

## О ГИПОТЕЗЕ ФИЗИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА «МАГНЕТИЗМА ЖИВОЙ МАТЕРИИ» – ВЫДАЮЩЕГОСЯ ОТКРЫТИЯ Л.А. БЛЮМЕНФЕЛЬДА В БИОФИЗИКЕ

© 2018 г. Л.Н. Галль\*, Н.Р. Галль\*\*

\*Институт аналитического приборостроения РАН,  
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31–33, лит. А

E-mail: lngall@yandex.ru

\*\*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Поступила в редакцию 20.02.18 г.

Рассмотрены и проанализированы экспериментальные данные, описывающие и подтверждающие достоверность физического явления «магнетизма живой материи», открытого Л.А. Блюменфельдом с соавторами в конце 50-х годов прошлого столетия. Проанализирована теоретическая дискуссия 60-х годов, не предложившая объяснений наблюдаемых эффектов, но поставившая их под сомнение, в результате чего открытие оказалось не только забытым, но и научно дискредитированным. Предложено новое теоретическое объяснение (физическая гипотеза) совокупности экспериментальных данных, представленных Л.А. Блюменфельдом с соавторами в серии публикаций 60–90-х годов. Физическая гипотеза эффекта «биомагнетизма живой материи» основана на анализе результатов экспериментов Л.А. Блюменфельда, на теоретических представлениях авторов о физических принципах функционирования материи живого организма и на известных и описанных в биофизической литературе стадиях митоза эукариотической клетки – объекта экспериментальных исследований Л.А. Блюменфельда.

*Ключевые слова:* магнитобиология, магнитные эффекты, спектры ЭПР, ДНК, митоз клеток, молекулярно-водные структуры.

**DOI:** 10.1134/S0006302918060248

Развитие магнитобиологии как науки напрямую связано с развитием космонавтики: именно в полетах спутников человечество впервые соприкоснулось с пространством, в котором было полностью нарушено (или отсутствовало) привычное на Земле магнитное поле, которое до того в биологии не учитывалось из-за его малости. В космических полетах впервые стало ясно, что это поле играет весьма важную роль в существовании живого на Земле, и это понимание привело к созданию магнитобиологии как нового научного направления. Предмет изучения магнитобиологии – влияние магнитного поля вблизи поверхности Земли на развитие живых организмов – связан с необходимостью знать структуру этого поля, и в «приземном» магнитном поле выделяют три основных составляющих: собственное магнитное поле Земли – квазипостоянное, со средней напряженностью порядка 0,5 Э; нестабильное, сильно меняющееся электромагнитное поле кос-

мического (в основном – Солнечного) происхождения – порядка 0,05 Э и меньше и в последние десятилетия – техногенные электромагнитные поля, сосредоточенные в основном в больших городах. Исследованию приземных магнитных полей и их роли в экологии и происхождении жизни на Земле посвящено значительное число научных исследований [1,2]. Все они констатируют, что жизнь и живые организмы на Земле развивались в условиях присутствия электромагнитных полей, в связи с чем магнитные эффекты играют большую роль в процессах их жизнедеятельности. Известен и широко изучается эффект магниторецепции у самых разных живых существ: пчел, голубей, рыб, бактерий [3]. Широко исследуется и обсуждается действие электромагнитных полей, в том числе низкочастотных, на человека и биоту, как вредное и даже губительное, так и способное положительно влиять на состояние живого организма [4]. Практически все аспекты электромагнитных взаимодействий полей с живыми объектами собраны и рассмотрены в работах [5,6], но именно в этом капитальном труде отмечается отсутствие физических моделей, по-

Сокращение: ЭПР – электронный парамагнитный резонанс.

звolyающих магнитобиологии направленно изучать и использовать электромагнитные поля в экологических и медицинских целях. И во всех работах, посвященных магнетизму живых систем, полностью отсутствует даже упоминание об открытии в биофизике живых систем, сделанном более 50 лет тому назад Л.А. Блюменфельдом с сотрудниками и названном им «магнетизмом живой материи». Мы считаем крайне важным вернуться к рассмотрению этого открытия в связи с его научной и практической значимостью.

### ОБ ИСТОРИИ ОТКРЫТИЯ ЭФФЕКТА «БИОМАГНЕТИЗМ ЖИВОЙ МАТЕРИИ»

Выдающееся открытие в биофизике живого – эффект, названный авторами «магнетизм живой материи», был впервые обнаружен профессором Л.А. Блюменфельдом с соавторами в конце 50-х годов прошлого века. Исследования, относящиеся к эффекту, опубликованы в шестнадцати статьях [7–22], наблюдаемый эффект широко обсуждался в научных кругах того времени [23–26], но далее, по независящим от Л.А. Блюменфельда обстоятельствам, эффект был дискредитирован и забыт. Интерес к этой выдающейся работе поддерживался в научной литературе только благодаря публикациям С.Э. Шноля [27–29].

Появление необычной, широкой линии в спектрах электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) нативных препаратов, содержащих ДНК, было обнаружено Л.А. Блюменфельдом с сотрудниками в лаборатории радиационной биофизики ИХФ АН СССР в процессе изучения методом ЭПР радиационных поражений тканей различного происхождения. Обнаруженный эффект впервые наблюдался в 1957 г. [7], результаты всесторонних исследований модельных соединений были опубликованы в 1959–60 гг. [8–14], далее исследуемый в различных аспектах эффект рассматривался в серии статей вплоть до 1995 г. [15–22].

Эффект «широкой линии» заключался в следующем. У препаратов ДНК и РНК в их неразрушенных комплексах с белками (в нативных нуклеопротеидах), а также у нативных тканей, содержащих значительное количество нуклеиновых кислот, в спектрах ЭПР наблюдалась широкая асимметричная линия, отсутствовавшая у других биологических препаратов, в том числе у «чистых» сухих ДНК, РНК или белков. Линию наблюдали на частоте 9375 МГц при магнитном поле 0,2–0,27 Тл, она имела ширину 0,1–0,15 Тл, что позволяло приписать ей величину гиромагнитного соотношения  $g = 2,2–2,3$ . Для количественной оценки эффекта авторы в

первых публикациях пользовались сравнением интегральной интенсивности магнитных линий с линиями ЭПР обычных парамагнитных стандартов [8–14] и оценивали количество «неспаренных спинов» как  $\sim 10^{21}$  в см<sup>3</sup>.

