2005. Вып. 6. С. 23–27.
14. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Пятаевский Л.П. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1980. 704 с.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. 3 изд., М.: Наука, 1974. Т. III. Сер. Теоретическая физика. 650 с.
16. Binhi V.N. Magnetobiology: Underlying Physical Problems. San Diego: Academic Press, 2002. 473 p.
17. Binhi V.N., Savin A.V. // Phys. Rev. E. 2002. V. 65, № 051912. P. 1–10.
18. Внутреннее вращение молекул / Под ред. В.Д. Орвилл-Томаса. М.: Мир, 1977. 510 с.
19. Фесенко Е.Е., Попов В.И., Новиков В.В., Хуцян С.С. // Биофизика. 2002. Т. 47, вып. 3. С. 389–394.

The Paradox of Magnetobiology: Analysis and the Prospects for Solution

V.N. Binhi*, V.A. Milyaev*, D.S. Chernavskii**, and A.B. Rubin***

*Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova 38, Moscow, 119991 Russia

**Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii pr. 53, Moscow, 119991 Russia

***Lomonosov Moscow State University, Vorob'evy Gory, Moscow, 119899 Russia

The wording, content, and corollaries of the so-called «kT problem» are considered. The problem points to the paradox of the biological effects of weak low-frequency magnetic fields. The conventional wording of the problem contains implicit assumptions the analysis of which shows their incomplete physical validity.

Key words: biological effects of weak magnetic fields, kT problem, limit of sensitivity