

КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТОВ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

© 2010 г. А.В. Дроздов, Т.П. Нагорская, С.В. Масюкевич, Э.С. Горшков*

Учреждение Российской академии наук Институт аналитического приборостроения РАН,
190103, Санкт-Петербург, Рижский проспект, 26

E-mail: av@biophys.ru

*Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский Филиал института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
191023, Санкт-Петербург, Мучной пер., 2, а/я 188

Поступила в редакцию 13.05.10 г.

Светлой памяти В.В. Леднева посвящается

С квантово-механических позиций обсуждены возможные механизмы действия слабых комбинированных магнитных полей на биологические системы. Предложенные подходы позволяют решить проблему несопоставимости энергии действующих факторов в сравнении с энергией теплового движения (проблема kT). Рассмотрен механизм действия комбинированных магнитных полей на биосистемы.

Ключевые слова: комбинированные магнитные поля, параметрический магнитный резонанс, PACS.

Осознанный интерес к действию электромагнитных полей (ЭМП) и неионизирующих электромагнитных излучений на биологические системы возник у человечества одновременно с осознанием факта их существования. Так, например, первые опыты по изучению воздействия электромагнитного излучения на людей были начаты Де Арсонвалем в 1891 году – через три года после открытия Герцем свободных электромагнитных волн и создания им первого излучателя. К настоящему времени эта область научных интересов сформировалась в одно из признанных направлений современного естествознания, называемого электромагнито-биологией. Основной целью электромагнито-биологических исследований является установление закономерностей и механизмов действия ЭМП на различные биологические системы.

И хотя развитие электромагнитобиологии привело к практическому применению ЭМП, вопрос о том, какова роль естественных электромагнитных полей в обеспечении функционирования различных организмов и каково их

влияние на процесс эволюции, до сих пор не имеет ответа. Между тем к настоящему времени накоплено множество свидетельств существования электромагнитных полей природного происхождения (регистрируемых современными приборами на пределе возможности), которые представляют потенциальную угрозу для здоровья людей и стоят в одном ряду с такими важнейшими климатическими факторами, как температура, давление и т.п. Эти результаты свидетельствуют в пользу того, что изучение влияния ЭМП и природного, и антропогенного происхождения на жизненно важные физико-химические процессы является весьма актуальной задачей.

Однако, несмотря на результаты многолетних наблюдений и важность решаемых электромагнитобиологией задач, у значительной части научного сообщества до сих пор имеются сомнения в существовании самой проблемы. Отчасти эти сомнения связаны с представлениями о принципиальной невозможности существенного влияния электромагнитных полей и излучений низкой интенсивности* на биосистемы. Версия такой невозможности вытекает из термодинамических подходов, используемых в

Сокращения: ЭМП – электромагнитные поля, РП – радикальная пара, СТВ – сверхтонкое взаимодействие.

* Под низкоинтенсивными воздействиями понимаются такие воздействия, энергия которых много меньше характерных энергий биохимических реакций. Часто в литературе этот энергетический дисбаланс внешнего воздействия и термодинамического равновесия в биологических системах называется «проблемой kT ».

современной биохимии. Часто биологические эксперименты по изучению действия низкоинтенсивных ЭМП состоят в установлении связи между физико-химическими характеристиками действующих факторов и вызываемого ими биологического отклика. При таком подходе выяснение механизмов действия слабых ЭМП на уровне отдельных биохимических реакций, являющихся основой жизнедеятельности любого организма, не представляется возможным. Отчасти это связано с тем, что в ходе проведения таких экспериментов нет возможности оценить степень вовлеченности различных уровней организации живой системы (биохимического, физиологического и т.п.).

Цель настоящей работы заключается в попытке рассмотреть проблему действия факторов низкой интенсивности с квантово-механических позиций. На наш взгляд, такой подход позволяет снять многие проблемы, связанные с влиянием факторов низкой интенсивности, и перейти к обсуждению механизмов их действия.

ВЫБОР МОДЕЛИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЗМА ДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

При изучении внешних воздействий на биосистемы мы, как правило, оперируем такими понятиями, как биоэффект, величина биоэффекта. В основе такого подхода лежит изучение разницы протекания каких-либо биологических процессов в экспериментальной группе, на которую оказывается низкоинтенсивное воздействие, с контрольной группой, на которую такого воздействия не оказывается. Нам представляется, что при изучении низкоинтенсивных воздействий основное внимание должно быть обращено прежде всего на рассмотрение химических реакций – биологически значимых для живых систем, что позволит оценить влияние внешних воздействий на образование химической связи.

Отметим, что акт образования химической связи весьма непродолжителен (порядка 10^{-11} – 10^{-13} с) и составляет ничтожно малую часть от общего времени химической реакции, большая часть которого уходит на подготовку события – встречу реагентов, организацию их подходящей ориентации и энергетической «накачки» (если таковая необходима). Именно от «подготовительной» стадии зависит варьирование временного диапазона химических процессов – от медленных до быстрых. Поэтому в первую очередь следует ответить на вопрос о том, какие факторы управляют химической реакцией? Таких

факторов два – это энергия и угловой момент реагентов.

