

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ К СЛАБЫМ ЭМП НИЗКИХ ЧАСТОТ

С. И. Аксенов

*Биологический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, кафедра биофизики
Москва 119899, Воробьевы горы, E-mail: aksyonov@biophys.msu.ru*

Предложен и экспериментально обоснован физико-химический механизм воздействия слабых ЭМП низких частот на биологические процессы, определяемый нелинейными эффектами движения ионов в клетке под действием наводимой внешним полем ЭДС. Это вызывает изменение ионной силы и pH в примембранном слое с последующим их влиянием на высвобождение белков из связанного на мембранах состояния. Механизм объясняет основные особенности воздействия ЭМП низких частот на организмы, включая чувствительность к магнитным бурям и ослабление эффектов с ростом амплитуды ЭМП. Эксперименты подтвердили влияние ЭМП-обработки на активацию ферментов эстераз, изменение pH и на рост корней и проростков из семян пшеницы при обработке на соответствующих стадиях их прорастания. Показано, что эффекты стимуляции прорастания семян пшеницы под действием ЭМП-обработки зависят от степени растяжения мембран при набухании семян в растворах сахарозы, что находится в соответствии с предложенным механизмом. Длительное воздействие ЭМП в ходе набухания семян приводит не только к торможению роста проростков, но и к падению их всхожести, достигающему двух раз у семян с низкой всхожестью. Это связывается с десинхронизацией процессов роста за счет стимуляции высвобождения и торможения связывания белков. Такие процессы могут приводить к состоянию повышенной возбудимости в клетках и одновременно к повышенной нагрузке на организм, что способно объяснить эффекты влияния периодов высокой солнечной активности на состояние организмов, в том числе на явления творческого и социального характера. С активацией метаболических процессов у носителей болезней могут быть связаны вспышки различных заболеваний в эти периоды. Повышенная возбудимость объясняет и беспокойство ряда животных при магнитных бурях, возникающих как предвестники землетрясений.

Введение

Проблема воздействия слабых электромагнитных полей (ЭМП) на биологические процессы со времени работ Чижевского А.Л. по влиянию солнечной активности на состояние организмов и другие явления /35,36/,

уже многие годы обсуждается в литературе /13, 14, 19, 31, 40, 41, 43, 55 и др./ . Однако, несмотря на большое число данных об активном влиянии слабых ЭМП на биологические процессы, данная проблема, если исключить спиновые эффекты /13, 14, 15/, все еще остается дискуссионной. Это связано с отсутствием реальных физико-химических механизмов, которые могли бы объяснить как чувствительность клетки к столь слабым по энергии воздействиям, так и необычный характер наблюдаемых под влиянием ЭМП зависимостей. Особенно много вопросов вызывают биологические эффекты ЭМП низких частот. В результате создается мнение вплоть до того, что, по заключению ведущего американского физического журнала *Physical Review A* ((1991) Vol. 43, P. 1039), «*любые биологические эффекты слабых низкочастотных полей на клеточном уровне должны находиться вне рамок традиционной физики.*» (цит. по /13/).

Подобные сомнения обусловлены не только практическим отсутствием в литературе сведений о возможных путях преобразования в клетке весьма низкой энергии таких полей в биологически значимый ответ. Например, в случае эффектов магнитных бурь на Солнце напряженность электрических полей, создаваемых в земной атмосфере, на 6–7 порядков ниже напряженности поля на мембране. Отсутствует также связь между энергией воздействия и наблюдаемыми биологическими эффектами, включая даже их уменьшение при росте амплитуды ЭМП /31, 40, 41, 43/. Вызывает вопросы и разноречивость приводимых в литературе результатов, когда, по данным одних авторов, ЭМП стимулирует развитие патологических процессов, тогда как другие авторы используют ЭМП для лечения таких же заболеваний /13, 40, 43/. Ряд вопросов относится и к наличию корреляции между геомагнитной активностью и проявлениями различных болезней /17, 35, 36 /, так как здесь нельзя исключить, что подобная связь имеет не прямой, а опосредованный характер. В еще большей степени это относится к связи такой активности с явлениями социального характера /35, 36/, что трудно представить в рамках представлений традиционной физики.

И тем не менее анализ полученных ранее данных и результаты выполненных нами экспериментов приводят к выводу, что наблюдаемые необычные закономерности не противоречат представлениям традиционной физики. Рассматриваемый далее механизм воздействия ЭМП низких частот на биологические процессы позволяет подойти к объяснению основных характеристик отмеченных выше явлений, не выходя за рамки физико-химических представлений.

Постановка задачи

Вопрос о механизмах нетеплового воздействия ЭМП низких частот на различные процессы в организмах занимает важное место в общей проблеме взаимодействия ЭМП с живыми системами. Его актуальность опре-

деляется тем, что к этой области относятся частоты ЭМП в линиях электропередачи, в различных промышленных установках и в бытовых приборах, а также частоты геомагнитных и космофизических флуктуаций, под воздействием которых находится широкий круг биологических объектов. К той же области частот относят поля, которые регистрируют в качестве предвестников землетрясений, и возможно, что именно на них реагируют отдельные виды животных. В том же диапазоне находятся частоты модуляции, заметно усиливающей эффекты ЭМП высоких частот /27, 31, 41, 43/. Здесь еще раз следует подчеркнуть, что с влиянием ЭМП низких частот, возникающих при магнитных бурях на Солнце, связывают не только биологические эффекты, но и явления социального характера /35, 36/.

Для объяснения необычной зависимости эффектов ЭМП в организмах от их частоты и амплитуды необходимо, с одной стороны, чтобы в клетке существовали механизмы, обеспечивающие усиление столь слабых воздействий за счет различных нелинейных процессов, а также их локализацию вблизи структур, чувствительных к таким эффектам. С другой стороны, в клетке должны происходить процессы, которые могли бы ограничить или ослабить воздействие ЭМП при росте его амплитуды. Эти задачи не были решены в моделях, связывающих эффекты ЭМП в организмах с их воздействием на некоторые характеристики мембран /47, 48/. Здесь нельзя не учитывать, что наводимые извне поля не только несопоставимы с напряженностью поля на мембране, но и намного ниже уровня ее шумов.

Принципиально другие возможности возникают при рассмотрении вызванных переменным ЭМП нестационарных процессов в примембранном слое, которые будут происходить в случае, когда ионы под действием ЭДС, наводимой этим полем внутри клетки, проходят за период лишь часть расстояния между клеточными мембранами /4–7, 39/. Такие условия, в частности, соблюдаются для полей и частот геомагнитных флуктуаций. По данным для подвижности ионов K^+ в воде при $18^\circ C$ $\nu=64$ ом см/г экв /49/ имеем, что при обычных для таких флуктуаций частотах $f = 0,1$ Гц и ниже и напряженности поля $E = 1-10$ в/м ионы K^+ проходят за период ЭМП порядка 1 мкм, что меньше размера клетки, но сопоставимо с ним. В случае промышленных частот такое же расстояние за период ЭМП ионы проходят при значениях напряженности поля E на 3 порядка более высоких, и именно здесь отмечены биологические эффекты /40, 41, 43/.

При соблюдении указанных выше условий периодическое движение ионов в неоднородной среде клетки должно приводить к различным нелинейным эффектам и к появлению градиента концентрации ионов в примембранном слое, чему способствует повышенная вязкость данного слоя и наличие в нем дополнительных зарядовых взаимодействий. Возможность нелинейных эффектов ЭМП на уровне клетки следует из данных математического моделирования /28, 29, 33, 34, 51/. В частности, за

счет трансмембранного селективного обмена ионов (из-за резких различий концентрации ионов Na^+ , K^+ и Ca^{++} по разные стороны мембраны) может измениться и величина pH в этом слое, причем подобные эффекты относятся именно к случаю слабых ЭМП низких частот /34, 51/. В свою очередь, изменения в примембранном слое должны влиять на переходы слабосвязанных периферических белков в воду или обратно. Последнее основано на учете эффектов динамической структуры белков, в результате чего переходы белков из связанного состояния в воду и обратно, из-за изменения большого числа степеней свободы и соответственно энтропии системы, связаны с малым изменением свободной энергии /1, 2, 37, 38/. Более длительное воздействие за период ЭМП низких частот по сравнению с высокими частотами позволяет рассчитывать и на появление за его период достаточно больших тепловых флуктуаций, необходимых для преодоления активационного барьера для таких переходов.

При воздействии же более сильных внешних ЭМП ионы успевают преодолеть все расстояние между мембранами. Этот случай приводит к стационарному распределению индуцируемых извне напряжений, в соответствии с сопротивлением участков цепи. Тогда практически все такое напряжение будет падать на мембране, где оно составит лишь малую долю от уровня мембранных шумов. В рассмотренном же выше варианте – нестационарного случая слабых полей, напряжение, индуцируемое внешним полем, распределяется по объему клетки и там его относительная доля значительно выше, чем на мембране, причем здесь важную роль играет более высокая проводимость растворов ионов по сравнению с мембраной. Это должно приводить и к более заметному влиянию даже слабых полей на ионный ток /4–7, 39/.

