

## ВЛИЯНИЕ КРАЙНЕ СЛАБЫХ ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РЕГЕНЕРАЦИЮ ПЛАНАРИЙ И ГРАВИТАЦИОННУЮ РЕАКЦИЮ РАСТЕНИЙ

© 2010 г. Н.А. Белова, А.М. Ермаков, А.В. Знобищева,  
Л.К. Сребницкая, **В.В. Леднев**

Учреждение Российской академии наук Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН,  
142290, Пущино Московской области

E-mail: [belovanat@mail.ru](mailto:belovanat@mail.ru)

Поступила в редакцию 16.05.10 г.

Исследовано влияние крайне слабых переменных магнитных полей на скорость регенерации планарий и гравитропическую реакцию в отрезках стеблей льна. Показано, что величина биоэффектов зависит от значения параметра  $\gamma B_{AC}/f$ , где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение для магнитных моментов, создаваемых орбитальным движением электронов в атомах,  $B_{AC}$  и  $f$  соответственно магнитная индукция и частота переменного магнитного поля. Получены экспериментальные данные о зависимости биоэффектов крайне слабых переменных магнитных полей от амплитуды поля (в диапазоне от 30 до 500 нТл) при фиксированной частоте ( $f = 1000$  Гц) и от частоты поля (в диапазоне от 10 до 6000 Гц) при фиксированной амплитуде ( $B_{AC} = 192$  нТл). Максимальные биоэффекты указанных полей наблюдаются при значениях параметра  $\gamma B_{AC}/f = 0,9$  и  $2,75$ , «минорные» максимумы при  $\gamma B_{AC}/f = 4,5$  и  $6,1$ , в то время как при значениях параметра  $\gamma B_{AC}/f = 1,8; 3,8; 5,3; 6,7$  эффект отсутствует. Экспериментально наблюдаемые положения максимумов и минимумов биоэффектов совпадают с теоретическими предсказаниями при значении  $\gamma = 14000$  Гц/мкТл. Первичными мишенями крайне слабых переменных магнитных полей данного типа являются магнитные моменты, создаваемые орбитальным движением электронов.

*Ключевые слова:* крайне слабые переменные магнитные поля; магнитный параметрический резонанс; магнитные моменты, создаваемые орбитальным движением электронов; регенерация планарий; гравитропизм растений.

К настоящему времени в литературе имеется ряд сообщений, в которых показаны биологические эффекты крайне слабых переменных магнитных полей (КС ПеМП) с амплитудами переменной компоненты, находящимися в нанотесловом и даже пикотесловом диапазонах [1–9]. Несмотря на определенный, хотя и чрезвычайно медленный, прогресс в получении экспериментальных доказательств биологической эффективности КС ПеМП таких типов, вопрос о возможных механизмах действия этих полей остается открытым.

Ранее мы показали, что КС ПеМП с амплитудами переменной компоненты в области от 0,5 до 10 мкТл оказывают существенное влияние на свойства биологических тест-систем как животного, так и растительного происхождения, при определенных соотношениях амплитуд и частот [10–12]. Величина эффекта при

этом не зависит от абсолютных значений параметров КС ПеМП, а определяется величиной параметра  $\gamma B_{AC}/f$ , где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение для данного типа магнитного момента,  $B_{AC}$  и  $f$  – магнитная индукция и частота переменного магнитного поля соответственно [11,12]. Нами было показано, что первичными мишенями КС ПеМП в указанном диапазоне амплитуд являются спины ядер атомов водорода, для которых  $\gamma = 42,578$  Гц/мкТл [11,12] и что зависимость величины биоэффектов от параметра  $\gamma B_{AC}/f$  при этом значении  $\gamma$  носит полиэкстремальный характер: хорошо выраженные максимумы наблюдаются при  $\gamma B_{AC}/f = 0,9$  и  $2,75$  и «минорные» максимумы – при  $\gamma B_{AC}/f = 4,5$  и  $6,1$ . Биоэффекты отсутствуют при значениях параметра  $\gamma B_{AC}/f = 1,8; 3,8; 5,3; 6,7$ . Вместе с тем мы получили экспериментальные результаты, которые позволяют предположить, что спины ядер атомов водорода не единственные первичные мишени в биологической системе,

Сокращение: КС ПеМП – крайне слабые переменные магнитные поля.