Хорошо известно, что химические реакции управляются через энергию электронов, которые участвуют в образовании химической связи и которые должны находиться на одинаковых энергетических уровнях. Неравенство энергий взаимодействующих электронов приводит к неблагоприятному исходу – химическая связь не образуется. Управлять реакцией – значит снимать энергетические барьеры, когда реакцию нужно стимулировать, или, напротив, создавать их, когда реакцию нужно подавлять. К настоящему моменту на «энергетическом» поле химия достигла совершенства. Однако эта победа не была окончательной. Оказалось, что важную роль играет второй запрет – угловой, который в химических реакциях должен строго соблюдаться. Это означает, что химические реакции разрешены только для таких угловых состояний реагентов, угловой момент которых совпадает с угловым состоянием продукта, и строго запрещены, если требуется его изменение. Это относится ко всем угловым моментам – вращательному моменту молекулы, орбитальному электронному моменту, собственному моменту (спину) электрона и собственному ядерному моменту (ядерному спину). Запреты химических реакций по угловому моменту менее очевидны, хотя их строгость значительно превосходит строгость энергетических запретов. Поэтому мы и рассматриваем взаимодействие угловых моментов (спинов) с внешними слабыми электромагнитными полями.

О РОЛИ УГЛОВЫХ МОМЕНТОВ В ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЯХ

Ответ на вопрос о влиянии магнитного поля на скорость химической реакции давно интересует физиков, химиков и биологов – всех, кому приходится изучать влияние внешних факторов на превращения веществ. Особенно важен ответ на этот вопрос для биологов, так как биохимические процессы всегда происходили и происходят в магнитном поле Земли. И если магнитное поле Земли и его вариации способны воздействовать на элементарные химические реакции, то вполне возможно, что такие поля будут оказывать существенное влияние и на жизнедеятельность земных организмов.

Авторам работ [1,2] удалось экспериментально наблюдать действие внешнего магнитного поля на ход химических и биологических процессов, но все эти результаты обладали одной неприятной особенностью, заключающейся в плохой или неполной повторяемости резуль-

татов в различных исследовательских лабораториях. Создавалась вообще парадоксальная ситуация: с одной стороны, накапливались все новые и новые факты, свидетельствующие о химической активности магнитного поля, но, с другой стороны, росли и сомнения в принципиальной возможности подобного эффекта. Дело, по всей видимости, заключается в том, что те или иные явления могут наблюдаться лишь в строго определенных условиях, и если все эти условия не соблюдены, то и результаты опытов будут отрицательными. Но, когда механизм явления вообще неизвестен, учесть все условия просто невозможно.

Очевидно, что для изменения свойств частиц, участвующих в реакции под действием внешнего поля, внесенная извне энергия должна быть соизмеримой с энергией теплового движения частиц или превосходить ее. Однако энергии магнитного взаимодействия и теплового движения становятся соизмеримыми лишь при значениях напряженности магнитных полей $H = 10^6$ Э. Так, например, под действием магнитного поля напряженностью $H = 1,4 \cdot 10^4$ Э энергия свободного радикала изменяется так же, как и при изменении его температуры на 1°C . Поэтому надежды на заметное действие магнитного поля на молекулярном уровне до недавнего времени в сознании большинства исследователей связывались только с реакциями при очень низких температурах или в сверхсильных магнитных полях. «Слабость» применяемого в большинстве биологических экспериментов магнитного поля в сравнении с энергией тепловых колебаний обозначена как «проблема kT ».

В целом отношение к проблеме действия магнитных полей, бытующее в науке и по сей день, хорошо отражено в статье «Магнетохимия» в Краткой химической энциклопедии (1963 г.): «...При не очень низких температурах энергии атомов и небольших молекул вещества непрерывно подвергаются столь сильным случайным флуктуациям вследствие хаотического теплового движения, что изменения энергии, вызываемые обычными (до 10^4 эрстед) магнитными полями, оказываются незаметными. Поэтому влияние такого рода магнитных полей на скорость химических реакций является незначительным по сравнению с влиянием температуры. Заметного эффекта можно было бы, по-видимому, ожидать для небольших молекул лишь при магнитных полях в сотни и тысячи раз более сильных, чем обычные, создаваемые в лабораторных условиях. Однако подобного рода сверхсильные поля в настоящее время удается поддерживать лишь в течение очень ко-

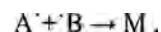
ротких промежутков времени ($\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ с), так что опытная проверка влияния магнитных полей на кинетику химических реакций до сих пор не производилась». Это с одной стороны.

Но, с другой стороны, результаты экспериментов по воздействию слабых магнитных полей на химические реакции свидетельствуют об обратном. В чем же причина?

Что касается теории действия магнитного поля на химические системы, то тут ясно лишь одно: такое действие может быть связано с влиянием на магнитные частицы в веществе (случаи влияния магнитного поля на движущиеся заряды в данной работе не рассматриваются). Такими частицами могут быть либо сами молекулы, либо их части – свободные радикалы, содержащие, по меньшей мере, один неспаренный электрон. В принципе каждый реагент в химической реакции является свободным радикалом, поскольку содержит, по меньшей мере, один неспаренный электрон, который обладает моментом количества движения и связанным с ним магнитным моментом (спином). Теоретически, магнитное поле может внести в расположение магнитных частиц некоторый порядок, повлияв тем самым и на скорость химического процесса, однако тепловое движение приводит к тому, что магнитные моменты свободных радикалов ориентируются по направлениям в пространстве произвольным образом, или, как говорят, с одинаковой вероятностью. В этом как раз и проявляется «проблема kT » при действии магнитного поля.

Рассмотрим случай действия магнитного поля на отдельный магнитный момент свободного радикала, участвующего в образовании химической связи.