Таким образом, учет нестационарных процессов, связанных с движением ионов в клетке, в принципе позволяет подойти к выявлению механизмов, определяющих необычный характер зависимости биологических эффектов от амплитуды ЭМП. При этом появление таких эффектов будет зависеть не от амплитуды, а от отношения амплитуды к частоте ЭМП, когда сверхнизким частотам соответствуют и очень малые амплитуды полей. В качестве же факторов, особенно чувствительных к воздействию ЭМП сверхнизких частот, могут служить переходы белков из связанного в свободное состояние и обратно, а также изменение pH в клетке после такой обработки. Возможны и иные эффекты. Указанные предположения были проверены экспериментально.

При постановке экспериментов учитывали, что их результаты зависят от выбора объекта для исследования. Величина ожидаемого эффекта связана с состоянием организма, которое не всегда удается контролировать, в клетках параллельно проходит множество других процессов, которые могут реагировать на ЭМП в разных направлениях, возможны другие,

не всегда учитываемые слабые воздействия и т.д., что будет приводить к снижению воспроизводимости результатов и их достоверности.

Исходя из указанных соображений для изучения эффектов ЭМП сверхнизких частот были выбраны семена пшеницы в ходе их набухания и начальных этапов прорастания. Выбор семян обусловлен тем, что их переход от состояния покоя к прорастанию на первых стадиях проходит в одном направлении – к высвобождению различных структур из связанного состояния, причем существует определенная последовательность процессов – сначала идет формирование корней и лишь затем образуются проростки /42/. Поэтому, подбирая время воздействия ЭМП на них, можно в принципе избирательно влиять на те или другие реакции. В свою очередь, различная чувствительность к ЭМП у разных процессов в ходе прорастания семян позволяет проводить дифференциальные измерения, что повышает надежность регистрации именно эффектов ЭМП. Надежность регистрации повышается и за счет измерения нескольких показателей, которые могут быть сопоставлены между собой и данными контроля. Такими показателями являются: изменение pH вблизи поверхности зародыша семян и вдали от нее, гидролитическая активность ферментов эстераз, высвобождаемых в ходе набухания семян и кинетика выхода продуктов их реакции, а также число семян с проростками и с корнями, длины проростков и другие, более косвенные биологические характеристики. Данные показатели измеряли после ЭМП-обработки на разных этапах набухания и прорастания семян и в контроле для семян нескольких сортов пшеницы, отличающихся по своей всхожести. Изучали также влияние осмотического давления в среде на наблюдаемые эффекты ЭМП-воздействия.

ЭМП-обработку проводили на магнитной мешалке ММ-5 или с помощью аппарата для низкочастотной магнитотерапии МАГ-30-3 на частотах 30-50 Гц в течение 7–15 мин в разных экспериментах или же, при изучении эффектов длительного воздействия, в течение всего срока набухания или его отдельных этапов. Значение амплитуды переменного магнитного поля H в разных опытах составляло от 10 до 30 мТ. Условия экспериментов более подробно описаны в статьях /4, 5, 6, 7, 39/.

Влияние ЭМП-обработки на активацию эстераз

Активность ферментов эстераз в ходе набухания семян пшеницы проявляется спустя несколько часов после начала набухания, когда в клетках достигнута достаточно высокая оводненность. В этом случае ферменты могут перейти из связанного на мембранах состояния в воду с соответствующим ростом их активности. Тогда же можно ожидать и повышения чувствительности данного процесса к ЭМП-обработке.

Такая картина действительно имеет место для семян сорта «Заря» с 95% всхожестью (рис. 1). Здесь каждая точка на кривых является результатом отдельного эксперимента.

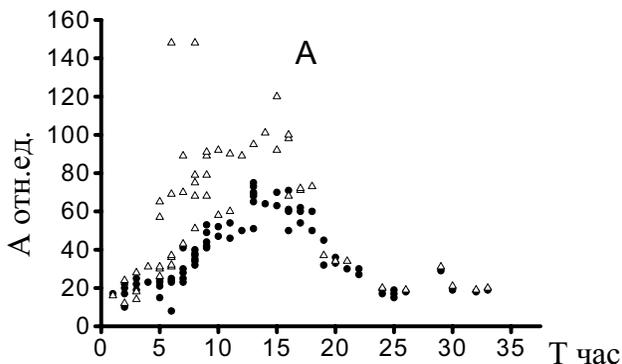


Рис. 1. Выход ФЛ из семян пшеницы сорта «Заря» с 95% всхожестью на разных стадиях их набухания в контроле (●) и после 7 мин воздействия низкочастотного ЭМП (Δ) /4/

Измерения выхода в среду продуктов гидролиза эстеразами нефлуоресцирующего соединения флуоресцеиндиацетата (ФДА) в флуоресцеин (ФЛ) показали, что в начале процесса набухания происходят сравнительно малые его изменения. Затем отмечено резкое увеличение выхода ФЛ в водную среду с максимумом между 15 ч и 18 ч набухания и последующим спадом до примерно исходного уровня. При этом различия в активности эстераз на разных стадиях набухания приводят и к различиям по чувствительности данной реакции к ЭМП-обработке. Наибольшие эффекты ЭМП у семян с высокой всхожестью зарегистрированы именно на стадии возрастания активности эстераз и вблизи ее максимума, где эффект достигал 2-х раз и более при заметном разбросе данных в различных опытах. После 11 ч набухания сильная реакция на ЭМП-обработку наблюдалась во всех опытах, а после 17–18 ч, когда отмечен спад активности, ЭМП уже слабо влияло на выход продуктов гидролиза (рис. 1) /4, 6, 39/.

Для получения дополнительных сведений о природе и особенностях процесса активации эстераз были выполнены сравнительные измерения эффектов обработки ЭМП при расположении образца семян пшеницы непосредственно на поверхности магнитной мешалки и в подвешенном на нити состоянии, чтобы исключить эффекты вибрации. Определяли также зависимость выхода продуктов гидролиза ФДА от времени обработки и, кроме того, кинетику выхода ФЛ на разных стадиях набухания.

В семенах пшеницы сорта «Инна» с 80% всхожестью положительные эффекты ЭМП обработки на выход продуктов гидролиза ФДА наблюдали в более широком интервале времен набухания, вплоть до 24 ч и более. В этом интервале и выполнены сравнительные измерения. Данные 28 опытов при расположении образца семян непосредственно на поверхности мешалки и в подвешенном вблизи нее состоянии показали, что эффект подвески составляет 0.64 ± 0.03 от суммарного эффекта. Данные других 26 опытов при подвеске образца на расстоянии 1 см и 2 см от этой поверхности составили соответственно 0.68 ± 0.05 и 0.58 ± 0.05 от полного эффекта ЭМП-обработки. Такое ослабление частично связано с уменьшением амплитуды ЭМП. Но вибрация также дает некоторый вклад. Для дополнительной оценки эффектов вибрации вращающийся магнит был заменен на близкий по форме латунный диск, и здесь в 19 проведенных опытах было получено 0.31 ± 0.05 от величины общего эффекта.

Следовательно, основной наблюдаемый эффект активации эстераз (по крайней мере около 2/3 от величины общего эффекта) обусловлен воздействием переменного ЭМП. Некоторый эффект дает и вибрация, хотя в последнем случае какой-то вклад в него может вносить поле, создаваемое вращающимся электромотором /6, 39/.

Основная роль эффектов переменного ЭМП была подтверждена и в опытах по исследованию кинетики выхода продуктов гидролиза ФДА из семян при разных временах их набухания в случаях помещения образца на подвеске или на поверхности мешалки. Измеряли также зависимость выхода ФЛ от длительности ЭМП-обработки. Обработка в течение 7 или 15 мин практически не влияла на полученные результаты. При этом более полные измерения кинетики были выполнены для 15 мин. Они и показаны на рис. 2, где каждая группа кривых соответствует различным часам набухания семян. Данные по кинетике выхода ФЛ в разных опытах сравнивали со значениями его выхода в контроле, измеренными через 50 мин после окончания отмывки семян от вышедших ранее продуктов гидролиза. Указанные значения были приняты за начало координат. Другие точки на кривых измеряли через 1 ч и через 2 ч, и они соответствуют разности между этой величиной и измеренными значениями выхода ФЛ в контроле и в опытах с воздействием поля или поля вместе с вибрацией /6, 39/.

