

ВЛИЯНИЕ КРАЙНЕ СЛАБЫХ ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ГРАВИТРОПИЗМ РАСТЕНИЙ

© 2001 г. Н.А. Белова, В.В. Леднев

Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, 142290, Пушкино Московской области;

Институт фундаментальных проблем биологии РАН, 142290, Пушкино Московской области

Поступила в редакцию 06.06.2000 г.

После доработки 25.09.2000 г.

Установлена возможность существенного изменения скорости гравитропической реакции в апикальных сегментах, вырезанных из 4-дневных проростков льна *Linum bienne*, при воздействии на них комбинированных магнитных полей (КМП) двух принципиально различных типов: 1) КМП, настроенного на параметрический резонанс для Ca^{2+} ; 2) КМП с крайне малыми величинами магнитной индукции переменной компоненты (в пределах от 10^{-6} до 10^{-10} Тл). Полученные данные свидетельствуют о существовании, по крайней мере, двух различных механизмов воздействия КМП на гравитропизм растений. Один из них соответствует ионному параметрическому резонансу, относительно хорошо изученному в экспериментах с использованием тест-систем животного происхождения. Природа биоэффектов, индуцируемых КМП с крайне слабыми амплитудами переменной компоненты магнитного поля, остается неясной.

Ключевые слова: гравитропизм, лен *Linum bienne*, Ca^{2+} -кальмодулинзависимые киназы, комбинированные магнитные поля, магнитный параметрический резонанс в биосистемах.

Ранее мы показали, что экспонирование отрезков стеблей проса, льна и клевера в слабых комбинированных магнитных полях (КМП), настроенных на параметрический резонанс для Ca^{2+} или K^+ , сопровождается соответственно активацией или ингибированием гравитропической реакции растений [1]. В этих экспериментах мы использовали КМП, составленное из коллинеарно направленных постоянной и переменной компонент: в качестве постоянной компоненты использовали постоянное магнитное поле Земли, а переменную (синусоидальную) компоненту создавали с помощью катушки Гельмгольца. Как известно, величина биоэффекта p при использовании режима параметрического резонанса для иона данного типа определяется соотношением [2]:

$$p = J_1^2(B_{AC}/B_{DC}), \quad (1)$$

т.е. квадратом функции Бесселя первого порядка, аргументом которой служит отношение величин магнитной индукции переменной (синусоидальной) и постоянной компонент. Справедливость соотношения (1) была подтверждена

экспериментально с использованием тест-систем как животного [3,4], так и растительного происхождения [5].

Квадрат функции Бесселя первого порядка имеет максимальное значение, p_{max} , при значении $B_{AC}/B_{DC} = 1,84$, в то время как при уменьшении аргумента B_{AC}/B_{DC} величина этой функции и соответственно величина определяемого ею эффекта снижается до значений, меньших ошибки эксперимента. При значениях $B_{AC}/B_{DC} = 0,2$ теоретически ожидаемая величина биоэффекта составляет примерно $0,03p_{max}$. Таким образом, если при $B_{AC}/B_{DC} = 1,84$ максимальный эффект КМП составляет 50% относительно контроля, то ожидаемая величина эффекта при $B_{AC}/B_{DC} = 0,2$ будет равна лишь 1,5%. Эта величина для большинства биологических тест-систем значительно ниже ошибки эксперимента. Поэтому при экспериментальной проверке зависимости величин биоэффекта от соотношения B_{AC}/B_{DC} , как правило, используют значения $B_{AC}/B_{DC} \geq 0,5$ [3–5].

Однако имеется ряд сообщений, свидетельствующих о том, что крайне слабые переменные магнитные поля (КС ПемП), с величинами магнитной индукции, находящимися в интервале $10^{-10} - 10^{-6}$ Тл, что соответствует значениям

Сокращения: КМП – комбинированные магнитные поля, КС ПемП – крайне слабые переменные магнитные поля.