В качестве примера возьмем простую реакцию образования двухатомной молекулы М. Схематически это можно изобразить следующим образом (на схеме кружками обозначены неспаренные электроны, участвующие в образовании химической связи):



Поскольку в дальнейшем нас будет интересовать действие магнитного поля не на отдельный свободный радикал, а на так называемую радикальную пару, т.е. пару, образованную реагентами химической реакции, то схема реакции примет вид:

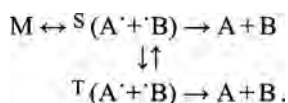


Процессы, обозначенные горизонтальными стрелками, связаны с молекулярным движением (диффузией) радикалов и с химическими процессами (диссоциацией молекул и рекомбина-

цией пары). Промежуточное состояние (в скобках) и есть радикальная пара (РП).

Согласно теории Гайтлера-Лондона валентная связь создается двумя электронами. Поскольку электрон имеет спин $S = 1/2$, то суммарный спин двух электронов может равняться нулю или единице ($S = 0, 1$). Состояние с нулевым суммарным спином ($S = 0$) называется синглетным, при этом спины двух электронов ориентированы в противоположные стороны. Состояние с суммарным спином, равным единице ($S = 1$), называется триплетным, и в этом случае спины двух электронов ориентированы одинаково. Суммарный спин двух электронов, участвующих в образовании химической связи, жестко связан с пространственным распределением электронов. Согласно принципу Паули, в одной точке пространства не могут находиться одновременно два электрона в одинаковом спиновом состоянии. Это означает, что в синглетном состоянии два валентных электрона могут одновременно находиться в пространстве между двумя атомами, а в триплетном это запрещено принципом Паули. Иными словами, если сталкивающиеся радикалы находятся в синглетном состоянии – образование химической связи возможно. Такая реакция, как правило, протекает быстро, эффективно и безактивационно, т.е. энергия активации реакции близка к нулю. Если же сталкивающиеся радикалы находятся в триплетном состоянии, то образование молекул запрещено.

Исходя из вышеизложенного, следует уточнить модель реакции, введя в рассмотрение синглетные и триплетные состояния радикальной пары. В результате мы приходим к следующей схеме (вертикальными стрелками на этой схеме обозначена спиновая динамика в РП, синглет-триплетные переходы):



Перейдем к рассмотрению непосредственно самой реакции, но уже с позиций спиновой динамики. В качестве примера рассмотрим реакцию рекомбинации радикалов, которые зарождаются по отдельности вдали друг от друга и реагируют при случайных столкновениях. В этом случае спиновое состояние пары сталкивающихся радикалов случайно. К моменту встречи суммарный спин двух неспаренных электронов радикалов может быть: $S = 0$ или $S = 1$, причем состояние с $S = 1$ (рис. 1а–в) при наличии магнитного поля трехкратно вырождено (возможны три проекции спина на направление внешнего магнитного поля: $S = +1$,

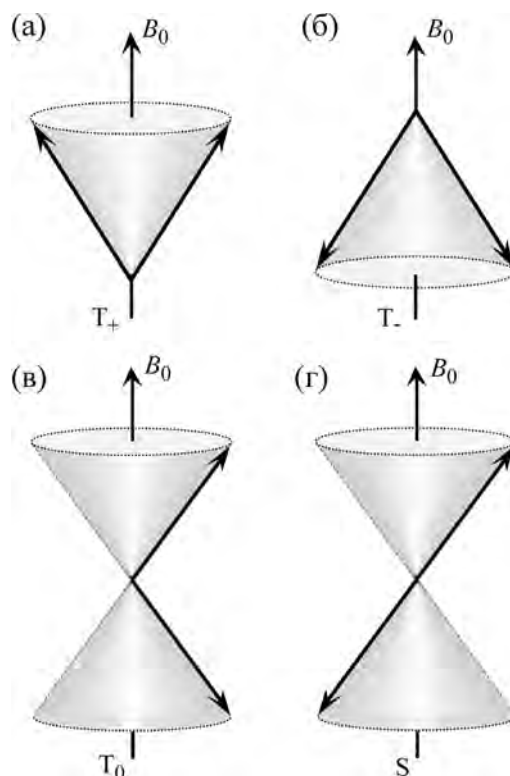


Рис. 1. Схематическое представление возможных комбинаций взаимного расположения спинов электронов в радикальной паре: (а, б) – триплетное состояние (T_+ и T_- соответственно), суммарный спин пары равен единице; (в) – триплетное состояние (T_0), проекции магнитных моментов радикалов направлены в различные стороны и суммарная проекция на направление магнитного поля (продольная поляризация) равна нулю, однако прецессия спинов происходит синфазно, и, таким образом, суммарный спин поперек направления магнитного поля (поперечная поляризация) равен единице; (г) – синглетное состояние. В этом случае как суммарный спин системы двух радикалов, так и суммарная проекция их магнитных моментов оказываются равными нулю.

0, -1), а состояние с $S = 0$ не вырождено (рис. 1г). В соответствии с этими степенями вырождения статистический вес встреч двух радикалов в синглетном состоянии равен $1/4$, а статистический вес встреч в триплетном состоянии – $3/4$ соответственно. В подавляющем большинстве случаев основное состояние продукта рекомбинации двух радикалов (в нашем случае молекула М) является синглетным, и поэтому, в соответствии с правилом Вигнера «о сохранении спинового состояния реагентов в элементарном химическом акте», следует ожидать, что только $1/4$ столкновений может привести к протеканию реакции рекомбинации, а $3/4$ столкновений – к протеканию других конкурирующих реакций (реакциям с растворителем, с ра-

дикальными ловушками, изомеризации или диссоциации радикала и т.д.).