Сравнение данных ЭМП-обработки на поверхности мешалки и на подвеске показало, что при определенных количественных различиях характер кинетики выхода ФЛ для семян с 80% всхожестью практически одинаков в обоих случаях обработки. В то же время он качественно отличается от кинетики выхода в контроле (рис. 2). В контроле при всех временах набухания (от 4 до 30 ч) кинетика выхода ФЛ имеет линейный характер. Отмечено также нарастание общего выхода ФЛ с достижением его максимума к концу первых суток набухания, т.е. несколько позднее по

сравнению с семенами 95% всхожести. Однако в обоих вариантах опытов с ЭМП-обработкой линейная кинетика выявлена лишь в течение первых 12–13 ч набухания, а в последующие часы ее характер качественно изменяется. При нарастании различий выхода ФЛ между опытом и контролем в первых по времени измерениях, затем в обоих вариантах опытов происходит замедление выхода ФЛ вплоть до того, что через 2 ч он становится ниже, чем в контроле. Характер такого замедления практически одинаков как при воздействии одного поля, так и ЭМП вместе с вибрацией. Эти данные, наряду с

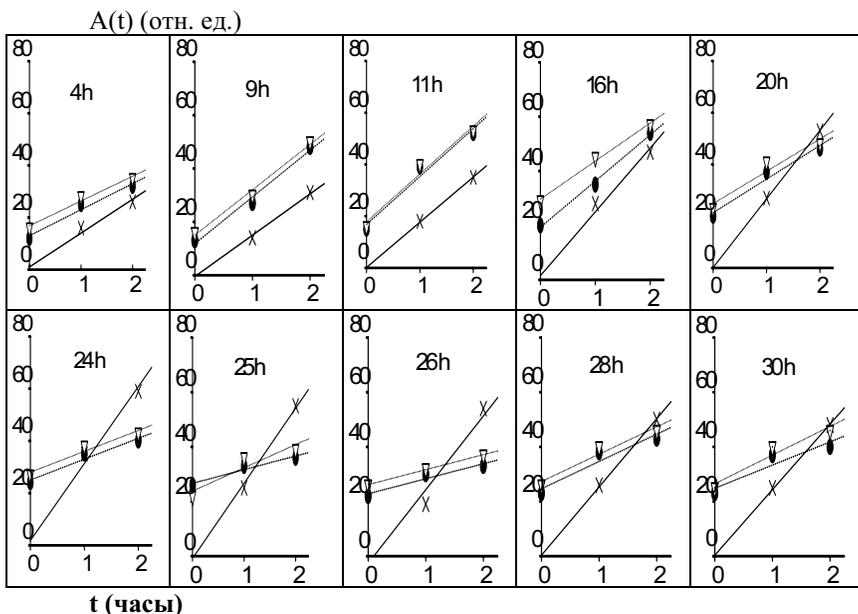


Рис. 2. Кинетика выхода ФЛ из семян пшеницы сорта «Инна» на разных стадиях их набухания в контроле (x) и после 15 мин ЭМП-обработки образца на поверхности магнитной мешалки (∇) и на подвеске (•). За нуль принято значение выхода ФЛ, измеренное через 50 мин после отмывки. Время набухания показано на диаграммах

наличием не только количественных, но и качественных различий опытных кривых по сравнению с контролем, служат еще одним доводом в пользу реальности наблюдаемых эффектов ЭМП, где решающую роль, по-видимому, играет наводимая этим полем ЭДС внутри клеток. Замедление же выхода ФЛ показывает, что на измеряемый эффект на поздних стадиях набухания, вероятно, влияет также состояние мембран, которое, в свою

очередь, изменяется под воздействием ЭМП-обработки, что подтверждается заметным увеличением всхожести и скорости прорастания семян /4/.

Следовательно, обработка семян пшеницы ЭМП низкой частоты на стадии набухания, соответствующей активации ферментов эстераз, приводит к увеличению скорости выхода ФЛ при меньшем влиянии поля на более ранних стадиях и ослаблении эффектов на последующих стадиях. Время проявления эффекта зависит от состояния семян и от их всхожести, а также от состояния мембран, на которое, в свою очередь, по-видимому, влияет и ЭМП обработка. Указанные данные находятся в соответствии с предложенным механизмом воздействия ЭМП сверхнизкой частоты – его влиянием на высвобождение слабосвязанных белков с их активацией в водной среде /6, 39/.

Влияние ЭМП-обработки на изменение рН у зародыша семян пшеницы

Дополнительные сведения о механизмах воздействия ЭМП сверхнизкой частоты дают измерения рН у поверхности зародыша семян пшеницы. На определенной стадии их набухания, помимо высвобождения связанных белков, вблизи зародыша происходят изменения рН. Они обусловлены откачкой протонов из окружающего объема для закисления внутренней среды в семенах, необходимого для их прорастания /30, 42/. рН измеряли при расположении торца микроэлектрода в 5–10 мкм от поверхности зародыша, но вне семени /50/, что исключает его влияние на изучаемые процессы.

Эксперименты, выполненные на отдельных семенах пшеницы сорта «Заря» с 95% всхожестью в течение всего срока набухания, показывают, что в первые часы набухания происходит падение рН, по-видимому, связанное с утечкой солей из семян, а затем медленное и примерно через сутки резкое нарастание значений рН вблизи зародыша (рис. 3). Начало такого нарастания рН у разных семян имеет заметный разброс и меняется в пределах нескольких часов. Данный процесс оказался достаточно чувствительным к 10 мин ЭМП-обработке на магнитной мешалке в ходе набухания семян. Но при этом реакция разных семян из-за их неоднородности оказалась весьма различной, и на ранних стадиях набухания лишь в некоторых опытах был выявлен эффект значительного ускорения изменений рН, которое происходило спустя несколько часов после ЭМП-обработки (рис. 3) /5, 6, 39/.

Поэтому для получения более полной информации о влиянии ЭМП-обработки на величину рН и получения статистически достоверного результата дальнейшие эксперименты выполняли не на отдельных семенах в течение всего срока набухания, а для партий из нескольких десятков

семян пшеницы сорта «Инна» с 80% всхожестью. Семена набухали в одном объеме и были разделены на 2 равные части непосредственно перед ЭМП-обработкой. Измеряли локальные, у каждого семени образца, и объемные значения pH после 10 мин ЭМП-обработки семян на различных стадиях набухания для опытных и контрольных образцов (по 10 семян). Результаты измерений подробно даны в статьях /5, 6, 39/.

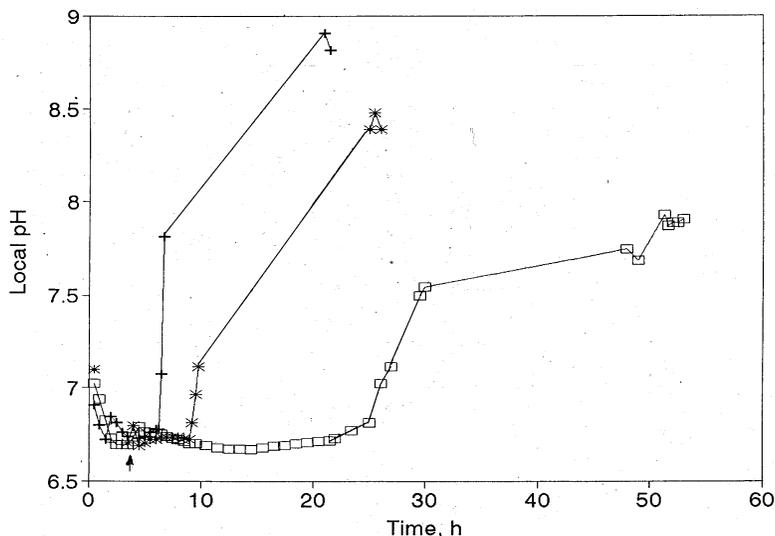


Рис. 3. Кинетика изменения pH у поверхности зародыша семян пшеницы сорта «Заря» с 95% всхожестью в ходе их набухания в контроле (□) и после 10 мин обработки полем магнитной мешалки в 2-х опытах (+) и (*). Момент воздействия показан стрелкой

Измерения показали, что в первые часы набухания происходит закисление водной среды за счет утечки солей из семян. Не отмечен и эффект ЭМП-обработки. Но уже через 13 и 14 ч набухания в контроле и в опыте наблюдается некоторый рост pH и здесь же начинают проявляться эффекты ЭМП, причем реакция отдельных семян неоднородна. ЭМП-обработка пока не влияет на объемные значения pH, в отличие от локальных значений pH, где после ЭМП обработки на этих этапах происходит постепенное нарастание отличий с контролем. Через 5 и 6 ч после окончания ЭМП-обработки они уже выходят за пределы ошибок измерений как для всего образца, так и для групп с более сильной реакцией. Но полученный эффект пока статистически не достоверен. ЭМП-обработка семян после 17 ч набухания и через 3 ч после воздействия поля еще не приводит к сколько-нибудь заметным эффектам. Но при большем сроке наблюдения

после ЭМП-обработки изменение рН на 23 ч набухания наблюдали уже не только вблизи зародыша семени пшеницы, но и в объеме в целом, хотя в последнем случае они еще невелики. При этом локальные изменения после ЭМП-обработки у 6 семян с максимальными значениями рН по сравнению с 6 подобными семенами в контроле достигают 0,4 ед. рН и выходят за пределы тройной ошибки измерений ($p < 0,02$). Наконец, измерения на 24 ч набухания после ЭМП-обработки на 20 ч и при расположении образца семян на подвеске выявили еще более заметные изменения. На этой стадии реакция семян становится более однородной. Изменения рН после ЭМП обработки происходят и вблизи зародыша, и в объеме, причем в обоих случаях они превышают 0,4 ед. рН и явно выходят за тройную ошибку ($p < 0,02$ и $p < 0,01$). При этом и абсолютные значения рН в опыте оказались заметно выше их значений в контроле, зарегистрированных спустя 1 ч после окончания измерений опытной серии /5, 6, 39/.