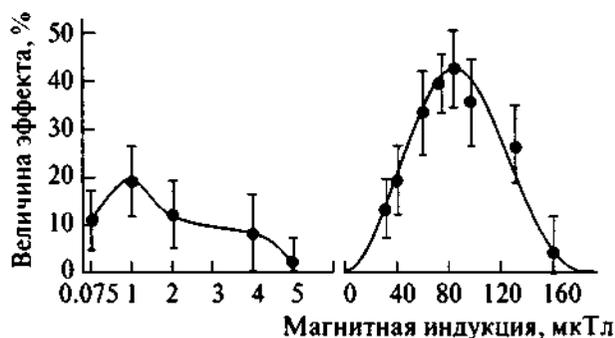
$2 \cdot 10^{-6} < V_{AC}/V_{DC} < 2 \cdot 10^{-2}$, также вызывают статистически достоверные изменения в биосистемах различных типов [6]. В абсолютном большинстве случаев эксперименты с КС ПеМП выполнялись на фоне постоянного магнитного поля Земли. При этом наличие постоянной компоненты земного поля может быть необходимым для биологической эффективности КС ПеМП. Поэтому очевидно, что в данном случае более правильно говорить о биоэффектах КМП с крайне слабой переменной компонентой. Тем не менее ниже термин «биоэффекты КС ПеМП» будет использоваться для краткости, а также для того, чтобы подчеркнуть отличие механизма воздействия полей этого типа на биосистемы от воздействия КМП в режиме параметрического резонанса.

В данной работе мы приводим результаты экспериментов, подтверждающих возможность существенного изменения гравитропической реакции надземных осевых органов проростков льна при воздействии на них КС ПеМП.

МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Методы получения отрезков стеблей льна *Linum bienne* и исследования их реакции на гравитропический стимул были подробно описаны нами ранее [1]. В опытах использовали верхние отрезки (сегменты) стеблей льна длиной 2,5 см с обрезанными листьями. Отрезки стеблей льна раскладывали в чашки Петри на фильтровальной бумаге, смоченной дистиллированной водой, по 20 отрезков на чашку. Положение базальных концов отрезков фиксировали, накладывая на них кольца, вырезанные из силиконового шланга. Как в «опыт», так и в «контроль» ставили по 2 чашки Петри. Величину гравитропического ответа определяли путем измерения среднего по числу отрезков угла изгиба (отклонения апикального конца отрезка от горизонтальной плоскости), $\alpha \pm \delta$, где δ стандартная ошибка средней величины. Измерения проводили через 2 ч после начала опыта с помощью транспортира. Все опыты проводили при температуре 25°C.

Данные относительно параметров использованных магнитных полей и экспериментальных условий приводятся ниже, а также в подписях под рисунком и таблицей. Детальное описание техники создания и измерения магнитных полей было представлено нами ранее [1].



Зависимости гравитропического изгиба сегментов стеблей льна от амплитуды синусоидальной компоненты КМП. В качестве постоянной компоненты КМП использовали магнитное поле Земли с величиной магнитной индукции, равной 46,5 мкТл. Частота синусоидальной компоненты поля $f_{AC} = 35,6$ Гц соответствует параметрическому резонансу для Ca^{2+} .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке представлена зависимость влияния КМП в режиме параметрического резонанса для Ca^{2+} (Ca^{2+} -КМП) на величину гравитропического изгиба отрезков стеблей льна при значениях $V_{DC} = 46,5$ мкТл, $f_{AC} = 35,8$ Гц. При значениях магнитной индукции переменной компоненты поля V_{AC} , равных 32, 42, 60, 74, 84, 98, 130 и 158 мкТл, т.е. при $V_{AC}/V_{DC} = 0,7; 0,9; 1,3; 1,6; 1,8; 2,1; 2,8; 3,4$ влияние Ca^{2+} -КМП проявляется в увеличении угла гравитропического изгиба отрезков льна. При этом зависимость величины биоэффекта от соотношения V_{AC}/V_{DC} достаточно хорошо аппроксимируется выражением (1), т.е. квадратом функции Бесселя первого порядка (кривая на рисунке справа). В соответствии с теорией, максимальная разница (примерно 42%) между средним углом изгиба в экспонированных и в контрольных образцах наблюдается при $V_{AC}/V_{DC} = 1,8$. Величина эффекта убывает по мере снижения значений V_{AC}/V_{DC} . Однако при значении $V_{AC} = 1$ мкТл, т.е. при величине соотношения $V_{AC}/V_{DC} = 0,02$, вновь наблюдается статистически достоверное увеличение угла гравитропического изгиба отрезков льна.