Из приведенного примера следует, что спиновое состояние реагирующих частиц в значительной степени определяет направление реакции и состав образующихся продуктов. Такое рассмотрение было бы исчерпывающим, если бы спиновое состояние реагирующих частиц нельзя было изменять. Поэтому для понимания вероятности протекания реакции по тому или иному направлению необходимо рассмотреть возможность изменения спинового состояния радикальной пары.

Магнитное поле вносит в расположение частиц определенный порядок, а тепловое движение приводит к тому, что магнитные моменты свободных радикалов ориентируются по направлениям в пространстве произвольно. Поэтому, пытаясь разобраться в спиновой динамике, мы должны прежде всего понять, каково соотношение между организующими факторами и дезорганизующими.

Скорость изменения спинового состояния молекул и атомов принято характеризовать величинами T_1 (время продольной или спин-решеточной релаксации) и T_2 (время поперечной или спин-спиновой релаксации). Проиллюстрируем эти характеристики на примере. Пусть в образце содержится ансамбль частиц со спином $1/2$. Они могут быть ориентированы либо *по* полю либо *против*. В магнитном поле энергии этих состояний различны. Электроны в образце заселяют эти два состояния в соответствии с распределением Максвелла-Больцмана. При этом разность равновесных максвелл-больцмановских заселенностей двух состояний характеризует равновесную намагниченность образца. Предположим, что с помощью внешнего воздействия часть спинов переходит в другое состояние и, таким образом, изменяется намагниченность образца. Нарушенное распределение начнет релаксировать к равновесию. Как долго могут существовать такие поляризованные системы, не переходя в равновесное состояние*? Это время как раз и определяется временами T_1 и T_2 , т.е. скоростью, с которой энергия теплового хаотического движения окружающих частиц приводит спиновую подсистему к равновесному распределению. Для органических и значительной части неорганических радикалов эти времена лежат в интервале 10^{-5} – 10^{-8} с.

Если продолжительность жизни пары радикалов τ меньше T_1 и T_2 (условие $\tau \leq T_1, T_2$ во многих случаях действительно выполняется, так

как в типичном случае $\tau \sim 10^{-9}$ с), то тепловое движение за время жизни РП просто не успеет оказать на частицы никакого влияния – их магнитные моменты либо сохранят свою взаимную ориентацию, либо изменят ее по причинам, не связанным с хаотическим движением других молекул. Таким образом, магнитные моменты электронов на протяжении всего времени существования радикальной пары не имеют связи с тепловым движением и ведут себя как при абсолютном нуле температуры. Так устраняется главный конкурент «слабости» внешнего магнитного поля – тепловое движение и, тем самым, решается «проблема kT ».

Все эти рассуждения преследуют одну единственную цель – подвести к пониманию того, что найдя способ/способы увеличения вероятности перехода РП в синглетное состояние, мы неминуемо придем к изменению скорости химической реакции, а значит, и к биологическому эффекту.

ФАКТОРЫ И МЕХАНИЗМЫ, ПРИВОДЯЩИЕ К СПИНОВОЙ КОНВЕРСИИ

Магнитные взаимодействия между спиновыми подсистемами и внешним магнитным полем способны преобразовать спин-запрещенные (нереакционноспособные) состояния реагентов в состояния спин-разрешенные (реакционноспособные). Будучи ничтожно малыми по энергии магнитные взаимодействия могут переключать каналы реакции: открыть закрытые (запрещенные) каналы и, напротив, закрыть открытые (разрешенные). Осуществляется своего рода магнитный сценарий химической реакции [3].

Как уже говорилось выше, спиновое состояние пары сталкивающихся радикалов случайно. Радикальная пара может появиться в одном из четырех спиновых состояний S , T_- , T_0 и T_+ . Как видно из рис. 1а,б, для перехода из состояний T_- и T_+ в синглетное состояние необходимо, чтобы один из радикалов изменил направление проекции магнитного момента на противоположное (переворот на 180°). Для перехода из состояния T_0 (рис. 1в) в синглетное состояние необходимо, чтобы синфазная прецессия спинов превратилась в противофазную. Наиболее вероятен переход, при котором энергия системы изменяется меньше всего. В магнитном поле энергия состояний T_- и T_+ пропорциональна его напряженности, а энергия состояний S и T_0 не зависит от напряженности поля. Таким образом, наибольший вклад в про-

* В равновесном состоянии концентрация синглетных и триплетных пар удовлетворяет соотношению 1:3.

процесс триплет-синглетной конверсии вносит процесс перехода из состояния T_0 , энергия которого отличается от энергии синглетного состояния на небольшую величину энергии обменного взаимодействия J . Для осуществления перехода $T_0 \rightarrow S$ разность фаз между прецессирующими спинами через некоторое время должна достигнуть 180° . Такая разность фаз может накопиться, если два спина будут прецессировать с различными частотами. Следовательно, скорость перехода $T_0 \rightarrow S$ тем больше, чем больше разность g -факторов радикалов в РП. Такой механизм спиновой конверсии называется Δg -механизмом.