Следовательно, кратковременное воздействие ЭМП низкой частоты приводит к отчетливо выраженному ускорению изменений рН в процессе прорастания семян пшеницы. Такое ускорение происходит с запаздыванием на несколько часов, что может быть связано с ходом развития самого процесса, с использованием ресурсов клеточной стенки, имеющей более кислую среду (буферная емкость), с ролью щитка /30/ или с другими причинами. При этом на ранних стадиях набухания реакция разных семян весьма неоднородна, тогда как к концу первых суток такие различия сглаживаются и практически все семена становятся чувствительными к ЭМП-обработке, включая воздействие ЭМП при расположении образца семян на подвеске.

Особенности эффектов ЭМП на разных стадиях прорастания семян пшеницы

Различный характер процессов на разных стадиях набухания и прорастания семян должен определять и разную эффективность влияния ЭМП-обработки на этих стадиях, включая возможность как стимуляции, так и торможения метаболических процессов после такого воздействия. Для изучения вероятных эффектов ЭМП разного знака были выбраны семена пшеницы сорта «Инна» с 50% всхожестью. Было выполнено 50 серий опытов по 15 мин. воздействию ЭМП низких частот (аппарат МАГ-30-3, не имеющий вращающихся деталей, 50 Гц, 30 мТ) после 17 ч набухания семян, 34 серии по такому же воздействию после 24 ч набухания и 20 серий по длительному ЭМП-воздействию непрерывно в течение вторых суток набухания. Полученные данные сравнивали с результатами 59 серий в контроле, причем один или несколько контролей могли быть об-

щами для разных вариантов ЭМП-обработки, выполненных в одни и те же дни.

В таблице 1 приведено итоговое среднее распределение числа семян, имеющих проростки или корни в контроле и разных вариантах опытов. Число таких семян в различных опытах и сериях меняется в весьма широких пределах. При среднем значении около 10 всходов из 20 семян в опыте число проросших семян в разных сериях меняется от 4 до 17, а с корнями от 4 до 18 /6, 7, 39/. Все семена с проростками имеют корни, в отличие от семян с одними корнями.

Таблица 1

Средние значения числа семян пшеницы (из 20 семян), имеющих проростки и корни в контрольных образцах и в семенах после ЭМП обработки на разных стадиях набухания

Время обработки	Число семян с проростками	Различие с контролем	Число семян с корнями	Различие с контролем
Контроль	8,59 ± 0,35	–	9,59 ± 0,40	–
17 ч набухания (15 мин ЭМП)	10,32 ± 0,40	1,73 ± 0,55 (p < 0,01)	12,30 ± 0,37	2,71 ± 0,55 (p < 0,01)
24 ч набухания (15 мин ЭМП)	10,00 ± 0,52	1,41 ± 0,63 (p < 0,05)	10,44 ± 0,56	0,85 ± 0,68
В течение второго дня набухания	8,10 ± 0,73	- 0,43 ± 0,81	10,05 ± 0,68	0,46 ± 0,79

Из данных таблицы 1 следует, что ЭМП-обработка после 17 ч набухания семян пшеницы, когда у них, по-видимому, происходит формирование корней, приводит к статистически достоверному превышению числа семян с проростками ($p < 0,01$) и еще большему приросту числа семян с корнями ($p < 0,01$) по сравнению с контролем. ЭМП-обработка после 24 ч набухания вызывает меньшие эффекты, хотя и приближающиеся в случае проростков к данным для 17 ч. Но при этом эффект для корней меньше примерно в 3 раза по сравнению с эффектом для 17 ч и едва выходит за пределы разброса результатов. В то же время длительная обработка полевых семян на более поздней стадии – в течение вторых суток набухания, когда уже запущены процессы прорастания, слабо влияет на число семян с корнями, хотя и несколько снижает число семян с проростками, формируемыми позднее.

Такие же тенденции, даже более заметно выраженные, наблюдаются и для другого показателя – длины проростков, измеряемой на шестые сутки после начала набухания /6, 7, 39/. В связи с заметным разбросом длин проростков в разные дни опытов все результаты даны в относительных единицах по сравнению с выбранными в качестве опорных средними

значениями длин в контроле в те же дни. Наибольшее влияние на длину проростков оказывает ЭМП обработка после 17 ч набухания. Ускорение формирования корней влияет и на длину проростков и средняя их длина составляет $26,86 \pm 0,41$ отн. ед. по сравнению с данными в одновременно выполненных сериях для контроля $19,42 \pm 0,41$ и для 24 ч набухания $22,46 \pm 0,45$ отн. ед. Различие между данными опыта и контроля статистически достоверно ($p < 0,01$) /6, 7, 39/.

Следовательно, имеет место отчетливо выраженный стимулирующий эффект ЭМП-обработки на 17 ч набухания, далеко выходящий за пределы тройного разброса средних значений длин проростков ($p < 0,01$). Эффект ЭМП-обработки после 24 ч заметно меньше, причем здесь отмечено и более широкое распределение длин проростков, по-видимому, связанное с неоднородностью образцов семян, отличающихся по времени начала своего прорастания. Вместе с тем ЭМП-обработка в течение вторых суток набухания, когда уже наблюдается рост корней и проростков, демонстрирует не менее отчетливый эффект торможения ростовых процессов. Сравнение с данными контроля в одних и тех же сериях измерений показывает, что здесь средние значения длин проростков составляют лишь $15,04 \pm 0,62$ отн. ед., тогда как в контроле имеем $19,42 \pm 0,59$ отн. ед. Различие между этими величинами статистически значимо ($p < 0,01$) /6, 7, 39/.

Таким образом, обработка семян пшеницы ЭМП низкой частоты приводит к резко отличным эффектам на разных стадиях их набухания в ходе реализации генетической программы прорастания семян. В запуске и в реализации этой программы, несомненно, участвуют разные белки, последовательно высвобождаемые из связанного состояния и вступающие во взаимодействие с различными участками РНК и ДНК в ходе процесса набухания. Процессы высвобождения данных белков на этих стадиях, по-видимому, становятся чувствительными к ЭМП-обработке. Результатом подобных воздействий как раз и являются наблюдаемые эффекты стимуляции роста после ЭМП обработки. При этом воздействие поля на стадии формирования корней приводит к увеличению числа семян с корнями примерно на одну четверть, что, в свою очередь, стимулирует рост проростков, длина которых увеличивается на 40% по отношению к контролю. Данные эффекты проявляются заметно слабее на более поздней стадии, когда, по-видимому, происходит процесс формирования проростков. Здесь ЭМП-обработка практически влияет только на число семян с проростками и на некоторое увеличение их средней длины, причем здесь отмечается более широкий разброс данных, по-видимому, связанный с неоднородностью образцов семян, заметно отличающихся по своей всхожести и по времени начала прорастания.

Наконец, следует выделить и отчетливо выраженный эффект торможения роста проростков при длительном воздействии ЭМП на еще бо-

лее поздней стадии прорастания семян. Здесь уже происходит активный рост корней и проростков, который начинается с растяжения клеток и их последующего деления, причем в процессе деления клеток происходит как сборка, так и разборка различных надмолекулярных структур /10/. Наблюдаемый эффект торможения роста проростков при длительной ЭМП-обработке семян на данной стадии позволяет считать, что эффекты ЭМП-на процессы высвобождения и процессы связывания разных структур отличаются по своей направленности. В целом это приводит не к стимулирующему, а к тормозящему воздействию ЭМП на прорастание семян пшеницы.

Дополнительные данные о механизмах стимуляции и торможения метаболических процессов под действием ЭМП-обработки были получены при изучении эффектов растяжения мембран при набухании семян пшеницы в растворах сахарозы с разным осмотическим давлением, а также эффектов более длительного, непрерывно в течение нескольких суток, воздействия ЭМП сверхнизкой частоты на процессы прорастания семян с различной исходной всхожестью.