Таким образом, крайне слабое синусоидальное магнитное поле с величиной магнитной индукции ~ 1 мкТл (пик амплитуды) и с частотой 35,8 Гц вызывает статистически достоверное увеличение гравитропической реакции в отрезках стеблей льна. Отметим, что псевдорезонансная зависимость величины биоэффекта Ca^{2+} -КМП в области $0,07 \leq V_{AC} \leq 5,0$ мкТл (рисунки) напоминает таковую, наблюдавшуюся

Влияние крайне слабых переменных (синусоидальных) магнитных полей на величину гравитропического изгиба сегментов стеблей льна.

| Но- мер опыта | Параметры синусоидальной компоненты КМП | | Величина биоэффекта: средний угол изгиба сегмента (% от контроля) |
|---------------------|--|---------------|--|
| | B_{AC} , Тл | f_{AC} , Гц | |
| 1 | $150 \cdot 10^{-12}$ | 10,0 | + 54 ± 9 % |
| 2 | $360 \cdot 10^{-12}$ | 10,0 | + 55 ± 8 % |
| 3 | $2,0 \cdot 10^{-9}$ | 10,0 | + 42 ± 8 % |
| 4 | $4,0 \cdot 10^{-9}$ | 10,0 | + 37 ± 7 % |
| 5 | $1,0 \cdot 10^{-6}$ | 27631 | + 14 ± 6 % |
| 6 | $1,0 \cdot 10^{-6}$ | 15510 | + 19 ± 7 % |
| 7 | $85,6 \cdot 10^{-6}$ | 1980 | - 20 ± 7 % |

Примечания. 1. В качестве постоянной компоненты КМП использовали постоянное магнитное поле Земли с величиной $B_{DC} = 46,5$ мкТл, направленное коллинеарно синусоидальной компоненте. 2. С использованием каждого из 7 типов магнитного поля проводили 3–4 эксперимента при несколько отличающихся условиях (длительность экспозиции, температура и время проращивания проростков льна из семян). В каждом из экспериментов использовали по 40 сегментов стеблей как в «опыте», так и в «контроле». Приведены результаты отдельных репрезентативных экспериментов. Изменение условий опыта сопровождается изменением абсолютной величины эффекта, но не его знака.

ся авторами работы [7] при изучении влияния КМП ($B_{DC} = 35,0$ мкТл, $f_{AC} = 18$ Гц) на скорость пролиферации клеток животных в культуре. Имеется также ряд сообщений, согласно которым переменные низкочастотные (50–100 Гц) магнитные поля с величиной магнитной индукции, равной ~ 1 мкТл, вызывают нарушения развития зародышей в яйцах птиц [8], снимают ингибирующий эффект тамоксифена на рост раковых клеток в культуре [9], индуцируют активность некоторых ферментов в тканях нервной системы птичьих эмбрионов [10]. Представляется весьма вероятным, что воздействие такого рода магнитных полей на тест-системы как животного, так и растительного происхождения осуществляется по одному и тому же механизму. Анализ возможной природы механизма взаимодействия КС ПеМП с биосистемами выходит за рамки данной статьи. Заметим лишь, что данные, приведенные на рисунке, свидетельствуют о том, что биоэффекты КС ПеМП не могут быть объяснены их непосредственным воздействием на активность Ca^{2+} -зависимых ферментов согласно механизму магнитного параметрического резонанса (в био-

системах) [2]. В пользу этого утверждения свидетельствует также то, что КС ПеМП с параметрами, использованными в данной работе, замедляет скорость Ca^{2+} -независимой актомиозиновой Mg^{2+} -АТФазы в растворе (С.Л. Малышев, З.А. Подлубная, В.В. Леднев – неопубликованные данные).