Если ядро обладает магнитным моментом, то электронная и ядерная спиновые подсистемы связаны сверхтонким взаимодействием (СТВ) и тогда ядерная подсистема может влиять на поведение электронной подсистемы (*СТВ-механизм*). С одной стороны, спин ядра создает дополнительное магнитное поле в области локализации неспаренного электрона РП, что приводит к изменению частоты прецессии электронного спина. В такой радикальной паре скорость спиновой конверсии определяется одновременно Δg - и СТВ-механизмами. С другой стороны, за счет СТВ возможны случаи, когда «переворот» ядерного спина одного из неспаренных электронов РП приводит к «перевороту» его электронного спина, приводя к $T_{\pm} \rightarrow S$ конверсии.

После образования молекулы M по Δg -механизму количество состояний T_0 уменьшается (так называемая химическая поляризация электронов), но за счет облучения потоком СВЧ-излучения можно «переводить» спины радикалов с низкого на более высокие энергетические состояния (происходит опустошение нижнего уровня состояния T_- и заселение состояний T_0 и T_+). Это, в свою очередь, приводит к увеличению вероятности спиновой конверсии $T_0 \rightarrow S$ по Δg -механизму.

Стоит заметить, что очень важно установить оптимальное время жизни РП. В невязких растворах время жизни РП довольно короткое, меньше или порядка наносекунд, и поэтому для реакций в невязких жидкостях магнитные эффекты слабо выражены. Но очень большое время жизни РП тоже нежелательно, так как при этом независимо от индукции магнитного поля успеет установиться статистическое распределение РП по синглетному и триплетному состояниям. Оптимальным является время жизни РП, которое соизмеримо со временем синглет-триплетных переходов в РП. В обычных условиях это время невелико, однако им можно

управлять, изменяя условия эксперимента (вязкость и температуру). Таким образом, управление временем жизни радикальной пары также является фактором, способным влиять на скорость химической реакции.

Еще одним фактором, приводящим к спиновой конверсии, который, на наш взгляд, очень важен для понимания существующих экспериментальных результатов, является наличие градиентного магнитного поля. Увеличение скорости взаимных спиновых переходов, в случае неоднородного поля, будет облегчено тем, что комбинационный запрет будет до известной степени снят под действием неоднородного магнитного поля. При этом существенно, чтобы действующее поле было неоднородно в молекулярных масштабах. В спиновой химии аналог эффекта влияния неоднородного магнитного поля называется спиновым катализатором [4].

Вообще говоря, вероятность рассматриваемой нами модельной реакции в рамках «магнитного сценария» является функцией всех параметров, характеризующих магнитные взаимодействия. Эта вероятность зависит от:

- напряженности внешнего магнитного поля;
- СТВ неспаренных электронов с ядрами;
- магнитного момента ядра;
- скорости релаксации;
- обменного взаимодействия электронов РП;
- ядерного спина и его проекции;
- амплитуды и частоты микроволнового поля;
- амплитуды и частоты низкочастотных магнитных полей;
- градиента магнитного поля.

Можно назвать также другие спиновые эффекты, влияющие на селективность химических превращений и скорость их осуществления [4]. Однако представленная картина уже достаточно ясна: спиновые эффекты, несмотря на то, что энергетически находятся на несколько порядков ниже энергии тепловых колебаний, могут «сильно» влиять на реакционную активность.

И еще одно замечание. В фокусе нашего внимания была реакция рекомбинации радикалов, но все наши рассуждения применимы к любым реакциям описанного выше типа. В качестве A и B могут выступать любые частицы. Например, это могут быть атомы, электрон-дырочная пара в полупроводниках, ион-радикалы и т.д. и т.п.

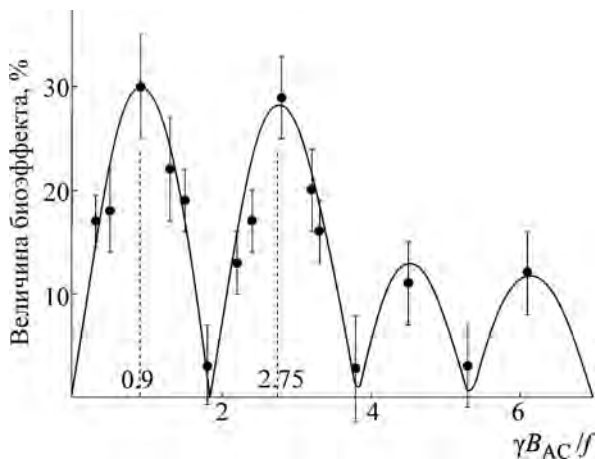


Рис. 2. Экспериментальные результаты действия комбинированных магнитных полей на скорость регенерации планарий (точки) и теоретическая зависимость (сплошная линия) интенсивности электромагнитного поля, излучаемого ансамблем магнитных моментов на частоте модуляции от величины параметра $\gamma B_{AC}/f$. Иллюстрация приведена с любезного разрешения авторов работы [9].

КОМБИНИРОВАННЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И МИШЕНИ, НА КОТОРЫЕ ОНИ ДЕЙСТВУЮТ

На сегодняшний день количество работ в магнитобиологии велико, но нельзя не выделить среди них работы В.В. Леднева и его коллег [5–9]. Эти работы не просто показали возможность влияния крайне слабых магнитных полей на биосистемы, они указали мишени действия этих полей, тем самым поставив магнитобиологию на прочный физический фундамент. Рассмотрим полученные в этих работах результаты с предлагаемых позиций.