ЭПР-исследования были дополнены измерением магнитной восприимчивости препаратов, и было обнаружено, что препараты, дающие наблюдаемую широкую линию магнитного резонанса, характеризуются также положительной статической магнитной восприимчивостью, причем ее величина насыщается в сравнительно слабых полях порядка 0,1 Тл. На основании этого Л.А. Блюменфельд высказал предположение, что речь идет о явлении, сходном с ферромагнетизмом и ферромагнитным резонансом [11]. Действительно, наблюдаемые линии по своим свойствам были схожи с линиями, соответствующими ферромагнитным образцам, и эффект насыщения магнитной восприимчивости также характерен для ферромагнетиков.

Научные результаты, связанные с регистрацией «широких линий» ЭПР, вначале были встречены крупнейшими учеными (академиками и Нобелевскими лауреатами Н.Н. Семеновым, Л.Д. Ландау, П.Л. Капицей и др.) с большим энтузиазмом. Н.Н. Семенов, директор ИХФ АН СССР, сотрудником которого в те годы был Л.А. Блюменфельд, поддерживал все публикации этого направления и гордился им, как открытием, сделанным в ИХФ. Однако информация о новом эффекте сразу же натолкнулась на резкое сопротивление ряда физиков и биологов, не находивших ему объяснения. Это сопротивление совпало с инцидентом в ИЯФ АН СССР, когда на семинаре в присутствии Н.Н. Семенова сотрудник ИЯФ, один из участников семинара, простым магнитом (!) извлек из препарата, принесенного Л.А. Блюменфельдом для демонстрации, достаточно большие крупинки магнетита. Последовавший скандал привел к тому, что все результаты, относящиеся к «широким линиям», были объявлены артефактами, полученными исключительно из-за загрязнения исследуемых объектов ферромагнитными примесями, а физико-химическая и биологическая стороны открытия в ходе дальнейшей дискуссии были полностью проигнорированы. Руководство ИХФ, а вслед за ним – все научное сообщество необъяснимо отвернулось от Л.А. Блюменфельда. Он вынужден был защищаться, доказывать подлинность полученных результатов, чистоту проведенных опытов и отсутствие в препаратах ферромагнитных загрязнений, но все его последующие работы по этому вопросу, содержащие необходимые экспериментальные доказательства чистоты препаратов, также игнорировались. Публикуемые

на эту тему работы перестали обсуждаться в научной печати: их как бы «не замечали». Как пишет С.Э. Шноль [28]: «Л.А. понимал масштаб сделанных открытий, но переломить «всеобщее мнение» не мог».

Не изменило ситуации и расширение круга объектов исследований, к которым были присоединены нативные ткани, содержащие большое количество ДНК, и клеточные культуры. Исследования на клетках показали, что появление у них магнитных эффектов (и линии ЭПР, и положительной статической восприимчивости) связано с их биологической активностью в ходе митоза и проявляется лишь на определенных его стадиях [15]. Самыми воспроизводимыми и информативными оказались опыты с культурой дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* вследствие возможности их синхронной активации и, соответственно, наибольшей интенсивности линии ЭПР. Л.А. Блюменфельдом с сотрудниками на кафедре биофизики МГУ за 35 лет исследований более чем в 100 сериях независимых опытов было надежно показано, что магнитных примесей препараты не содержат, а наблюдаемые аномальные магнитные свойства относятся именно к собственной структуре исследуемых препаратов и клеток.

К настоящему времени работы Л.А. Блюменфельда, посвященные открытию «магнетизма живой материи», оказались полностью забытыми. Все физико-химические и биологические результаты этих работ до сих пор игнорируются, хотя они, безусловно, могут быть ключом к пониманию важнейших физических аспектов физиологии живых клеток.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ Л.А. БЛЮМЕНФЕЛЬДОМ

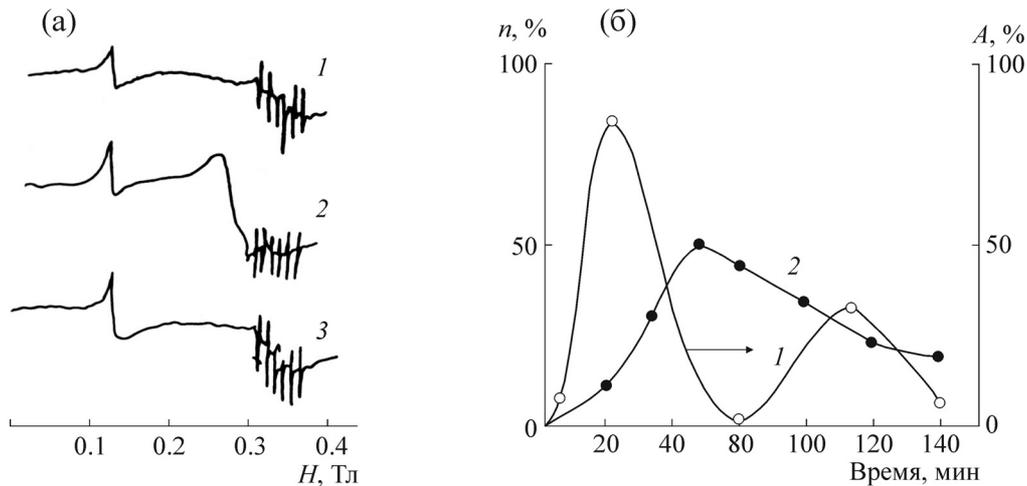
**Методика эксперимента.** При приготовлении комплексов из нуклеиновых кислот с белками [7,13] к буферному раствору со строго определенным рН добавляли раствор нуклеиновой кислоты и раствор белка. После перемешивания смесь выдерживали 20 ч при температуре 0–2°C, после чего центрифугировали. Осадок промывали трижды определенным объемом соответственно разбавленного буферного раствора, диализовали на холоде против дистиллированной воды до полного удаления неорганических солей и лиофилизировали.

При работе с клетками [15,21] культуру дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* выращивали воздушно-проточным методом. В качестве питательной среды использовали осветленную ме-

лассу с добавлением азотистых и фосфорсодержащих веществ и ростового фактора (дестииотиона). В среде поддерживали стабильную температуру в пределах 28–37°C. Фиксировали временной процесс развития дрожжей: их разбраживание, рост дрожжевой массы, деление и прекращение роста. Пробы отбирали каждые 20 мин после начала опыта. Дрожжи отфильтровывали, дрожжевую пасту набирали в трубочки диаметром 3 мм и вносили в ЭПР-спектрометр (если исследования проводили при комнатной температуре) или замораживали в жидком азоте (при работе с температурной приставкой). Затем спектры регистрировали на спектрометре ЭПР в широком диапазоне температур.