способные реагировать на действие КС ПеМП. Так, в частности, мы показали, что КС ПеМП с параметрами  $B_{AC} = 640$  пТл,  $f = 10$  Гц оказывает статистически достоверное влияние на скорости регенерации планарий и гравитропического изгиба в сегментах стеблей льна [11]. Исходя из некоторого теоретического анализа, было высказано предположение, что первичной мишенью для данного поля может служить магнитный момент с гиромагнитным отношением  $\gamma = 14000$  Гц/мкТл [13]. Такое значение величины  $\gamma$  соответствует угловой скорости прецессии магнитного момента орбитальных электронов в атомах и молекулах. Нетрудно посчитать, что для поля с вышеуказанными параметрами величина  $\gamma B_{AC}/f = 0,9$ , т.е. соответствует теоретически ожидаемому максимуму биологического эффекта [13]. Мы также предполагаем, что вышеизложенные рассуждения будут справедливы и для КС ПеМП с параметрами в 100 раз большими, т.е.  $B_{AC} = 64$  нТл и  $f = 1000$  Гц. Очевидно, что для подтверждения этих гипотез необходимо было экспериментально изучить зависимость величины биоэффектов КС ПеМП от индекса модуляции  $\gamma B_{AC}/f$  при  $\gamma = 14000$  Гц/мкТл. В данной работе представлены экспериментальные результаты, свидетельствующие о зависимости величины биоэффектов от амплитуды КС ПеМП (от 10 до 500 нТл) при фиксированной частоте и от частоты КС ПеМП (от 10 до 3000 Гц) при фиксированной амплитуде поля, полученные при использовании в качестве тест-систем регенерирующих планарий *Girardia tigrina* и гравитропическую реакцию в сегментах стеблей льна *Linum bienne*.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Создание КС ПеМП.** Экспонирование тест-систем в КС ПеМП с величиной магнитной индукции,  $B_{AC}$ , осуществляли на фоне постоянного магнитного поля,  $B_{DC}$ . Переменное (синусоидальное) магнитное поле,  $B_{AC}$ , ориентировали коллинеарно вектору постоянного поля Земли. Переменную компоненту создавали с помощью катушечной пары Гельмгольца диаметром 39 см. Для подачи переменного напряжения на катушку Гельмгольца использовали генератор ГЗ-112. Контрольные тест-системы находились в постоянном МП Земли  $B_{DC} = 42,0$  мкТл. Требуемую величину магнитной индукции переменной компоненты поля задавали, используя коэффициент передачи катушки Гельмгольца, равный 10 мкТл/1 В, где 1 В – амплитуда (пик) синусоидального напряжения, подаваемого на катушку. Величина фонового переменного магнитного поля на частоте 50

Гц в месте проведения экспериментов составляла 15 нТл. Параметры КС ПеМП:  $10 < f < 6000$  Гц;  $30 \text{ нТл} < B_{AC} < 500 \text{ нТл}$ ,  $B_{DC} = 42,0$  мкТл.

**Тест-система 1. Регенерирующие плоские черви (планарии *Girardia tigrina*).** *Исследуемый биопроцесс:* скорость регенерации ампутированной головной части планарий.

*Метод регистрации эффекта КС ПеМП:* измерение площади вновь образовавшейся регенерировавшей головной части планарий с помощью метода компьютерной морфометрии.