Эффекты ЭМП обработки семян пшеницы при их набухании в растворах сахарозы с различным осмотическим давлением

Данные эксперименты были выполнены для изучения возможных эффектов ЭМП при разной степени растяжения мембран. Здесь мы исходим из того, что по крайней мере часть белков высвобождается в ходе прорастания семян из связанного на мембранах состояния. При этом растяжение мембран в латеральном направлении должно зависеть от количества поступившей в клетки воды. Периферические белки связаны с мембраной в основном электростатическим взаимодействием с полярными группами фосфолипидов /22–24/. Обычно с белком граничит несколько десятков молекул липидов, число которых может меняться в зависимости от степени растяжения мембран. А это, в свою очередь, должно непосредственно влиять на переходы белков из связанного состояния в воду. Само же количество внутриклеточной воды зависит от наличия избыточного осмотического давления в клетках по сравнению с внешней средой. Такого избытка не будет при набухании в растворах осмотически активных веществ, в том числе сахарозы, которая сама по себе не вносит каких-либо нарушений. Но от нее будет зависеть степень растяжения мембран, что, возможно, и определяет наблюдаемое в подобных случаях снижение всхожести семян /42/. И если именно процессы высвобождения белков ограничивают процесс прорастания, то дополнительное воздействие со стороны ЭМП должно вызывать повышение всхожести семян. Данное предположение послужило основой для изучения эффектов

положение послужило основой для изучения эффектов ЭМП при набухании семян в растворах сахарозы различной концентрации /8/.

Таблица 2

Всхожесть семян пшеницы сорта «Заря» урожая 1998 г. при их набухании в растворах сахарозы с различным осмотическим давлением и ее изменение после 10 мин ЭМП-обработки через 15 ч набухания

Осмотическое давление (атм)	Число опытов	Всхожесть (из 50 семян)	Всхожесть после ЭМП-обработки	Изменение всхожести
Контроль (вода)	40	43,12±0,44	46,48±0,33	3,35±0,55
10 атмосфер	30	36,57±0,90	41,40±0,80	4,83±1,20
12,4 атмосферы	32	31,00±1,08	36,78±1,20	5,78±1,62
13,5 «	24	24,67±1,33	31,42±1,04	6,75±1,70
14,6 «	23	24,17±0,61	26,61±0,85	2,44±1,05
16,0 «	21	16,52±0,27	18,70±0,47	2,24±0,54

В таблице 2 приведены данные по изменению всхожести семян пшеницы после 10 мин ЭМП-обработки через 15 ч их набухания в воде или в растворах сахарозы с разным осмотическим давлением. Видно, что во всех случаях ЭМП-обработка приводит к повышению всхожести семян, причем в растворах сахарозы, исключая растворы с относительно высоким осмотическим давлением, наблюдаются более значительные эффекты ЭМП и более заметный разброс данных по сравнению с набуханием семян в воде. Такой разброс, как уже отмечалось, обусловлен неоднородностью образцов семян даже в пределах одной партии. В частности, в нашем случае начало прорастания семян находится в интервале примерно от 15 ч до 60 ч набухания в воде с максимумом числа проросших между 24 и 48 ч. Неоднородность семян особенно отчетливо проявляется в растворах сахарозы, для которых характерно более широкое распределение всхожести в разных опытах. Здесь, наряду с основной группой опытов, можно выделить некоторую их часть, которая заметно отличается от нее по всхожести. При осмотическом давлении 10 и 12,4 атм. доля опытов с отклонениями в сторону низкой всхожести еще невелика, тогда как в большинстве других сохраняется высокая всхожесть семян и, кроме того, они активно реагируют на ЭМП. В результате в ряде опытов всхожесть после ЭМП-обработки приближается к данным для семян, набухавших в воде. Неоднородность еще более заметно проявляется при переходе к осмотическому давлению 13,5 атм., хотя и здесь ЭМП обработка существенно влияет на прорастание семян. Дальнейшее увеличение концентрации сахарозы приводит к тому, что уже большинство семян имеет низкую всхожесть и

лишь в небольшой части опытов она сохраняется на достаточно высоком уровне. Но в целом при осмотическом давлении 14,6м. и 16 атм. прорастает менее половины семян, причем здесь наблюдается и резкое уменьшение эффектов ЭМП-обработки (табл. 2) /8/.

Следовательно, уменьшение всхожести семян пшеницы в растворах сахарозы по сравнению с водой может быть в значительной степени восстановлено путем ЭМП-обработки на стадиях высвобождения белков из связанного состояния. Это является еще одним доводом в пользу того, что именно связь белков с мембраной является лимитирующим фактором для задержки прорастания семян. Семена из-за отсутствия избыточного осмотического давления в клетках, по сравнению с внешней средой, не могут набрать необходимое количество воды. В свою очередь, из-за низкой степени растяжения мембран связь периферических белков с мембраной остается достаточно прочной и для их высвобождения необходимо дополнительное воздействие извне. Такое воздействие и оказывает ЭМП-обработка, причем ее результатом являются переходы белков из связанного состояния в воду и запуск с их помощью дальнейших процессов, необходимых для прорастания семян. При повышении же осмотического давления в среде набухания до 14,6 и 16 атм. подобное воздействие оказывается слишком слабым и здесь отмечены сравнительно небольшие эффекты ЭМП-обработки.

Таким образом, результаты изучения эффектов ЭМП обработки семян, набухающих в растворах сахарозы, находятся в хорошем соответствии с предложенным физико-химическим механизмом воздействия ЭМП низких частот на биологические процессы. Они указывают также и на один из возможных механизмов /8/ влияния тургорного давления внутри клеток на рост растений /30/.

Влияние длительного воздействия ЭМП на прорастание семян пшеницы

Другой тип эффектов ЭМП низких частот проявляется в случае более длительного, в течение нескольких суток, воздействия ЭМП на набухающие семена пшеницы с различной всхожестью. Такое воздействие может наблюдаться, например, во время магнитных бурь. Длительная стимуляция процессов высвобождения белков и торможение их связывания при ЭМП-обработке способны оказать неблагоприятное влияние на жизнедеятельность организма, особенно при наличии у него каких-либо отклонений от нормы. Здесь можно ожидать не только отмеченного выше торможения роста при повышенной метаболической активности, но и, при более длительном воздействии, также других эффектов, особенно существенных для ослабленных семян.

В таблице 3 приведены сводные результаты изучения эффектов непрерывного воздействия ЭМП-обработки на прорастание семян пшеницы с различной всхожестью. Обработку проводили в течение всех 6 суток набухания. Из этих данных следует, что длительная ЭМП-обработка приводит не только к замедлению роста проростков, но и к достоверному снижению всхожести семян, которое для семян сорта «Мироновская 808» составляет около одной пятой. Уменьшилась на одну пятую и длина проростков. В то же время для семян сорта, Инна с существенно более низкой жизнеспособностью снижение всхожести достигает двух раз и в полтора раза падает длина проростков /8/.

Таблица 3
Всхожесть и средняя длина проростков для семян различных сортов пшеницы после ЭМП-обработки семян в течение всех 6-ти суток набухания

	Всхожесть (из 50 семян)		Средняя длина проростков	
	Контроль	опыт	Контроль	опыт
«Мироновская 808»				
	38		60,2 мм	
	38	30	57,3	« 36,4
	36	28	52,6	41,7
	43	37	53,5	39,3
	37	30	53,5	44,7
	36	27	58,4	44,5
	40	34	48,0	40,5
Среднее	38,3±0,9	31,0±1,5	57,0±1,7	41,2±1,8
«Инна»				
	8	2	46,8	28,5
	10	4	40,7	27,5
	12	5	44,2	30,2
	10	5	45,1	31,0
	10	6	43,6	29,2
	12	6	44,4	33,1
Среднее	10,6±0,6	4,7±0,6	44,1±1,5	29,8±1,6

Следовательно, несмотря на стимулирующее воздействие ЭМП-обработки на ранних этапах прорастания семян пшеницы, продолжение обработки семян на последующих этапах прорастания вызывает отчетливо выраженное торможение ростовых процессов и даже значительное падение всхожести. Последнее оказалось особенно существенным для семян с низкой всхожестью /8/.

Таким образом, длительное воздействие ЭМП низких частот в течение всего срока набухания (6 суток) приводит не только к снижению скорости роста проростков, но и к общему падению всхожести. При этом семена с низкой всхожестью особенно восприимчивы к длительной обработке ЭМП и их всхожесть падает практически в 2 раза, тогда как у семян с более высокой всхожестью данный эффект составляет лишь около одной пятой. Заметно уменьшилась и длина полученных проростков. Подобный результат на фоне отчетливо выраженного стимулирующего эффекта ЭМП-обработки на ранних этапах прорастания указывает на сложный характер воздействия ЭМП, который не сводится лишь к стимуляции высвобождения и к торможению связывания белков с другими биологическими структурами. Как отмечено выше, дополнительное воздействие со стороны ЭМП способно активировать процессы и в растворах сахарозы с более высоким порогом запуска. Такая активация может привести к стимуляции также более поздних стадий развития и нарушить нормальную последовательность реакций в ходе процессов прорастания семян за счет их десинхронизации. Последнее особенно существенно при прохождении процессов морфогенеза. Кроме того, стимуляция высвобождения и торможение связывания белков должны создавать состояние повышенной возбудимости внутри клеток и в организме в целом. Должен наблюдаться и повышенный распад белков по сравнению с иммобилизованными на мембранах и других структурах состояниями белков /12/.