**Результаты.** При исследовании модельных комплексов нуклеиновых кислот с белками (РНК + сывороточный или яичный альбумин), а также нативных лиофилизированных тканей, содержащих большие количества нуклеопротеидов, наблюдались широкие линии ЭПР с большой интегральной интенсивностью [8]. Показано также, что сигналы ЭПР обнаруживались лишь для модельных комплексов, приготовленных по строго определенной, описанной выше методике, в то время как исходные препараты РНК и белков сигналов не давали. Полуширина линий составляла от 500 до 1000 Э, *g*-фактор максимума линии был смещен от значения, характерного для свободного электрона (2,0023) в сторону больших значений (2,1–2,4). При понижении температуры до ~80 К линия скачкообразно падала до нуля. Для искусственно синтезированных полимеров было показано, что широкие линии ЭПР наблюдаются только для полимеров, содержащих в цепи сопряжения азот и многочисленные полярные центры [10], и не наблюдаются для полимеров, не содержащих в цепи сопряжения гетероатомов и полярных групп [9]. Тем самым для нативных и синтезированных молекулярных структур, состоящих только из легких атомов без неспаренных электронов на атомных оболочках, экспериментально показано, что в их основном состоянии «почему-то присутствует множество сильно взаимодействующих неспаренных электронов» [11].

Типичный результат измерений в эксперименте с культурой клеток – дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* – представлен на рис. 1, взятом из работы [21]. На рис. 1а показана последовательная во времени запись спектров ЭПР культуры дрожжей: спектр 1 – за 60 мин до максимума деления (начала разбраживания дрожжей); спектр 2 – за 30 мин до максимума деления (появилась интенсивная линия с ши-



**Рис. 1.** (а) – Появление линии  $g = 2,3$  в спектре ЭПР культуры дрожжей. (б) – Динамика изменения интенсивности линии  $g = 2,3$  в спектре ЭПР во времени совместно с динамикой деления клеток дрожжей: 1 – изменение интенсивности ЭПР-сигнала, 2 – нарастание и спад деления клеток дрожжей в % от общей массы.

риной 20–30 мТл и  $g \approx 2,3$ ); спектр 3 – через 20 мин после максимума деления (линия исчезла). На рис. 1б – динамика нарастания и спада интенсивности указанной линии ЭПР (кривая 1) соотнесена во времени с кривой нарастания и спада деления дрожжевых клеток (кривая 2).

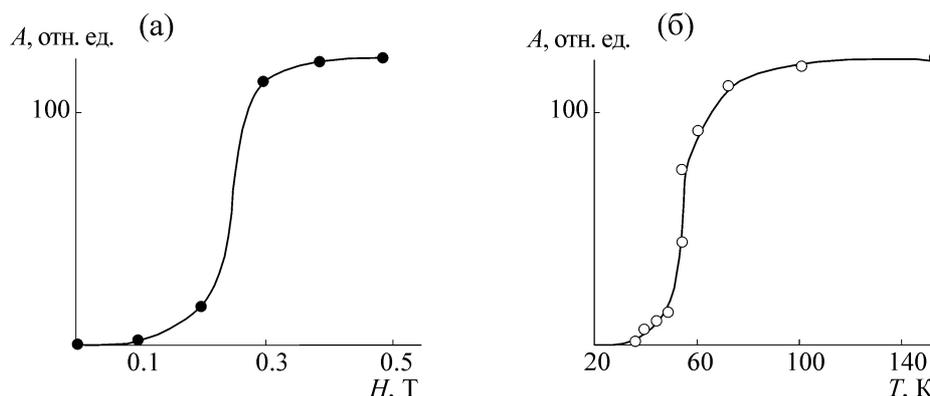
Из рис. 1 видно, что максимальная интенсивность сигнала ЭПР достигается за 25–30 мин до начала интенсивного почкования дрожжей. После прохождения максимума деления интенсивность этого сигнала резко падает до нуля. Однако после того, как начинается второй цикл почкования, указанный сигнал, хоть и меньший по величине (трудно обеспечить полную синхронность цикла для всех клеток), появляется вновь с таким же расположением во времени по отношению к динамике почкования.

Из экспериментов очевидно, что наблюдаемый эффект не может быть отнесен к присутствию магнитных загрязнений, а присущ самим исследуемым структурам. Это доказывается и его отсутствием у исходных препаратов, и его зависимостью от методики приготовления комплексов, и тем, что он проявляется и исчезает в зависимости от стадии митоза одних и тех же клеток. Тем самым для молекулярных структур, вообще говоря, валентно насыщенных и диамагнитных, состоящих только из легких  $sp$ -атомов, экспериментально установлено наличие выраженных парамагнитных эффектов. Л.А. Блюменфельд с соавторами связывали это с появлением в основном состоянии указанных структур «множества сильно взаимодействующих неспаренных электронов», как уже указывалось выше, в концентрации порядка  $10^{21}$  в  $1 \text{ см}^3$  [14]. Они указывали, что это облако

электронов характеризуется определенной пространственной структурой, благодаря которой макромолекулы являются магнитно-анизотропными и представляют собой, по существу, маленькие магнитики [11].

Изменение магнитных свойств на этапе гибели клеток – эффект Бауэра–Раскина [30] – также оказалось количественно зависимым от стадии развития клеток, что было в работе [19] показано при исследовании изменения (увеличения) диамагнетизма клеток дрожжей при их гибели. Количественные данные для эффекта получались путем измерения магнитной восприимчивости на чувствительных магнитных весах методом Гуи. Весы позволяли измерять величины объемной магнитной восприимчивости порядка  $10^{-6}$  ед. CGSE с точностью до 0,1% при напряженности магнитного поля 1000 Э. Была зафиксирована зависимость величины изменения диамагнетизма  $\Delta\chi$  от стадий развития клеток, варьирующая в интервале от 3 до 20%. В работе [19] была также найдена и подтверждена в серии опытов зависимость эффекта от влажности культуры клеток: при уменьшении влажности изменение  $\Delta\chi$  также уменьшалось, а при влажности менее 10% скачком падало до нуля.