В.В. Ледневым и его коллегами [7] было показано, что крайне слабые переменные магнитные поля с амплитудами в области пико-, нано- и микротеслового диапазонов оказывают существенное влияние на биологические и физико-химические процессы, а именно: регенерацию плоских червей (планарий *Dugesia tigrina*), гравитропизм в отрезках стеблей льна, а также на кристаллизацию карбоната кальция (CaCO_3) из солевых растворов. Было обнаружено, что между величиной биоэффекта и параметрами переменного магнитного поля существует зависимость. Именно В.В. Ледневым впервые было замечено, что подобные зависимости от соотношения параметров переменного и постоянного магнитных полей наблюдаются при рассеянии оптического излучения атомной системой. Предположение о фундаментальной схожести эффектов в атомных системах и в био-

системах, помещенных в комбинированные магнитные поля, позволило провести важнейшие для магнитобиологии эксперименты. В ходе этих экспериментов были определены зависимости величины биоэффектов от соотношения амплитуда/частота переменного магнитного поля (параметра $\gamma B_{AC}/f$, где γ — гиромагнитное отношение для данного типа магнитного момента, а B_{AC} и f — магнитная индукция и частота переменной компоненты магнитного поля соответственно) для различных мишеней (магнитного момента протонов, электронов, орбитальных магнитных моментов). Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что зависимость величины биоэффекта от параметра $\gamma B_{AC}/f$ является полиэкстремальной. Максимумы имеют место для значений параметра $\gamma B_{AC}/f = 0,9; 2,75; 4,5; 6,1$, а при значениях $\gamma B_{AC}/f = 1,8; 3,8; 5,3; 6,7$ — биоэффекты отсутствуют [6,8,9].

Очень важным является тот факт, что результат воздействия комбинированных магнитных полей на биологические системы совершенно не зависел от выбора «мишени». Выбирая величину гиромагнитного отношения для данного типа магнитного момента (для спина электрона, для спина протона или для орбитального магнитного момента), можно было подобрать параметры переменного магнитного поля (B_{AC} и f) для получения наперед заданного значения биоэффекта. Этот факт указывает на то, что главную роль в действии магнитных полей играют магнитные моменты.

Именно В.В. Ледневым было замечено, что величина биологического эффекта при действии комбинированных магнитных полей хорошо совпадает с рассчитанными значениями для интенсивности электромагнитного поля, излучаемого ансамблем магнитных моментов (например, спинов ядер атомов водорода) на частоте модуляции (1). Основанием для такого утверждения послужило хорошее совпадение экспериментальных результатов с теоретическим расчетом для параметрического резонанса (рис. 2, сплошная кривая), имеющего место в атомной спектроскопии [10].

$$I = kJ_1 \frac{\gamma B_{AC}}{f} \left[J_2 \frac{\gamma B_{AC}}{f} - J_0 \frac{\gamma B_{AC}}{f} \right] \cos 2\pi f t. \quad (1)$$

Любое изменение внешнего магнитного поля приводит к изменению состояния движения системы магнитных моментов. Рассмотрим подробнее это утверждение в рамках изучения механизма действия слабых комбинированных магнитных полей на биосистему и для объяс-

нения обратимся к параметрическому резонансу в атомной спектроскопии [10].

Суть явления параметрического резонанса в атомной спектроскопии заключается в модуляции рассеянного света. При этом интегральная интенсивность спонтанного излучения атомной системы, находящейся во внешнем магнитном поле, по всем направлениям остается величиной постоянной. Эффект модуляции интенсивности переизлучаемых волн проявляется только при наблюдении атомной системы под некоторым углом, т.е. наблюдается угловое перераспределение интенсивностей. Причиной такого перераспределения является интерференция электромагнитных волн, излучаемых с зеемановских подуровней системы. Уменьшение интенсивности в одном направлении сопровождается ростом излучения в другом. При этом, как уже говорилось, полная мощность рассеянного излучения постоянна.

Наложением дополнительного параллельного переменного магнитного поля с определенными параметрами можно как бы замедлить прецессию локальных магнитных моментов. Это приводит к тому, что «вектор» локальной намагниченности начинает вращаться или прецессировать неравномерно. При определенных параметрах комбинированного магнитного поля он приобретает преимущественные направления, а другие направления как бы проскакивает. Такое явление носит название релаксационных (квантовых) биений. Причина появления биений заключается в отставании вектора намагниченности от вектора эффективного поля и возникновении вследствие этого нутации вектора локальной намагниченности. Нутация накладывается на прецессию и приводит к амплитудной и частотной модуляции последней. В результате магнитный момент частицы (будь то спин электрона, ядерный магнитный момент, орбитальный магнитный момент и т.п.) приобретает некоторые преимущественные направления.

Таким образом, медленное изменение магнитного поля приводит к неравновесной поляризации магнитных моментов в определенных направлениях. Все это должно привести к появлению в образце градиентных магнитных полей, масштабы которых сопоставимы с молекулярными. Скорость спин-зависимых биохимических реакций в этом случае должна меняться, поскольку начинает «работать» «градиентный механизм» спиновой конверсии.

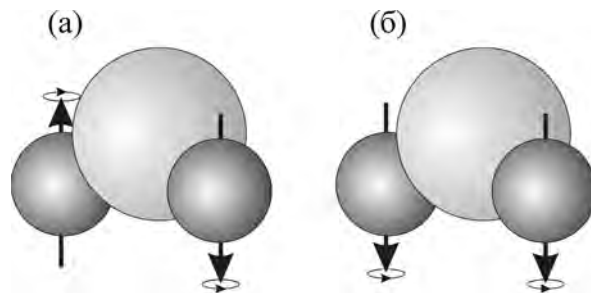


Рис. 3. Изомеры молекулы воды: (а) – пара-изомер; (б) – орто-изомер.