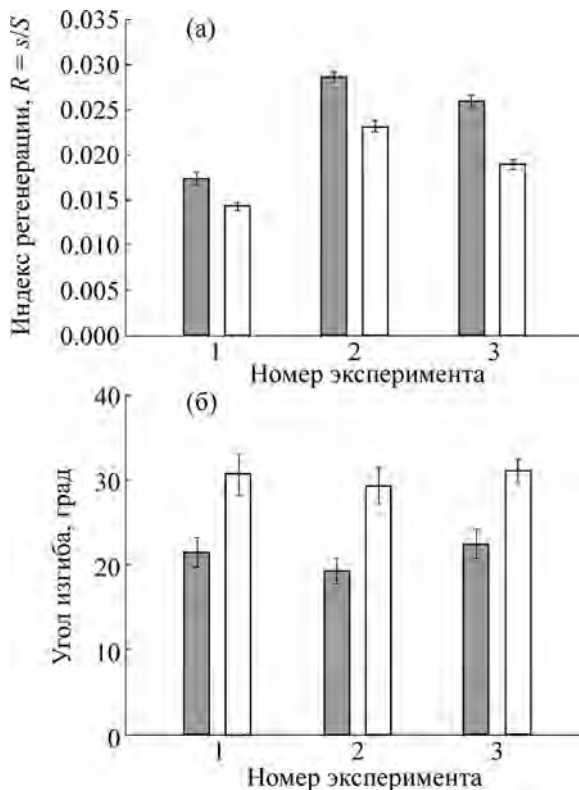
*Подготовка планарий к эксперименту.* Работа выполнена на плоских червях – планариях *Girardia tigrina* (бесполая лабораторная раса животных). Червей содержали при комнатной температуре и кормили раз в неделю личинками двукрылых. Для экспериментов отбирали особей длиной 7–8 мм и прекращали их кормление за неделю до опытов. Ампутацию головной части тела планарий проводили глазным скальпелем под бинокулярной лупой. Отсекали приблизительно 1/5 часть тела, содержащую головной ганглий, после чего регенерантов помещали в стеклянные стаканчики объемом 50 мл по 30 штук в каждый стаканчик. Один из стаканчиков помещали в центр катушки Гельмгольца (опыт), а другой в локальное геомагнитное поле Земли (контроль). Опыты проводили в интервале температуры 20–22°C.

*Морфометрический анализ регенерации.* Для измерения кинетики роста бластемы у экспериментальных и контрольных планарий использовали метод прижизненной компьютерной морфометрии, основанный на фотоконтрасте между старыми (пигментированными) и новыми (прозрачными) частями тела планарий. Каждую особь фотографировали в косом свете бинокля через трое суток после ампутации. Фотографирование животных одной группы занимало в среднем 30 мин.

Изображения регенерирующих планарий вводили в компьютер с помощью видеокамеры. В качестве количественного критерия роста использовали индекс регенерации  $R = s/S$ , где  $s$  – площадь бластемы,  $S$  – площадь всего тела планарии. Каждое из измеряемых значений  $R$  как в опыте, так и в контроле является результатом усреднения измерений на 30 животных. Величину биоэффекта поля определяли согласно выражению:

$$\Delta R(\%) = \frac{(R_o - R_k) \pm (\delta_o + \delta_k)}{R_k} 100\%,$$

где  $\delta_o$  и  $\delta_k$  – стандартные ошибки средних величин.



**Рис. 1.** Влияние КС ПеМП на регенерацию планарий (а) и на гравитропическую реакцию в отрезках стеблей льна (б): темные столбики – контроль; светлые столбики – опыт. Параметры КС ПеМП:  $B_{DC} = 42$  мкТл,  $B_{AC} = 64$  нТл,  $f = 1000$  Гц.

**Тест-система 2. Сегменты стеблей проростков льна.** *Исследуемый биопроцесс:* гравитропический изгиб апикальных участков сегментов льна, сопровождающий их поворот из вертикального в горизонтальное положение.

*Метод регистрации эффекта КС ПеМП:* измерение среднего угла изгиба апикального конца сегмента относительно горизонтальной плоскости.

*Подготовка сегментов растений.* Проростки льна (*Linum bienne*) выращивали из семян в термостате при  $26^{\circ}\text{C}$  в полной темноте в течение четырех суток в специальных растильнях. Через четверо суток стебли льна достигали длины 3–4 см. От верхушек стебля льна отрезали листья так, что отрезки содержали только апикальную часть стебля длиной 25 мм.