Исследования, проведенные с культурами дрожжей при их замораживании в магнитном поле, результаты которых показаны на рис. 2, взятом из работы [22], показали, что интенсивность ЭПР линии с  $g = 2,3$  зависит от величины магнитного поля, в котором происходило замораживание, и температуры замораживания пробы.



**Рис. 2.** (а) – Зависимость интенсивности линии  $g = 2,3$  в спектре ЭПР от величины магнитного поля в момент отбора пробы для замораживания; (б) – зависимость интенсивности линии  $g = 2,3$  от температуры замораживания пробы в магнитном поле  $H = 0,4$  Тл.

Критичным в экспериментах оказалось поле  $H \sim 0,2$  Тл и температура 70 К: в магнитных полях, меньших этой величины  $H$ , и при  $T < 70$  К интенсивность наблюдаемой линии ЭПР с  $g = 2,3$  резко уменьшается.

Таким образом, экспериментальные результаты, полученные Л.А. Блюменфельдом и его группой за 30 лет исследований магнитных эффектов с нативными препаратами и клетками, свидетельствуют о следующем (суммирование по материалам работ [7–22]):

1. В спектре ЭПР при полях порядка 2700 Гс на частоте  $\sim 10$  ГГц для широкого набора образцов (нативные нуклеопротеиды, искусственно синтезированные комплексы РНК и белков, полученные при строго определенной величине рН, клетки бактерий и дрожжей) наблюдаются интенсивные широкие несимметричные линии. Отдельно сухие компоненты смесей или клетки не в нужной стадии деления таких линий не дают. Препараты и образцы, дающие наблюдаемую широкую линию магнитного резонанса, характеризуются также положительной статической магнитной восприимчивостью, насыщающейся в сравнительно слабых полях порядка 0,1 Тл.

2. В процессе исследований синтезированных модельных препаратов получены многократно повторенные данные, свидетельствующие о связи наблюдаемых магнитных эффектов со структурой биополимеров. Наиболее существенным из них представляется результат, свидетельствующий, что «широкие линии» ЭПР наблюдаются исключительно у молекулярных систем (нуклеопротеидов), содержащих в цепи сопряжения гетероатомы азота и кислорода [10], т.е. гидрофильные центры, а полимеры с сопряженными связями, состоящие только из углерода и водорода, «широких линий» не обнаруживают никогда [9].

3. Экспериментально показана и доказана временная связь магнитных эффектов у клеточных культур с их биологической активностью, проявляющаяся в ходе их развития [15]. Самым удачным объектом для наблюдения эффекта оказалась культура дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, для которой можно создать условия синхронного развития и деления клеток культуры. Для нее было многократно надежно показано, что интенсивные линии ЭПР с шириной 30–50 мТл и  $g = 2,3$  появляются на стадиях роста, предшествующих началу деления. Одновременные с ЭПР измерения магнитной восприимчивости показывают, что в период, предшествующий интенсивному делению, препараты клеток характеризуются положительной магнитной восприимчивостью с полным насыщением в полях, меньших 0,1 Тл (исходные культуры дрожжей полностью диамагнитны) [21,22]. Положительная магнитная восприимчивость живых клеток исчезает при их гибели и зависит от влажности [19].

4. При замораживании проб дрожжей, отбираемых на различных этапах деления клеток, в магнитных полях различной величины обнаружен эффект консервирования структур, ответственных за появление магнитных свойств [22]. Этот эффект наблюдается в полях  $H > 0,3$  Тл и не пропадает при понижении температуры вплоть до 70 К.

5. Присутствие ионов атомов железа в изучаемых образцах, определяемое различными химическими методами, находилось в пределах ошибки эксперимента, ни в одном из препаратов их количество не превышало  $10^{-4}$  от веса образца. Кроме того, эти ионы не собраны в домены, а рассеяны по структуре образца [8, 20,22].

Из всего вышесказанного следует, что все наблюдаемые в экспериментах Л.А. Блюмен-

фельда магнитные эффекты следует относить не к загрязнениям препаратов ферромагнетиками, а только к структурам самих биологических систем.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ 60-х ГОДОВ, ПРЕДЛОЖЕННЫЕ ДЛЯ ОБЪЯСНЕНИЯ НАБЛЮДАЕМОГО ЭФФЕКТА

Теоретические представления и модели, призванные объяснить наблюдаемые магнитные эффекты, развивались как самими авторами открытия [11,14,17,18], так и поддерживающими их теоретиками [24,25] и их оппонентами [26]. Первые были сосредоточены на попытках найти в структурах исследуемых биополимеров некую организацию спинов, которую можно было бы трактовать как причину магнитных свойств биопрепаратов, в то время как их оппоненты искали объяснения эффекта в наличии в препаратах примесных ферромагнитных включений.

Анализируя наблюдаемый эффект, полученный на препаратах ДНК с белками [11,14], его авторы отмечали, что ширина и форма резонансных кривых, их температурное поведение, а также достижение постоянной намагниченности в весьма слабых полях в опытах по статическому магнетизму показывают, что исследуемые соединения не являются обычными парамагнетиками и предполагали, что магнитные свойства изучаемых препаратов определяются коллективным спиновым взаимодействием. Однако отсутствие начального магнитного момента, показанное экспериментально, в сочетании со всеми наблюдаемыми экспериментальными данными не позволило авторами отнести эти соединения напрямую к классу ферро- или антиферромагнетиков. Для описания всей совокупности наблюдаемых свойств они предложили термин «псевдоферромагнетики» [16,17]. Говоря о необходимости объяснения наблюдаемых эффектов, Л.А. Блюменфельд еще раз обращает внимание на то, что аномальные магнитные свойства биополимеров связаны *только* с сохранением их нативной высокоупорядоченной структуры [20]. Это экспериментально, хоть и косвенно, подтвердили и его оппоненты из ИЯФ АН СССР [23], которые не нашли широких линий ЭПР в ДНК, выделенной из препарата печени, аналогичного используемому в исследованиях Л.А. Блюменфельда, но в работе [23] для получения «чистой» ДНК препарат печени был обработан соляной кислотой.