Имеется ряд сообщений относительно биологических эффектов низкочастотных переменных полей с амплитудой на несколько порядков ниже 1 мкТл [6, 11–13] и об успешном использовании КС ПеМП ($B_{AC} \cong 100$ – 150 пТл, $f_{AC} \cong 5$ – 15 Гц) в терапии рассеянного склероза, а также болезней Паркинсона и Альцгеймера (см., например, обзоры [14, 15]). Результаты наших опытов, приведенные в таблице под номерами с 1 по 4, также свидетельствуют о том, что КС ПеМП с величиной магнитной индукции, составляющей всего лишь 10^{-10} – 10^{-8} Тл, вызывают статистически достоверное увеличение угла гравитропического изгиба в отрезках стеблей льна. Как абсолютная величина, так и знак эффектов сравнимы с таковыми, получаемыми при использовании Ca^{2+} -КМП.

Заметим, что в опытах 1–4 сравнимые по величине биоэффекты были получены при использовании существенно различных параметров переменной компоненты, но при сравнительно близких значениях отношения $B_{AC}f$. Учитывая эти, а также литературные данные [6, 16] можно предположить, что биологическая эффективность КС ПеМП определяется, в основном, соотношением амплитуды и частоты переменной компоненты поля, а не их абсолютными значениями. Результаты опытов 5 и 6 можно рассматривать как возможное подтверждение этого предположения. В этих опытах амплитуда и частота синусоидальной компоненты магнитного поля были увеличены на несколько порядков, по сравнению с их значениями в опытах 2 и 3, при сохранении отношения $B_{AC}f$, равным примерно $\frac{1}{36} \div \frac{1}{40}$, т.е. такого же, как и в опытах 2 и 3.

В целом результаты наших экспериментов с использованием КС ПеМП свидетельствуют о возможности непосредственного влияния естественных низкочастотных пульсаций магнитного поля Земли на биопроцессы. Возможно, в частности, что между резким увеличением амплитуды низкочастотных пульсаций магнитного поля во время магнитных бурь и обострением ряда заболеваний у людей [6] имеется не только корреляция, но и причинно-следственная связь.

Примечательно, что экспонирование сегментов стеблей льна во всех использованных нами типах полей (опыты 1–6) сопровождается биоэффектом одного и того же знака – увеличением среднего угла гравитропического изгиба сег-

ментов. Это, конечно, не означает, что экспонирование наземных органов растений в магнитных полях всегда сопровождается стимуляцией гравитропизма. Ранее, например, мы показали, что КМП, настроенное на параметрический резонанс для ионов K^+ , а также слабое постоянное магнитное поле при величинах магнитной индукции $100 < B_{DC} < 190$ мкТл вызывают ингибирование гравитропической реакции в сегментах стеблей льна [1,17]. Настройка КМП на ларморову частоту ядерных спинов водорода также сопровождается ингибированием гравитропизма – опыт 7 в таблице.

Ряд авторов полагают, что воздействие КС ПеМП на биосистемы может осуществляться за счет изменения свойств их водной компоненты [6,16,18]. Экспериментальные результаты, приведенные в данной статье, не противоречат этой гипотезе. Однако физический механизм воздействия КС ПеМП на воду и соответственно на биосистемы остается пока совершенно неясным.