Обсуждение

Прежде всего, следует остановиться на достоверности наблюдаемых эффектов ЭМП низкой частоты, в которых, как было показано, решающую роль играет воздействие именно электромагнитного поля и в заметно меньшей степени вибрации. На достоверность эффектов ЭМП указывают не только значительные различия между данными опыта и контроля, отчетливо выходящие за пределы ошибок измерений, но и согласующийся с типом биологических процессов различный характер эффектов ЭМП на разных стадиях набухания и прорастания семян пшеницы. Это относится к разной чувствительности семян к ЭМП в ходе их набухания, к наличию эффектов как стимуляции, так и торможения биологических процессов, соответствующих их особенностям на разных стадиях прорастания, к качественному различию кинетики выхода продуктов реакции эстераз в контроле и в опыте после ЭМП-обработки и т.д.. Наконец, все наблюдаемые виды эффектов ЭМП сверхнизкой частоты, по крайней мере не противоречат друг другу, а также предложенному нами механизму воздействия ЭМП на живые системы и не требуют для своего объяснения каких-либо дополнительных предположений.

Полученные данные показывают, что ЭМП-обработка стимулирует активацию ферментов эстераз именно на той стадии, когда в ходе набухания семян в клетках достигнута высокая оводненность и там создаются близкие к равновесным условия для связанного и свободного состояний определенных белков. В результате на данной стадии происходит высвобождение ферментов эстераз и здесь даже слабое ЭМП воздействие, усиленное нелинейными эффектами, может стимулировать подобный процесс. Имеются данные и других авторов в пользу высвобождения белков под действием ЭМП-обработки /25/.

Связь активации эстераз с их высвобождением из связанного состояния согласуется и с данными по высокой скорости гидролиза ФДА на начальной стадии набухания старых семян /4/, когда при поступлении воды, по-видимому, происходит выход эстераз из поврежденных клеток в межклеточное пространство. С эффектами высвобождения эстераз должно быть связано и появление нового пика их активности в старых семенах со сдвигом на 10–12 ч по сравнению с семенами с высокой всхожестью, /4/ так как формирование равновесных условий в клетках старых семян должно происходить с запаздыванием, лишь после прохождения восстановительных процессов. Следует отметить и тот факт, что и в семенах с промежуточным значением всхожести максимум выхода ФЛ наблюдается также в промежуточном интервале времени набухания по сравнению с вышеупомянутыми видами семян. Косвенно с эффектами высвобождения белков, по-видимому, связано и изменение проницаемости мембранных структур после ЭМП-обработки на тех же или более поздних стадиях набухания. На этой основе объяснимо и замедление выхода ФЛ из клеток со временем после ЭМП-обработки, хотя, согласно данным измерений pH, у зародыша, скорее следовало ожидать роста выхода ФЛ из-за дополнительного закисления внутренней среды семян, наблюдаемого с некоторым запаздыванием после ЭМП-воздействия. С эффектами восстановления барьерной функции поврежденных мембран в старых семенах после ЭМП-обработки связано и падение выхода из них других веществ, которые могла бы использовать микрофлора. Это может объяснить также эффект ЭМП по заметному повышению всхожести старых семян /4/, которая в значительной степени зависит от состояния мембранных структур /3, 45, 46, 52/. Сам же механизм влияния ЭМП на барьерную функцию мембран за счет стимуляции высвобождения белков и, возможно, более сложных надмолекулярных структур, по существу, аналогичен эффекту повышения вязкости цитоплазмы. Подобное повышение вязкости наблюдают, в частности, после повреждения мембран при введении в клетку микроэлектрода, а с этим, в свою очередь, связывают залечивание возникших при этом повреждений /11, 18/. Важно отметить, что воздействие ЭМП на барьерную функцию мембран происходит именно на той стадии, когда в клетках

сформированы близкие к равновесным условия. В результате после ЭМП-обработки наблюдается увеличение выхода ФЛ с последующим его замедлением. Кроме того, на основе эффектов стимуляции высвобождения белков могут быть объяснены и результаты влияния ЭМП-обработки на число семян с корнями и с проростками, а также на длину проростков при ее применении на соответствующих стадиях набухания семян. Хотя точное время начала таких процессов неизвестно, так как регистрируют лишь более их поздние стадии, связанные с появлением уже сформированных корней и проростков из семян, тем не менее очевидно, что каждый из процессов начинается заметно раньше и что в них принимают участие определенные белки, исходно присутствующие в семенах в связанном состоянии. В ходе процесса набухания они высвобождаются из такого состояния и в это время их переходы, по-видимому, становятся чувствительными к ЭМП-обработке, причем различным временам набухания соответствуют и разные эффекты стимуляции роста корней либо проростков после ЭМП-обработки. Наряду с ними, по-видимому, высвобождаются и другие структуры, влияющие на восстановление барьерной функции мембран, что в целом при воздействии на стадии формирования корней приводит к увеличению числа семян с корнями примерно на одну четверть. Рост же корней стимулирует и процесс развития проростков из семян с увеличением их длины на 40% по сравнению с данными измерений в контроле. Эффекты ЭМП-обработки на рост корней проявляются заметно слабее на более поздней стадии, когда, по-видимому, начинается процесс формирования проростков. Здесь ЭМП-обработка практически влияет только на число семян с проростками и на некоторый прирост их средней длины, причем в этом случае отмечен более широкий разброс данных, по-видимому, связанный с неоднородностью образцов семян, отличающихся по всхожести и времени начала прорастания. Различия по времени начала прорастания могут объяснить и некоторый, хотя и статистически недостоверный, прирост числа семян с корнями при ЭМП-обработке на этой стадии.

Полностью согласуются с приведенными выше данными и результаты влияния ЭМП-обработки на прорастание семян пшеницы при их набухании в растворах сахарозы. В соответствии с механизмом такая обработка должна быть пусковым механизмом для запуска процессов прорастания, что отчетливо проявляется в уменьшении эффектов, связанных с падением всхожести в данных растворах.

Предлагаемый механизм влияния ЭМП-обработки лежит в основе и отчетливо выраженного эффекта торможения роста проростков в ходе длительного воздействия ЭМП на более поздней стадии – в течение вторых суток прорастания семян. Здесь ЭМП практически не влияет на число семян с проростками и с корнями, поскольку на этой стадии начальные процессы уже запущены и происходит активный рост тех и других. Из-

вестно, что процессы деления клеток в ходе роста включают несколько стадий, при которых происходит как сборка, так и разборка различных надмолекулярных структур /10/. Наблюдаемый эффект торможения роста проростков при длительной ЭМП-обработке семян на данной стадии прорастания позволяет считать, что влияние ЭМП на процессы сборки и разборки различных надмолекулярных структур, по-видимому, отличаются по своей направленности. В целом это может привести к нарушению синхронности прохождения процесса деления, результатом которого является не стимулирующее, а тормозящее воздействие ЭМП на прорастание семян пшеницы. Подобное тормозящее воздействие особенно отчетливо проявилось при более длительном 6-суточном воздействии ЭМП, причем его результат, как и следовало ожидать, в наибольшей степени проявился у семян с низкой всхожестью. Падение всхожести у них достигало двух раз по сравнению примерно с одной пятой у семян с более высокой всхожестью.

С предлагаемым механизмом влияния ЭМП на биологические процессы согласуется и еще один эффект – отчетливо выраженное ускорение изменений рН вблизи поверхности зародыша, а затем и в объеме в целом после такого воздействия. Данный процесс наблюдается спустя несколько часов после ЭМП-обработки и на более поздних стадиях набухания по сравнению с активацией эстераз. Подобное запаздывание может быть связано с особенностями развития процесса изменения рН, где проявляется суммарная реакция ряда клеток в разном исходном состоянии. На него может влиять и возможное использование ресурсов клеточных стенок, имеющих кислую среду, а также воздействие со стороны щитка /30/. Все это приводит к заметному разбросу данных для разных семян, особенно на сравнительно ранних стадиях набухания. Тем не менее и в данном случае процессы изменения рН происходят лишь после того, когда в клетках успели сформироваться близкие к равновесным условия и они становятся чувствительными к слабым ЭМП-воздействиям.

Наконец, следует отметить, что полученные данные по эффектам ЭМП-обработки в семенах пшеницы важны не только для понимания механизмов воздействия ЭМП на живые системы. Они могут найти применение также для изучения молекулярных и физико-химических механизмов запуска процессов прорастания на тех стадиях, когда еще не регистрируются внешние признаки их прохождения.

Наши данные о зависимости биологических эффектов от создания внутри клетки близких к равновесным условий находятся в соответствии с результатами других авторов. Эти результаты подтверждают, что биологические эффекты ЭМП сверхнизких частот чувствительны к метаболическому состоянию клетки /13, 31, 43, 53, 54/. Смещение баланса сил внутри клетки в том или ином направлении способно привести к повышению или к снижению чувствительности метаболических процессов к воздействию ЭМП.