При попытке интерпретации эффекта «широких линий» Л.А. Блюменфельд исходил из теоретических представлений о методе ЭПР, в рамках которых он связывал интенсивность на-

блюдаемых линий с количеством неспаренных электронов в изучаемых культурах. Поэтому любая возможная интерпретация наблюдаемых эффектов, по его мнению, должна, прежде всего: а) объяснить появление неспаренных электронов в валентно насыщенных органических структурах этого типа и возрастание их количества, по крайней мере, на два порядка в культурах живых клеток перед началом их деления; б) предложить механизм коллективного спинового взаимодействия, приводящий к наблюдаемым магнитным свойствам препаратов и культур клеток. Однако такой интерпретации им найдено не было.

Сразу же после первых публикаций Л.А. Блюменфельда в теоретическое объяснение наблюдаемых «широких линий» активно включились физики-теоретики. В 1960 г. В.Л. Гинзбург (будущим Нобелевским лауреатом) к соавторству с В.М. Файном были опубликованы две статьи [24,25], посвященные попытке дать объяснение наблюдаемому эффекту с позиций представлений об антиферромагнитной системе ДНК как двойной спирали. Для этого ими была предложена модель, в которой магнетизм связывался с изменениями взаимного расположения двух цепей исходной ДНК, каждая из которых в свободном состоянии была бы диамагнитной, но из-за конечности цепей может приобрести отличный от нуля магнитный момент как результат существования ближнего порядка. Оценка возможной магнитной восприимчивости такой системы, проведенная в работе [25], показала ее качественную близость к наблюдаемой в экспериментах Л.А. Блюменфельда. В качестве одного из возможных объяснений Гинзбург и Файн также рассмотрели сопоставление свойств раствора препарата со свойствами очень мелкодисперсной кристаллической среды (квазикристаллическая картина), отдельные «кристаллики» которой, содержащие небольшое число спинов, по предположению, сохраняют высокую степень упорядоченности. Тогда наблюдаемый эффект можно отнести, по их мнению, к области «некогерентного антиферромагнетизма», для которого также характерно сильное уширение линий парамагнитного резонанса.

Однако Я.Г. Дорфман, крупнейший в то время специалист в области магнетизма и ЭПР [26], подверг резкой критике все предлагаемые модели как Блюменфельда, так и теоретиков. Он считал, что малые вкрапления классических ферромагнитных частиц, например, феррита, полностью объясняют всю совокупность наблюдаемых данных, в том числе и температурные эффекты. По его оценке для этого достаточно  $10^{14}$ – $10^{18}$  спинов, которые «во-

все не рассеяны по образцу, а, напротив, собраны в плотные комочки или кристаллики, вкрапленные в органическую массу. То, что они легко намагничиваются до насыщения, позволяет признать их ферромагнетиками». При этом расстояние между спинами в кристалликах «должно быть маленьким, не более 3–4 Å», и для получения наблюдаемых Блюменфельдом эффектов «достаточно присутствия такой примеси Fe в количестве от  $10^{-2}$  до  $10^{-6}\%$ ». Соответственно результаты, полученные Блюменфельдом, Дорфман считал исключительно связанными с присутствием ферромагнитных примесей, а не с «ферромагнетизмом высокоупорядоченных макромолекулярных структур». Свое утверждение он подкрепил ссылкой на работу [23].

Это заключение Я.Г. Дорфмана на многие годы перевело всю дискуссию в обсуждение только возможного ферромагнетизма исследуемых проб, причем трактуемого именно как присутствие ферромагнитных включений, под которыми далее уже понимались включения собственно магнетита. «Обнаружение» частиц магнетита в препарате Блюменфельда произошло именно в период активной полемики с Дорфманом, когда трактовка эффекта как следствие внедренных ферромагнитных частиц уже была предложена. Дискуссия («общественное мнение») велась устно и не оставила следов в печати, кроме уже упомянутой статьи Дорфмана и экспериментальной статьи сотрудников ИЯФ АН СССР [23]. Л.А. Блюменфельд испытывал огромное психологическое и научное давление и, не имея иной модели для объяснения эффекта наблюдаемой «широкой линии» ЭПР, кроме предполагаемого присутствия в препарате ферромагнитных загрязнений, каким-то образом образующихся в живых системах, в своих последующих работах постепенно переключился на поиски правдоподобного объяснения синтеза таких ферромагнетиков. Эти поиски продолжались и продолжают сотрудниками кафедры биофизики МГУ и после смерти Блюменфельда [31]. Но все же механизма, создающего такое перераспределение внутриклеточного железа в клетках дрожжей, при котором на определенных этапах их клеточного цикла образуются ферромагнитные домены, в этих работах не предложено: на наш взгляд, его просто не существует, а концепция Дорфмана, при всей ее внешней привлекательности, ошибочна и уводит рассмотрение проблемы биомагнетизма в неверное направление.

#### ГИПОТЕЗА: НОВАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ «БИОМАГНЕТИЗМА ЖИВОЙ МАТЕРИИ», ПОСТРОЕННАЯ НА ОСНОВЕ «ПРИНЦИПОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАТЕРИИ ЖИВОГО ОРГАНИЗМА»

Но вот прошло 60 лет и страсти того времени утихли вместе с забытым, но от этого не менее выдающимся открытием. И теперь можно спокойно вернуться к обсуждению того неопровержимого экспериментального факта, что появление магнитных свойств ранее немагнитных клеток происходило на этапе, предшествующем их интенсивному делению. Исходно важными для построения новой физической модели наблюдаемого эффекта являются следующие теоретические и экспериментальные утверждения авторов и участников дискуссии:

1. Наблюдаемые экспериментально магнитные эффекты в исследуемых модельных системах имели место только для полимеров, имевших в структуре гетероатомы N и O (гидрофильные центры), а для клеточных культур *проявляются только на этапе, совпадающем с концом фазы  $G_2$  клеточного цикла, предшествующей делению клеток* (Блюменфельд) и исчезают при гибели живых клеток (Самойлова).

2. Интенсивность магнитных эффектов как препаратов, так и клеток повышается с увеличением влажности (Блюменфельд, Самойлова).

3. Наблюдаемые магнитные свойства могут быть объяснены, исходя из представлений о «некогерентном антиферромагнетизме», т.е. мелкодисперсной кристаллической среде, состоящей из микромагнитов (Гинзбург и Файн). Отдельные «кристаллики» такой среды, даже содержащие небольшое число спинов, по предположению, сохраняют высокую степень магнитной упорядоченности, т.е. ведут себя как отдельные домены.

4. Расстояния между спинами внутри доменов не должны превышать  $(3-4) \cdot 10^{-8}$  см (3–4 Å), причем для появления линий ЭПР достаточно очень небольшого количества спинов ( $10^{-2}$ – $10^{-3}$  ат.%), собранных в плотные кристаллики, вкрапленные в органическую массу (Дорфман).