*Стимуляция гравитропического ответа.* Отрезки стеблей льна раскладывали в чашки Петри диаметром 90 мм на фильтровальной бумаге, смоченной 2 мл дистиллированной воды, по 20 отрезков на чашку. Положение базальных концов отрезков фиксировали, накладывая на них силиконовые кольца. Как в опыт, так и в контроль ставили по две чашки Петри. Примерно

через 30 мин горизонтально расположенные отрезки начинали изгибаться, так что через ~1–2 ч угол изгиба составлял несколько десятков градусов. Эксперименты проводили при  $25^{\circ}\text{C}$ . Величину гравитропического ответа определяли путем измерения среднего по числу отрезков угла изгиба (отклонения конца отрезка от горизонтальной плоскости)  $\alpha \pm \delta$ , где  $\delta$  – стандартная ошибка средней величины. Измерения проводили с помощью транспортера через 1 ч после начала опыта. Величину эффекта МП выражали как относительную разницу (в %) между средними углами  $\alpha_3$  и  $\alpha_k$  гравитропического изгиба сегментов, измеренных, соответственно, в опытных, т.е. экспонированных в КС ПеМП, и в контрольных образцах, согласно выражению

$$\frac{(\alpha_3 - \alpha_k) \pm (\delta_3 + \delta_k)}{\alpha_k} 100\%,$$

где  $\delta_3$  и  $\delta_k$  – стандартные ошибки средних величин углов изгиба.

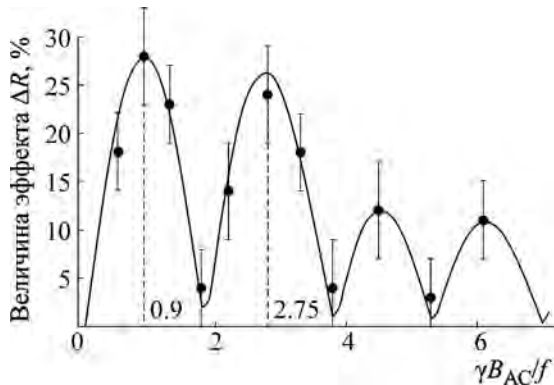
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены данные, показывающие, что КС ПеМП с параметрами  $B_{AC} = 64$  нТл и  $f = 1000$  Гц оказывает статистически достоверное ингибирование скорости регенерации планарий (рис. 1а) и статистически достоверное увеличение скорости гравитропического изгиба в отрезках стеблей льна (рис. 1б). Следует отметить, что величина биоэффекта КС ПеМП с параметрами  $B_{AC} = 64$  нТл и  $f = 1000$  Гц сопоставима с величиной биоэффекта, полученного при использовании КС ПеМП с параметрами  $B_{AC} = 640$  нТл и  $f = 10$  Гц [11]. Эти данные подтверждают предположение о том, что величина биологического эффекта КС ПеМП зависит не от абсолютных значений поля, а определяется соотношением амплитуда/частота.

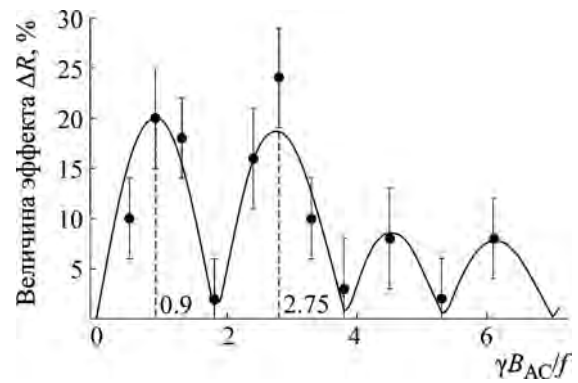
Ранее мы показали, что величина биоэффектов КС ПеМП описывается выражением:

$$I = kJ_1(\gamma B_{AC}/f)[J_2(\gamma B_{AC}/f) - J_0(\gamma B_{AC}/f)], \quad (1)$$