ВОДА И ЕЕ ВОЗМОЖНАЯ РОЛЬ В МАГНИТОБИОЛОГИИ

Каждый исследователь, изучающий механизмы действия слабых полей на биосистемы, в конечном итоге приходит к мысли о том, что вода, являющаяся основой всего живого, должна играть важную роль в этих процессах.

Как известно из классической механики, одинаковые частицы, несмотря на тождественность их физических свойств, не теряют своей «индивидуальности». Действительно, если следить за траекториями, описываемыми частицами, то в любой момент времени частицы можно идентифицировать.

В квантовой механике, в силу принципа неопределенности, понятие траектории полностью теряет смысл и одинаковые частицы полностью теряют свою «индивидуальность». Одинаковость частиц по их физическим свойствам приводит к их полной неразличимости. Принцип неразличимости [11] одинаковых частиц играет одну из основных ролей при квантово-механическом исследовании систем, состоящих из одинаковых частиц. В связи с этим принципом для системы, состоящей из двух и более одинаковых частиц, имеются всего две возможности: волновая функция всей системы либо симметрична, либо антисимметрична.

Применение принципа неразличимости к молекуле H_2O приводит к тому, что молекулы воды бывают двух видов (изомеров), отличающихся друг от друга взаимной ориентацией спинов протонов водорода и ротационными квантовыми числами всей молекулы. Молекулы воды, в которых ядерные магниты антипараллельны ($\uparrow\downarrow$), называются пара- H_2O (рис. 3а). Молекулы при этом могут иметь только четные ротационные квантовые числа (0, 2, 4...). У орто- H_2O ядерные магниты параллельны (рис. 3б) ($\downarrow\downarrow$) и ротационные квантовые числа могут принимать только нечетные значения (1, 3, 5...).

В то время как несимметрично построенная молекула, например HCl, свободно может перейти из состояния вращения с четным квантовым числом к вращению с нечетным, у молекулы, построенной из одинаковых ядер (H_2 , H_2O), подобный переход не может произойти сам по себе. Взаимная связь между ориентировкой ядерных спинов и ротационными квантовыми числами, а также запрещение перехода *орто* \leftrightarrow *пара* (спиновая конверсия) вытекают непосредственно из положений квантовой механики [11] и хорошо подтверждаются экспериментальными спектроскопическими результатами [12].

Различие между *пара*- H_2O и *орто*- H_2O не сводится только к обозначению определенной внутренней структуры, а в результате запрета перехода *пара*- H_2O \leftrightarrow *орто*- H_2O указывает на существование двух, во многих отношениях различных типов молекул.

Одним из основных различий между *пара*- и *орто*- спин-изомерами воды является то, что у первого есть состояние, в котором молекула не вращается (ротационное квантовое число равно нулю), в то время как у второго такого состояния нет – молекула всегда «крутится», подобно юле. Это различие приводит к тому, что у разных спиновых изомеров воды должна быть разная адсорбционная способность на поверхности, что и наблюдается в экспериментах [13].

Следует заметить, что поскольку молекулы *пара*- H_2O могут не вращаться, то именно они будут участвовать в образовании гексагональных структур посредством водородных связей (льдоподобные структуры). В свою очередь молекулы *орто*- H_2O участвуют в образовании связей только как классические диполи за счет электростатических сил (ван-дер-ваальсовы взаимодействия).

На наш взгляд, в основе давно обсуждаемого биологами [14,15] отличия внутриклеточной (связанной) воды от обычного водно-солевого раствора лежит именно селективная адсорбция нативными белками определенных изомеров воды. В пользу этого говорят и экспериментальные результаты [16].

С другой стороны, хорошо известно, что биологическая активность биоструктур во многом определяется степенью их гидратации. Можно предположить, что изменение соотношения *орто/пара*- молекул воды, входящей в биологическую систему, должно приводить, в силу различия в адсорбционных свойствах, к изменению степени гидратации биоструктур, а это, в свою очередь, – к изменению их биологической активности.

Что может способствовать переходу *пара*- H_2O \leftrightarrow *орто*- H_2O ? Одним из признанных механизмов переходов *пара*- H_2O \leftrightarrow *орто*- H_2O является спиновая конверсия при столкновении с парамагнитными частицами. Помимо этого, сверхтонкое взаимодействие ядерных спинов приведет при определенной близости значений энергий, соответствующих вращательным уровням, к смешиванию *орто*- и *пара*-состояний, а в дальнейшем и к конверсии изомеров. Для такого внутримолекулярного смешивания состояний необходимо, чтобы энергии вращательных уровней *орто*- и *пара*-состояний были близки, т.е. должны быть своего рода «дуплеты» этих состояний (т.е. вращательные уровни с близкими по энергии значениями). Именно такое условие, как было показано в работе [17], и выполняется в особых точках воды.

В 1998 г. авторами работы [18] экспериментально был обнаружен скачок 0–100% «текучести» эритроцитов человека в капилляре при отборе пробы пипеткой с диаметром канала $1,3 \pm 0,2$ мкм, обеспечивающей перепад давления 2,3 кПа. Долгое время этот результат не находил своего объяснения. Наиболее удивительным было то, что скачок наблюдался в очень узком температурном диапазоне $36,4 \pm 0,3^\circ C$, совпадающем с нормальной температурой человека.