При построении физической модели «биомагнетизма живой материи» рассмотрим последовательно все эти утверждения, сосредоточив внимание на структуре биополимеров и биологическом аспекте: связи магнитных свойств с жизненным циклом клетки, а также, учтя полученные в последние годы новые теоретические и экспериментальные результаты, характеризующие процессы гидратации биополимеров. Как было показано, эти процессы в мо-

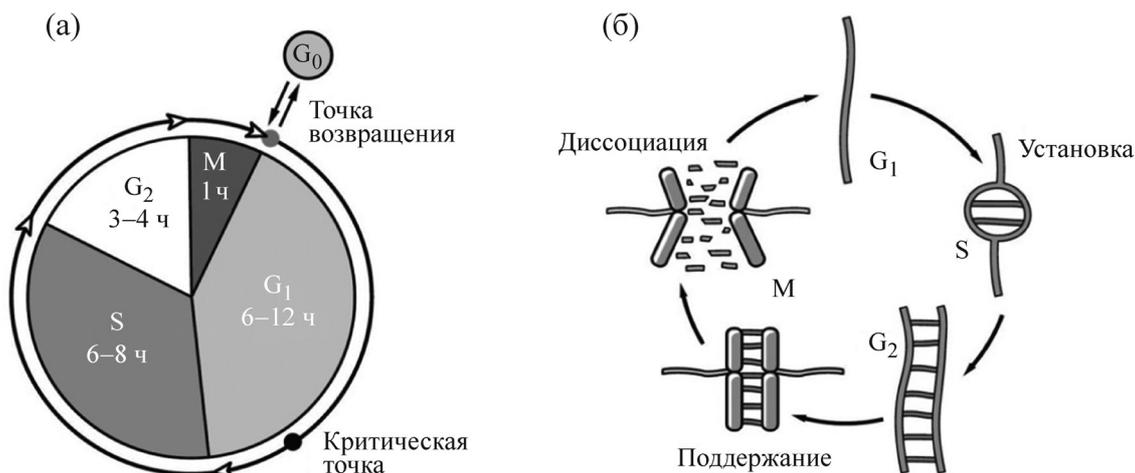


Рис. 3. Схема жизненного цикла эукариотической клетки (согласно работе [33]): (а) — распределение времени между фазами репликации хромосом, (б) — дупликация хромосом в процессе репликации.

лекулярных системах живых клеток сопровождаются образованием неоднородных молекулярно-водных комплексов [32].

1. Биофизика выделяет в жизненном цикле клеток эукариотов, к которым относятся дрожжи, четыре фазы, сравнительная продолжительность которых представлена на диаграмме (рис. 3а) [33]. Биохимические процессы, связанные с ДНК клетки при переходе между фазами  $S \rightarrow G_2 \rightarrow M$ , описываются в работе [33] следующим образом. Дублируемые хромосомы (сестринские хроматиды) находятся в ассоциированном друг с другом состоянии с момента их образования в  $G_2$ -фазе до их разделения в анафазе  $M$ . Ассоциация (когезия) хроматид в фазе  $G_2$  создается и поддерживается белковыми мостиками между ними — микротрубочками, образованными белком тубулином, постоянный рост которых ведет к расхождению хроматид. Таким образом, в  $G_2$ -фазе митоза общая длина тубулиновых мостиков непрерывно нарастает во времени. Когда устанавливается стабильное биполярное соединение микротубулина с кинетохорами всех сестринских пар, генерируется сигнал к быстрой одновременной диссоциации когезий: все тубулиновые нити разрываются и исчезают (рис. 3б).

Построение белковых мостов между сестринскими хроматидами является фундаментальной, но ранее, как подчеркивается в работе [33], неизвестной функцией эукариотической репликации, т.е. в 60-е годы прошлого века этот элемент молекулярного механизма, являющийся одним из центральных вопросов молекулярной биологии клетки, был еще неизвестен.

2. Сравнение временных процессов клеточного цикла дрожжевых клеток с временными

процессами появления у клеток магнитных свойств в экспериментах Блюменфельда (рис. 3а) однозначно указывает на то, что наблюдаемые магнитные свойства появляются на этапе клеточной фазы  $S$  и достигают максимума на этапе фазы  $G_2$ , как и отмечалось в работе [22]. В фазе  $M$  клеточного цикла (фазе деления дрожжевых клеток) происходит резкое разрушение всех когезий, т.е. разрыв и разрушение тубулиновых нитей, и в опытах Блюменфельда с дрожжами полное исчезновение магнитных свойств клеток регистрировалось во временном периоде, совпадающем с этой фазой. Это совпадение позволяет предположить, что объяснение появления и исчезновения магнитных свойств у делящихся клеток (дрожжей) следует искать в эффектах, связанных с процессом разъединения сестринских хроматид тубулиновыми белковыми нитями в процессе деления клеток.

Однако белок тубулин сам по себе магнитных эффектов не демонстрирует, что, в частности, было показано и в собственных опытах Блюменфельда с белками. Это означает, что необходимо выявить хотя бы один дополнительный, ранее не учитываемый, фактор, связанный с процессом разъединения хроматид и ростом белковых нитей. Таким фактором, на наш взгляд, является интенсивная гидратация тубулина на всем временном отрезке его роста. Способность к гидратации также является наиболее существенным различием между полимерами, имеющими и не имеющими гетероатомов в системе сопряжения.

3. В работах [32,34] нами была предложена модель, описывающая молекулярную систему живого как самосогласованную нелинейную структуру, включающую биомолекулы и упо-



Рис. 4. Компьютерная модель модульной структуры связанной воды из трех кристаллических модулей – спиралей 30/11, продольный (а) и поперечный (б) вид (по данным работы [28]). Более крупные – атомы кислорода, более мелкие – протоны. Внутренний диаметр спиральной трубки составляет 2,4 нм.