Заключение

Таким образом, полученные нами экспериментальные данные находятся в полном соответствии с предлагаемым механизмом воздействия низкочастотного ЭМП на биологические процессы. При этом весьма слабое в каждой точке внешнее воздействие проявляется практически во всем объеме клетки, но его эффекты в конечном счете, по-видимому, локализуются в более узком примембранном слое и дополнительно усиливаются за счет различных нелинейных явлений. В результате там происходит изменение ионной силы и рН с последующим их влиянием на высвобождение белков, иммобилизованных на мембранах или других клеточных структурах. Высвобождение белков, в свою очередь, приводит к активации метаболических процессов. На основе данного физико-химического механизма удастся объяснить также парадоксальную зависимость ЭМП-эффектов в организмах, включая их чувствительность к геомагнитным и космофизическим флуктуациям и ослабление биологических эффектов с ростом амплитуды ЭМП. Этот механизм создает основу также для интерпретации биологических эффектов ЭМП промышленных частот. Такие эффекты наблюдаются при напряженности поля на три порядка более высокой по сравнению с полями геомагнитных флуктуаций, в полном соответствии с отношением частот данных ЭМП. Следовательно, нетепловые биологические эффекты ЭМП сверхнизких частот не имеют прямой связи с их энергией, которая может отличаться на несколько порядков величины на различных частотах.

Предлагаемый механизм позволяет также подойти к интерпретации как стимулирующих, так и тормозящих эффектов ЭМП низких частот. Тормозящие эффекты, особенно в случае длительного ЭМП-воздействия, являются результатом десинхронизации сложных многостадийных процессов вследствие разной направленности эффектов ЭМП на различных их стадиях – стимуляции одной стадии и торможения другой. Вместе с тем под действием ЭМП возможна также активация реакций с более высоким порогом возбуждения, что способно привести к нарушению нормальной последовательности метаболических процессов. Последнее особенно существенно для процессов морфогенеза. При этом стимуляция высвобождения белков и торможение их связывания должно создавать состояние повышенной возбудимости в организме. Подобное воздействие, особенно в случае длительных магнитных бурь и их одновременного влияния на многие организмы, может быть дополнительно усилено за счет взаимного воздействия одних организмов на другие, что создает основу для массового проявления эффектов ЭМП низких частот.

Наличие состояния повышенной возбудимости в организмах в случае длительного ЭМП-воздействия позволяет подойти на физико-хими-

ческой основе к объяснению данных Чижевского А.Л. /35, 36/ о связи периодов повышенной солнечной активности с их воздействием на организм человека и на целый ряд явлений, в том числе творческого и социального характера. «Чижевский А.Л. в книге «Физические факторы исторического процесса» /1924/ проанализировал исторические события за 2300 лет в 75 странах и пришел к выводам о том, что эмоциональная напряженность человеческих сообществ может коррелировать с солнечной активностью. В дальнейшем к аналогичным выводам пришли и зарубежные авторы, которые показали, что Золотой Век Ренессанса, Барокко, Рококо и другие наиболее известные культурные «взрывы» приходились на пики солнечной активности. До сих пор считают, что наиболее мощный культурный «взрыв» имел место в эпоху Возрождения, когда за одно десятилетие на единице площади рождалось гениев больше, чем в другие периоды за тысячелетие. В ряде работ, опубликованных за последние 30 лет, был проведен анализ закономерностей появления выдающихся произведений живописи и поэзии, а также научных открытий за период 1400–1800 гг. Показано наличие периодичности творческой активности в западно-европейской и китайской живописи, поэзии и науке. Как правило, пики творчества в Китае соответствовали европейским» (цит. по /32/). Все эти данные полностью согласуются с предположением о наличии в организмах состояния повышенной возбудимости и возможности его массового проявления при длительном воздействии магнитных бурь.

Вместе с тем повышенная возбудимость организмов под влиянием солнечной активности может приводить и к другим, не всегда желательным результатам. Корреляция с активностью Солнца имеет место для ряда социальных явлений и во 2-ой половине 20 века, где можно отметить резкую активацию массовых движений и военных действий в периоды повышенной солнечной активности (табл. 4). Данные таблицы 4 следует сопоставить также с результатами Чижевского, который на основе анализа исторически важных событий за 500 лет наблюдений (с XV по XIX век (революции, войны, различные массовые движения и т.д.)) показал, что 60% таких событий происходит в пределах трехлетнего интервала вблизи максимума солнечной активности внутри 11-летнего цикла, тогда на 3 года спокойного солнца приходится лишь 5% подобных событий /36/.

В те же периоды отмечен заметный рост числа публикаций в русскоязычной прессе о неопознанных летающих объектах (НЛО) (табл. 5) /16/, что в принципе, хотя и не во всех случаях, может быть объяснено за счет эффектов повышенной возбудимости наблюдателей.

Наконец, повышенная возбудимость организмов под воздействием ЭМП сверхнизких частот, возникающих в качестве предвестников землетрясений, может объяснить чувствительность некоторых видов животных, особенно обитающих в земле, к данным природным явлениям.

Таблица 4

Влияние солнечной активности на различные события в международной жизни после Второй мировой войны

Максимумы активности	СОБЫТИЯ
1956–57 г.г.	События в Венгрии и Польше Суэцкий кризис
1967–68 гг.	Арабо-израильская война События в Чехословакии
1979–80 гг.	Исламская революция в Иране Начало войны в Афганистане Начало войны Ирака с Ираном
1990–91 гг.	События в СССР, Румынии, ГДР Война Ирака с Кувейтом Начало войн в Югославии
2000–2002 гг.	Бомбардировки Югославии Активизация терроризма Война США против Афганистана Война США и Англии против Ирака

Таблица 5

Распределение частот упоминаний об НЛО в русскоязычной периодике /16/

Максимумы числа упоминаний	1966–1973 г.г.
	1978–1980 г.г.
	1989–1992 г.г.
	1999–2002 г.г.

Имеется и еще одна сторона воздействия ЭМП низких частот. Повышенная возбудимость в периоды магнитных бурь на Солнце создает, наряду с активацией метаболических процессов, также повышенную нагрузку на организм. С этим фактором, по-видимому, связано обострение различных заболеваний в такие периоды, что отмечалось многими авторами /13, 17, 19, 35, 36/. Одновременно здесь необходимо учитывать и возможность проявления повышенной активности самих носителей заболеваний под действием ЭМП, что может дополнительно усилить их воздействие.

Таким образом, предложенный механизм воздействия ЭМП и результаты наших экспериментов позволяют объяснить, на физико-химической основе практически все имеющиеся противоречия и парадоксы биологических эффектов ЭМП низких и сверхнизких частот. Это относится к отсутствию непосредственной связи между наблюдаемым эффек-

том и энергией поля, включая ослабление эффектов при росте амплитуды ЭМП и чувствительность организмов к воздействию геомагнитных флуктуаций и магнитным бурь на Солнце. Находит объяснение и воздействие ЭМП промышленных частот при напряженности на 3 порядка более высокой. Не противоречит данному механизму и наблюдение эффектов разного знака, когда возможна стимуляция или десинхронизация хода метаболических реакций. Такие различия определяются состоянием организма и типом проходящих в нем процессов. Существенное влияние здесь оказывает и длительность воздействия ЭМП. Все эти результаты не противоречат представлениям традиционной физики и не требуют участия каких-либо неизвестных нам факторов.

Переходы белков из связанного на мембранах состояния в воду и обратно должны играть роль и при рассмотрении эффектов других более высокочастотных диапазонов ЭМП, в частности, крайне высоких частот (КВЧ), относящихся к миллиметровому диапазону длин волн /20, 21, 44/. Но здесь в качестве действующего фактора, влияющего на такие переходы, должно выступать не изменение ионной силы в примембранном слое, а изменение состояния воды, поскольку в данном диапазоне находится максимум поглощения дипольных моментов ее молекул. При этом достаточно изменения вклада со стороны водного компонента в пределах до 10 ккал/моль при общей энергии гидратации на макромолекулу белка 10^3 – 10^4 ккал/моль.