С.М. Першин [17] предложил оригинальное объяснение этого эксперимента. Суть объяснения заключается в следующем: в окрестности температуры $36,6^\circ C$ имеется «дублет» вращательных уровней разных изомеров воды, что приводит к возрастанию вероятности резонансных столкновений молекул воды, которые переводят изомеры *пара*- H_2O в возбужденное вращательное состояние $285,219$ см⁻¹. При этом близко расположенный вращательный уровень *орто*- H_2O $285,419$ см⁻¹ допускает образование смешанного состояния, из которого молекула *пара*- H_2O может выйти *орто*-изомером; в дальнейшем это приведет к нарушению динамического равновесия с *пара*-молекулами в гидратном слое гемоглобина (гидратный слой H_2O около гемоглобина будет как бы «плавиться»); в результате истончения гидратного слоя молекулы гемоглобина будут сближаться друг с другом; концентрации железа и кислорода (катализаторов конверсии) в единице объема будут увеличиваться, что приведет к дальнейшей конверсии *пара*- H_2O \rightarrow *орто*- H_2O , и разрушение гидратной оболочки будет ускоряться; в конечном итоге будет формироваться лавинообразный скачок сжимаемости и проницаемости эритроцитов через микрокапилляр.

Таким образом, как и в случае с радикальными парами, можно говорить о том, что стимуляция процессов спиновой конверсии *пара*-H₂O ↔ *орто*-H₂O должна приводить к изменению скорости биологических процессов, ускоряя или замедляя их и являясь тем самым еще одним возможным механизмом, отвечающим за действие слабых электромагнитных полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог всему вышеизложенному, с биологических позиций можно заключить, что внешнее магнитное поле, в том числе и земное, синхронизирует работу живых клеток любого биологического организма. Действие магнитного поля, проникающего непосредственно на уровень каждой клетки, может быть направлено на любой магнитный момент, присутствующий в биологической системе (магнитный момент неспаренного электрона свободного радикала, ядерный магнитный момент, орбитальный магнитный момент, магнитный момент *орто*-молекул воды и т.п.). Эти магнитные моменты становятся своего рода «антеннами» внутри нас, которые могут воспринимать управляющее воздействие от внешних факторов. Таким образом, изменяя направление магнитных моментов, можно изменять временной масштаб реакции – управлять скоростью химического взаимодействия и, тем самым, степенью биоэффекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Труды междунар. конгр. «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине» (СПб., 1997, 2000, 2003, 2006, 2009).

2. В. Н. Бинги, *Магнитобиология: эксперименты и модели* (Милта, М., 2002).
3. А. Л. Бучаченко, Ю. Н. Молин, Р. З. Сагдеев и К. М. Салихов, *Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях* (Наука, М., 1984).
4. А. Л. Бучаченко, *Успехи химии* **68**, 99 (1999).
5. V. V. Lednev, *Bioelectromagnetics* **12**, 71 (1991).
6. В. В. Леднев, *Биофизика* **41** (1), 224 (1996).
7. Н. А. Белова и В. В. Леднев, *Биофизика* **46** (1), 122 (2001).
8. В. В. Леднев, Н. А. Белова, З. Е. Рождественская и Х. П. Тирас, *Геофизические процессы и биосфера* **2** (1), 3 (2003).
9. N. A. Belova, O. N. Ermakova, A.M. Ermakov, et al., *Environmentalist* **27**, 411(2007).
10. Е. Б. Александров, О. В. Константинов, В. И. Перель и В. А. Ходовой, *Журн. эксперим. и теорет. физики* **45** (3) 503 (1963).
11. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, *Квантовая механика. Нерелятивистская теория* (Наука, М., 1989).
12. J. Tennyson, N. F. Zobov, R. Williamson, et al., *J. Phys. Chem. Ref. Data* **30**, 735 (2001).
13. V. I. Tikhonov and A. A. Volkov, *Science* **296**, 2363 (2002).
14. Г. Линг, *Физическая теория живой клетки. Незамеченная революция* (Наука, СПб., 2008).
15. G. N. Pollack, *Cells, Gels and the Engines of Life: A New, Unifying Approach to Cell Function* (Ebner & Sons, N.Y., 2001).
16. А. Ф. Бункин, А. А. Нурматов и С. М. Першин, *Успехи физ. наук* **176**, 883 (2006).
- 16а. А. Ф. Бункин и С. М. Першин, *Квантовая электроника* **37** (10), 941 (2007).
17. S. M. Pershin, *Phys. of Wave Phenomena* **17** (4), 241 (2009).
18. G. M. Artmann, C. Kelemen, D. Porst, et al., *Biophys. J.* **75**, 3179 (1998).

Quantum Mechanical Aspects of the Effects of Weak Magnetic Fields on Biological Objects

A.V. Drozdov, T.P. Nagorskaya, S.V. Masyukevich, and E.S. Gorshkov

Institute of Analytical Engineering, Russian Academy of Sciences, Rizhskii prosp. 26, St. Petersburg, 190103 Russia

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radiowave Propagation, St. Petersburg Branch, Muchnoi per. 2, a/yа 188, St. Petersburg, Russia

Possible mechanisms of action of weak combined magnetic fields on biological systems have been discussed in terms of quantum mechanics. The approaches proposed make it possible to solve the problem of the failure to compare the energy of active factors with the energy of thermal motion (kT problem). A mechanism of action of combined magnetic fields on biosystems has been proposed.

Key words: combined magnetic fields, parametric magnetic resonance, PACS