рядоченные структуры из молекул воды, в которой биомолекулы обеспечивают за счет нелинейного преобразования химической, тепловой или электромагнитной энергии в форму квантов энергии (солитонов) поддержание роста упорядоченных водных структур, объединяющих гидрофильные центры этих биомолекул и служащих транспортирующими путями для потоков квантованной энергии между ними. В рамках этой модели применительно к процессу репликации необходимо учитывать не только то, что в динамике фаз клеточного цикла  $S \rightarrow G_2 \rightarrow M$  происходит нарастание длины тубулиновых мостиков и их гидратация, также нарастающая от S-фазы к M-фазе, но и то, в каком виде эта гидратация реализуется. В работе [32] нами на основании самосогласованных расчетов, представленных в работе [35], было обосновано предположение, что гидратация биополимеров с наибольшей вероятностью реализуется в виде кристаллоподобных энергонапряженных водных структур из элементарных структурных модулей самоорганизации воды – спиралей 30/11, растущих на гидрофильных центрах биополимера (рис. 4). Структуры этих модулей, самоорганизующихся в объеме жидкой воды, получены методом компьютерного дизайна и описаны в работах [36,37]. При гидратации тубулина они образуют «шубу», связанную с гидрофильными центрами тубулиновых нитей и расположенную в пространстве между дублирующими хроматидами.

Как видно из рис. 4, внешняя поверхность этих «трубок» представляет собой слой протонных концов молекул воды с существенным положительным зарядом. Это позволяет отнести такие структуры к сегнетоэлектрикам, и именно электрическими свойствами кристаллоподобных структур из молекул воды можно объяснить аномально высокую диэлектрическую постоянную жидкой воды, отличающую воду от всех других ассоциированных жидкостей.

Поведение модульных иерархических структур связанной воды при гидратации биополимеров в модельных и в живых системах суще-

ственно отличается от поведения структур самоорганизации молекул в чистой жидкой воде. При гидратации биополимеров водные структуры растут на их гидрофильных центрах и соответственно лишены возможности хаотического движения. Деформированные связи в молекулах воды, организованных в энергонапряженные модульные структуры, вызывая появление частично неспаренных спинов электронов, могут рассматриваться как причина проявления конечных магнитных свойств гидратированных биополимеров. Это же мнение, хотя и в порядке предположения, еще в 1959 г. высказывал Л.А. Блюменфельд, когда писал: «Основной вопрос заключается в происхождении неспаренных электронов. Такие особенности наблюдаемых линий ЭПР, как асимметрия, поглощение в нулевом поле, должны быть связаны с сильными внутренними электрическими полями, которые через спин-орбитальную связь возмущают магнитные спиновые уровни» [11]. «Основной вопрос» Блюменфельда, ввиду его принципиальной важности, будет рассмотрен в специальной публикации, где будет показано возможное возмущение магнитных спиновых уровней в ассоциатах из молекул воды.

Представление о том, что происхождение магнитных эффектов живых клеток связано именно с электрическими и магнитными свойствами фрактальных модульных водных структур, подтверждается экспериментальными фактами увеличения магнитных эффектов одновременно с нарастанием гидратации тубулиновых нитей в фазах S и  $G_2$  клеточного цикла и их полным исчезновением при разрушении этой системы в фазе M митоза клетки. Этот вывод также вполне совпадает с данными эффекта Бауэра–Раскина [30], подтвержденного в работе [19], что интенсивность наблюдаемой магнитной восприимчивости уменьшается с понижением влажности препарата живых клеток и полностью исчезает при гибели клеток, каким бы способом эта гибель ни осуществлялась.

Модель гидратации биополимеров, изложенная в работах [32,34], хорошо объясняет также различия в интенсивности магнитных эф-

фектов между живой системой и нативными препаратами. Для водных растворов нативных препаратов источником энергии является только тепловая энергия раствора, в то время как в живой системе изобилие химической энергии, привлекаемой клеткой к процессу митоза, приводит в результате к росту и количества, и объемов водных упорядоченных ассоциатов. В соответствии с изложенными здесь представлениями это должно приводить к существенному увеличению наблюдаемого магнитного отклика для делящихся живых клеток по сравнению с нативными препаратами, и, как показывают полученные Л.А. Блюменфельдом экспериментальные результаты, этот отклик действительно увеличивается не менее чем на два порядка. Ответственность фрактальных модульных водных структур как за электрические, так и за магнитные эффекты, наблюдаемые в комплексе исследований «магнетизма живой материи», позволяет трактовать эти структуры не только как сегнетоэлектрики, но и как сегнетомагнетики.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная гипотеза физического механизма «магнетизма живой материи», связывающая наблюдавшиеся в экспериментах Блюменфельда магнитные эффекты с биофизическим механизмом гидратации биополимеров, позволяет дать объяснения практически всем полученным в работах [7–22] закономерностям эффекта «магнетизма живой материи». Гипотеза показывает, что этот эффект, повторяющийся во времени фазы митоза клетки, связан, в полном соответствии с утверждениями Блюменфельда, только со структурой биополимеров и не имеет отношения к наличию в препаратах ферромагнитных загрязнений, например, соединениями железа. Устранение утверждения о ферромагнитном загрязнении препаратов не только восстанавливает значимость выдающегося открытия Л.А. Блюменфельда в биофизике, но ставит полученные им результаты в ряд главных признаков живой клетки, определяющих дальнейшее развитие теоретических представлений о внутренних факторах, управляющих процессами митоза.

К важнейшим результатам, подлежащим дальнейшему пониманию и осмыслению, относятся наблюдаемые в экспериментах Блюменфельда зависимости магнитных свойств делящихся клеток от температуры  $T$  и величины магнитного поля  $H$ , при которых проводили замораживание образцов перед их измерением. Эти зависимости дают важные количественные данные, позволяющие установить температур-

ные пределы функционирования молекулярной энергетической машины, что, в свою очередь, открывает пути для привлечения достижений современной теоретической физики к развитию представлений о живой системе.