Авторы выражают благодарность доктору Р. Олендорфу (Офтальмологический институт Иллинойской долины, г. Оттава, США (Illinois Valley Eye Institute, Ottawa, IL, USA)) за помощь в постановке данной работы и участие в обсуждении результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белова Н.А., Леднев В.В. // Биофизика. 2000. Т. 45, вып. 6. С. 1102–1107.
2. Леднев В.В. // Биофизика. 1996. Т. 41, вып. 1. С. 224–232.
3. Леднев В.В., Сребницкая Л.К., Ильясова Е.Н., Рождественская З.Е., Климов А.А., Белова Н.А., Тирас Х.П. // Биофизика. 1996. Т. 41, вып. 4. С. 815–825.
4. Леднев В.В., Сребницкая Л.К., Ильясова Е.Н., Рождественская З.Е., Климов А.А., Тирас Х.П. // ДАН СССР. 1996. Т. 348, № 6. С. 830–833.
5. Белова Н.А., Леднев В.В. // Биофизика. 2000. Т. 45, вып. 6. С. 1108–1111.
6. Темурьянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.Г. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. Киев: Наук. думка, 1992.
7. Fitzsimmons R.J., Smith S.D., Liboff A.R. // 2nd World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine. Abstract Book, Bologna, 1997. Abstr. G-4. P. 121.
8. Koch W.E., Koch B.A., Martin A.H., Moses G.C. // Comp. Biochem. Physiol. 1993. V. 105A. P. 617–624.
9. Harland J., Eugstrom S., Liburdy R. // Cell Biochem. Biophys. 1999. V. 31, № 3. P. 295–306.
10. Moses G.C., Martin A.H. // Biochem. Mol. Biol. Internat. 1993. V. 29. P. 757–762.
11. Новиков В.В., Швецов Ю.П., Фесенко Е.Е., Новикова Н.И. // Биофизика. 1997. Т. 42, вып. 3. С. 733.
12. Фесенко Е.Е., Новиков В.В., Швецов Ю.П. // Биофизика. 1997. Т. 42, вып. 3. С. 742.
13. Новиков В.В., Швецов Ю.П., Фесенко Е.Е. // Биофизика. 1997. Т. 42, вып. 3. С. 746.
14. Sandyc R. // J. Neurosci. 1992. V. 66, № 1–2. P. 1–15.
15. Sandyc R. // J. Neurosci. 1998. V. 93, № 3–4. P. 251–256.
16. Баранов А.Н., Киселев В.Ф., Розанов В.В., Салецкий А.М. // Авиакосмическая медицина. 1995. Т. 29, № 6. С. 45–49.
17. Белова Н.А., Леднев В.В. // Биофизика. 2001. Т. 46, вып. 1. С. 118–121.
18. Новиков В.В., Кувичкин В.В., Фесенко Е.Е. // Биофизика. 1999. Т. 44, вып. 2. С. 224–230.

Extremely Weak Alternating Magnetic Fields Affect the Gravitropic Response in Plants

N.A. Belova and V.V. Lednev

Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia

Institute of Basic Biological Problems, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia

It was shown that the rate of gravitropic response in apical segments excised from the 4-day-old seedlings of flax (*Linum bienne*) may be substantially influenced by combined magnetic fields (CMF) of two different types: 1) CMF tuned to the parametric resonance for Ca^{2+} ; 2) CMF containing extremely weak alternating component with the values of magnetic density ranging from 10^{-6} to 10^{-10} T. Our experimental data indicate that CMF affect the gravitropic response via at least two different mechanisms. The first one corresponds to the ion parametric resonance well established earlier in studies with test – systems prepared from animals. The origin of the bioeffects induced by CMF containing extremely weak alternating component remains to be established.

*Key words: gravitropism, Ca^{2+} -calmodulin-dependent kinases, flax *Linum bienne*, extremely weak alternating magnetic fields, magnetic parametric resonance in biosystems*