Литература

1. Аксенов С.И. (1985) Роль воды в процессах функционирования биологических структур и в их регулировании // Биофизика. Т. 30. С. 220-223.
2. Аксенов С.И. (1990) Вода и ее роль в регуляции биологических процессов. М., Наука, 118 с.
3. Аксенов С.И., Головина Е.А, Грунина Т.Ю (1990) Методы ЯМР и ЭПР-томографии в исследовании распределения и состояния воды в семенах злаков // Физиология семян. Формирование, прорастание, прикладные аспекты. Душанбе, С. 251-262
4. Аксенов С.И., Бульчев А.А., Грунина Т.Ю., Туровецкий В.Б. (1996) Механизмы воздействия низкочастотного магнитного поля на начальные стадии прорастания семян пшеницы. Биофизика Т. 41, С. 931-937,
5. Аксенов С.И., Бульчев А.А., Грунина Т.Ю., Туровецкий В.Б. (2000) Влияние низкочастотного магнитного поля на активность эстераз и изменение рН у зародыша в ходе набухания семян пшеницы // Биофизика Т. 45, С. 737-745

6. Аксенов С.И., Булычев А.А., Грунина Т.Ю., Горячев С.Н., Туровецкий В.Б. (2000а) Эффекты и возможные механизмы воздействия ЭМП сверхнизких частот на семена пшеницы на различных стадиях их набухания и прорастания // Исследовано в России (электронный журнал). 13, С. 179-198
7. Аксенов С.И., Грунина Т.Ю., Горячев С.Н., (2001) Особенности влияния низкочастотного магнитного поля на набухание семян пшеницы на различных стадиях // Биофизика Т. 46, С. 1117-1123
8. Аксенов С.И., Грунина Т.Ю., Горячев С.Н. (2004) О механизмах стимуляции и торможения при прорастании семян пшеницы в ЭМП сверхнизкой частоты // Биофизика (в печати)
9. Аксенов С.И., Швалева А.Л., (2000) Состояние мембран при разной влажности и начальных этапах гидратации семян и осевых органов *Triticum aestivium* // Известия РАН (сер. биол.) N 4, С. 452-460
10. Албертс Б., Брей Д., Льюис Дж., Рэфф М., Робертс К., Уотсон Дж. (1987) Молекулярная биология клетки. М., Мир. т. 4,
11. Александров В.Я. (1985) Реактивность клеток и белки. Л.: Наука, 318 с.
12. Березин И.В., ред. (1983) Химическая энзимология... М.: Химия, 278 с
13. Бинги В.Н. (2002) Магнитобиология, Эксперименты и модели, М., ИОФАН, 592 с.
14. Бинги, В.Н., Савин А.В (2003) Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы, Успехи физических наук, Т. 173, С. 265-300.
15. Бучаченко А.Л., Сагдеев Р.З., Салихов К.М. (1978) Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. Новосибирск, Наука, 294 с.
16. Ваганов А. (2003) Весна. Война. НЛЮ // Независимая газета, приложение НГ - наука. август
17. Владимирский Б.М., Сидякин В.Г., Темурянц Н.А., Макеев В.В., Самохвалов В.П. (1996) Космос и биологические ритмы, Гелиоритм, Симферополь, 206 с.
18. Гейльбрун Л. (1957) Динамика живой протоплазмы. М.: Изд-во иностр. лит., 346 с. .
19. Гневашев М.Н., Оль А.И, ред. (1982) Влияние солнечной активности на биосферу. // Проблемы космической биологии. М. Наука, Т. 15
20. Девятков Н.Д. (1978), Взаимодействие миллиметрового излучения с биологически активными соединениями и полярными жидкостями // Радиотехника и электроника N 9, С. 1882-1890.
21. Девятков Н.Д., Голант М.У., Бецкий О.В. (1991) Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. М., Радио и связь, 168 с.
22. Ивков В.Г., Берестовский Г.Н. (1981) Динамическая структура липидного бислоя. М.: Наука, 293 с.

23. Ивков В.Г., Берестовский Г.Н. (1982). Липидный бислой биологических мембран. М.: Наука, 224 с.
24. Кагава Я. (1985) Биомембраны. М.: Высшая школа, 303 с.
25. Логинов В.А. (1991) Изменение заряда эритроцитарной мембраны при обработке импульсным магнитным полем. // Биофизика Т. 36, С. 614-620,
26. Мирошниченко Л.И. (1981) Солнечная активность и Земля. М., Наука, 1981.
27. Огай В.Б., Новоселова Е.Г., Фесенко Е.Е (2003) Исследование влияния низкоинтенсивного электромагнитного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов на пролиферативную и цитотоксическую активность лимфоцитов селезенки мышей // Биофизика, Т. 48, С. 511-520.
28. Плюснина Т.Ю., Ризниченко Г.Ю (1996) Типы нелинейного поведения системы переноса ионов через мембрану при слабом воздействии электрического поля // Биофизика Т. 41, С. 939-943.
29. Плюснина Т.Ю., Ризниченко Г.Ю., Аксенов С.И., Черняков Г.М. (1994) Влияние слабого электрического воздействия на триггерную систему трансмембранного ионного переноса // Биофизика Т. 39, С. 345–360.
30. Полевой В.В. (1989) Физиология растений. М., Высшая школа, 464 с.
31. Пресман А.С. (1968) Электромагнитные поля и живая природа . М., Наука, 288 с.
32. Реутов В.П., Сорокина Е.Г., Косицын Н.С., Охотин В.Е (2003) Проблема оксида азота в биологии и медицине и принцип цикличности. М., УРСС, 94 с.
33. Ризниченко Г.Ю., Плюснина Т.Ю (1996) Нелинейная организация субклеточных систем – условие отклика на слабые электромагнитные воздействия // Биофизика Т. 41, С. 428-432.
34. Ризниченко Г.Ю., Плюснина Т.Ю., Воробьева Т.Н., Аксенов С.И., Черняков Г.М. (1993) Модель ответа системы мембранного транспорта на переменное электрическое поле // Биофизика Т. 38, 667-671.
35. Чижевский А.Л. (1924) Физические факторы исторического процесса. Калуга.
36. Чижевский А.Л. (1976) Земное эхо солнечных бурь, М., Мысль, 366 с.
37. Aksyonov S.I. (1986). The role of water in the regulation of biological processes // Studia. biophysica. Vol. 111. P. 155-158.
38. Aksyonov S.I. (1990) Dynamic character of stability of biological systems and effect of water on it // Studia biophysica Vol. 136, P. 117-132
39. Aksyonov S.I., Bulychev A.A., Grunina T.Yu., Goryachev S.N., Turovet-sky V.B. (2001) Effects of ELF-EMF treatment on wheat at different stages of germination and possible mechanisms of their origin // Electro- and

Magnetobiology Vol. 20, P. 231-253

40. Berg H. (1995) Possibility and problems of low frequency weak electromagnetic fields in cell biology // *Bioelectrochem. Bioenerg.* Vol. 38, P. 153-159
41. Bersani F. editor (1999) *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine.* Kluwer/Plenum, London.
42. Bewley J.D., Black M. (1978.) *Physiology and Biochemistry of Seeds in Relation to Germination.* Vol. 1. Development, Germination and Growth, Springer Verlag, New York, Berlin,
43. Blank M., editor, (1993) *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine,* San Francisco Univ. Press, San Francisco, CA,
44. Gapeev A.B., Yakushina v.S., Chemeris N.K., Fesenko E.E. (1998) Modification of production of reactive oxygen species in mouse peritoneal neutrofiles on exposure to low-intensity modulated millimeter wave radiation. // *Bioelectrochem. Bioenerg.* Vol.46, P. 267-272,
45. Golovina E.A., Tikhonov A.N. (1994) The structural difference between the embryos of viable and non-viable wheat seeds as studied with the EPR spectroscopy of lipid-soluble spin lable. // *Biochim. Biophys. Acta* Vol. 1190, P. 385-392.
46. Hoekstra F.A., Crowe J.H., Crowe L.M. (1989) Membrane behavior in drought and its physiological significance, // In: *Recent Advance in the Development and Germination of Seeds.* Ed. Taylorson R.V., Plenum Press, N.Y., , P. 77-88.
47. Liu D.S., Astumian R.D., Tsong T.Y. (1990) Activation of Na and K pumping modes of (Na,K) ATPase by an oscillating electric field. // *J. Biol. Chem.* Vol. 265, P. 7260-7267.
48. Markin V.S., Liu D., Gisma J., Strobel R., Rosenberg M.D., Isong T.Y. (1992) Ion channel enzyme in oscillating electric field // *J. Membrane. Biol.* Vol. 126, P. 137-145.
49. Moelwyn-Hughes E.A. (1961) *Physical Chemistry,* Pergamon Press, London, New York, Paris.
50. Remish D., Bulychev A.A., Kurella G.A. (1986) The electrical and chemical components of the protonmotive force in chloroplast as measured with capillary and pH-sensitive microelectrodes // *Biochim. Biophys. Acta* Vol. 852, P. 68-73.
51. Riznichenko G.Yu., Plusnina T.Yu., Aksyonov S.I., (1994) Modelling of the effect of a weak electric field on a nonlinear transmembrane ion transfer system. // *Bioelectrochem. Bioenerg.* Vol. 35, P. 39-47.
52. Smirnov A.I., Golovina H.A., Yakimchenko O.E., Aksyonov S.I., Lebedev Ya.S. (1992) In vivo seed investigation by electron paramagnetic resonance spin probe technique // *J. Plant Physiol.* Vol. 140, P. 447-452
53. Tiunistra R., Goodman E.M., Greenbaum B. (1998) Protein kinase C activ-

- ity in HL60 cells following exposure to magnetic fields and phorbol ester.
// Bioelectromagnetics Vol. 19, P. 469–476.
54. Walleczek J., Liburdy R.P. (1990) Nonthermal 60 Hz sinusoidal magnetic field exposure enhances Ca uptake in rat thymocytes. Dependence on nitrogen activation. // FEBS Letters Vol. 271, P. 157–160.
55. Warnke U. (1992) Survey of some working mechanisms of pulsating electromagnetic fields.// Bioelectrochem. Bioenerg. Vol. 27, P. 317–325.