К сожалению, отсутствие на сегодня теоретического знания о возможных сегнетомагнитных свойствах системы атомов, сформированных в нанотрубку из молекул воды, аналогичную представленной на рис. 4 спирали 30/11, не позволяет пока построить полноценную теорию «магнетизма живой материи». Предложенная здесь гипотеза, связывающая магнетизм биополимеров или магнетизм клеток в период, предшествующий их делению, с магнетизмом водных структур, имеющих место при гидратации биополимеров, конечно же, требует дальнейшего подтверждения. Одним из направлений теоретического изучения эффекта «магнетизма живой материи» может быть изучение структуры водных структур самоорганизации воды на предмет подтверждения у них свойств, характерных для сегнетомагнетиков (мультиферроиков) [38]. Эта проблема ждет своего решения, и оно будет иметь фундаментальное значение для трактовки молекулярных процессов в живом, принципиально важных для последующего понимания физиологических процессов в живых организмах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. В. Александров, *Экологическая роль электромагнетизма* (Изд-во Политехн. ун-та, СПб, 2006).
2. Б. М. Владимирский и Н. А. Темурьянц, *Влияние солнечной активности на биосферу – ноосферу. Гелиобиология от А.Л. Чижевского до наших дней* (МИЭПУ, М., 2000).
3. *Биогенный магнетит и магниторецепция. Новое о биоманетизме*, под ред. Дж Киршвинка, Д. Джонса и Б. Мак-Фаддена (Мир, М., 1989).
4. Ю. А. Холодов, *Магнетизм в биологии* (Наука, М., 1970).
5. В. Н. Бинги, *Магнитобиология* (Наука, М.: 2003).
6. В. Н. Бинги, *Принципы электромагнитной биофизики* (Физматлит, М., 2011).
7. Л. А. Блюменфельд и А. Э. Калмансон, *Биофизика* 2 (5), 552 (1957).
8. Л. А. Блюменфельд, А. Э. Калмансон, Пей-ген Шэн и А. Г. Пасынский, *Биофизика* 4 (3), 263 (1959).
9. А. А. Берлин, Л. А. Блюменфельд, М. И. Черкашин и А. Э. Калмансон, *Высокомолекуляр. соединения* 1 (9), 1361 (1959).
10. Л. А. Блюменфельд, А. А. Берлин, Н. Г. Матвеева и А. Э. Калмансон, *Высокомолекуляр. соединения* 1 (11), 1647 (1959).
11. Л. А. Блюменфельд, *Биофизика* 4 (5), 515 (1959).

12. Л. А. Блюменфельд, А. Э. Калмансон и Пей-генъ Шэн, Докл. АН СССР **124** (5), 1144 (1959).
13. Пей-генъ Шэн, Л. А. Блюменфельд и А. Э. Калмансон, Биофизика **5** (6), 645 (1960).
14. Л. А. Блюменфельд и В. А. Бендерский, Докл. АН СССР **133** (6), 1431 (1960).
15. Л. А. Блюменфельд и О. П. Самойлова, Биофизика **6** (1), 15 (1961).
16. Л. А. Блюменфельд, Природа, № 2, 55 (1961).
17. Л. А. Блюменфельд, В. А. Бендерский и А. Э. Калмансон, Биофизика **4** (6), 631 (1961).
18. Л. А. Блюменфельд, Докл. АН СССР **148** (2), 361 (1963).
19. И. В. Маленкова и О. П. Самойлова, Биофизика **11** (6), 734 (1968).
20. А. И. Цапин и Л. А. Блюменфельд, Журн. физ. химии **58** (9), 2312 (1984).
21. А. И. Цапин, О. П. Самойлова и Л. А. Блюменфельд, Биофизика **34** (4), 630 (1989).
22. О. П. Самойлова, А. И. Цапин и Л. А. Блюменфельд, Биофизика **5** (2), 383 (1995).
23. А. А. Александров, В. Ю. Гаврилов, А. Г. Киселев и др., Докл. АН СССР **141** (6), 1483 (1961).
24. В. Л. Гинзбург и В. М. Файн, Докл. АН СССР **131** (4), 785 (1960).
25. В. Л. Гинзбург и В. М. Файн, Журн. эксперим. и теорет. физики **39** (4), 1323 (1960).
26. Я. Г. Дорфман, Докл. АН СССР **142** (34), 815 (1962).
27. С. Э. Шноль, *Герои, злодеи, конформисты отечественной науки* (Книжный дом «ЛИБРОКОМ», М., 2010).
28. С. Э. Шноль, Биофизика **48** (6), 965 (2003).
29. С. Э. Шноль, Л.А. Блюменфельд. Биофизика и поэзия («Добросвет», Изд-во «КДУ», М., 2009).
30. E. Bauer and A. Raskin, Nature **38**, 801 (1936).
31. Г. Б. Хомутов, в сб. *Проблемы биологической физики*, под ред. В. А. Твердислова (МГУ, М., 2011), сс. 159–179.
32. Л. Н. Галль, *Физические принципы функционирования материи живого организма* (Изд-во СПбГПУ, СПб., 2014).
33. Г. Р. Виноградская, *Репликация генома* (Изд-во СПбГПУ, СПб., 2007).
34. Л. Н. Галль и Н. Р. Галль, Биофизика **54** (3), 563 (2009).
35. Л. Н. Галль и Н. Р. Галль, Докл. РАН **461** (6), 673 (2015).
36. Н. А. Бульенков, Биофизика **50** (5), 620 (2005).
37. А. О. Марченко, А. Б. Соловей и В. И. Лобышев, Биофизика **58** (1), 27 (2013).
38. В. К. Воронов и А. В. Подоплелов, *Физика на переломе тысячелетий* (URSS, М., 2014), т. 1.

## On the Hypothesis of the Physical Mechanism of “the Magnetic Field Effects on the Living Matter”, an Outstanding Discovery Made by L.A. Blumenfeld in Biophysics

L.N. Gall\* and N.R. Gall\*\*

*\*Institute for Analytical Instrumentation, Russian Academy of Sciences, ul. Ivana Chernykh 31–33, lit. A, St. Petersburg, 198095 Russia*

*\*\*Ioffe Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, St. Petersburg 194021, Russia*

Experimental data, that describe and confirm the validity of the physical event such as the magnetic field effects on the living matter which was discovered by L.A. Blumenfeld and co-workers at the end of the 1950s of the 20th century, have been discussed and analyzed. We have analyzed the discussion of this theory which was conducted in the 1960s of the 20th century but not provided any explanations of the observed effects, thus, it was challenged and as a result this discovery was not only forgotten but rejected. A new theoretical explanation (a physical hypothesis) for experimental dataset represented by L.A. Blumenfeld and co-workers in a series of their publications in the 1960–90s has been developed. The physical hypothesis for the biological effect of the magnetic fields on the living matter is based on the analysis of the experimental results obtained by L.A. Blumenfeld and his coauthors, on their theoretical ideas on physical principles of the living matter functioning, and on our current knowledge of mitotic stages of eukaryotic cell division which was the object of L.A. Blumenfeld investigations.

*Keywords: magnetobiology, magnetic field effects, EPR spectra, DNA, cell mitosis, molecular-water structures*