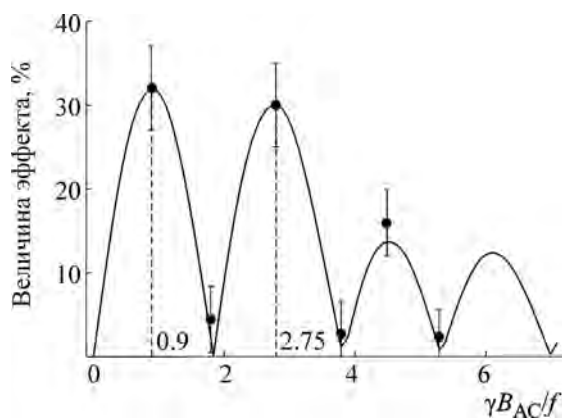
где  $k$  – константа;  $\gamma B_{AC}/f$  – аргумент функций Бесселя;  $\gamma$  – гиромагнитное отношение для данного магнитного момента;  $B_{AC}$  и  $f$  – магнитная индукция и частота переменной компоненты комбинированного магнитного поля соответственно [12,13]. Выражение (1) получено из общего уравнения, выведенного различными авторами (см., например, [14]). Следует особо отметить, что в общем случае соответствующие



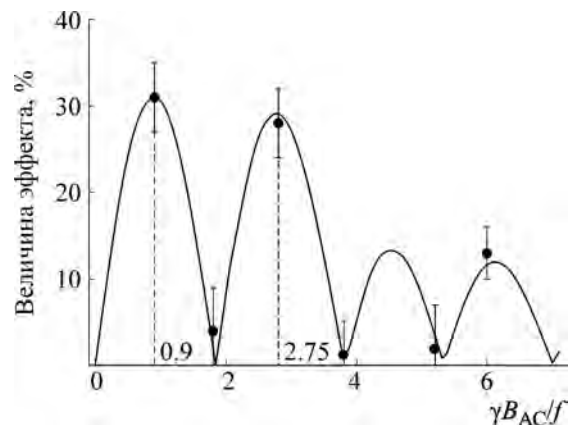
**Рис. 2.** Зависимость скорости регенерации планарий от индекса модуляции  $\gamma B_{AC}/f$ . Сплошная линия – теоретически ожидаемая зависимость. Параметры поля:  $B_{DC} = 42$  мкТл;  $f = 1000$  Гц;  $B_{AC} = 32; 64; 107; 128; 164; 192; 236; 271; 321; 379; 436$  нТл.  $\gamma B_{AC}/f_{AC} = 0,5; 0,9; 1,5; 1,8; 2,3; 2,75; 3,3; 3,8; 4,5; 5,25; 6,1$ .



**Рис. 4.** Зависимость скорости регенерации планарий от индекса модуляции  $\gamma B_{AC}/f$ . Сплошная линия – теоретически ожидаемая зависимость. Параметры поля:  $B_{DC} = 42$  мкТл;  $B_{AC} = 192$  нТл;  $f = 5376; 3000; 1792; 1500; 1168; 1000; 832; 700; 597; 518; 450$  Гц.  $\gamma B_{AC}/f_{AC} = 0,5; 0,9; 1,5; 1,8; 2,3; 2,75; 3,3; 3,8; 4,5; 5,25; 6,1$ .



**Рис. 3.** Зависимость величины гравитропического ответа в сегментах стеблей льна от индекса модуляции  $\gamma B_{AC}/f$ . Сплошная линия – теоретически ожидаемая зависимость. Параметры поля:  $B_{DC} = 42$  мкТл;  $f = 1000$  Гц;  $B_{AC} = 64; 128; 192; 271; 321; 379$  нТл.  $\gamma B_{AC}/f = 0,9; 1,8; 2,75; 3,8; 4,5; 5,25$ .



**Рис. 5.** Зависимость величины гравитропического ответа в сегментах стеблей льна от индекса модуляции  $\gamma B_{AC}/f$ . Сплошная линия – теоретически ожидаемая зависимость. Параметры поля:  $B_{DC} = 42$  мкТл;  $B_{AC} = 192$  нТл;  $f = 3000; 1500; 1000; 700; 518; 450$  Гц.  $\gamma B_{AC}/f = 0,9; 1,8; 2,75; 3,8; 5,25; 6,1$ .

физические, так же как и соответствующие биологические эффекты, индуцированные комбинированными магнитными полями с коллинарно направленными переменными (AC)- и постоянными (DC)-компонентами, включая предсказанные моделью параметрического резонанса, описываются комбинацией функций Бесселя с аргументом  $\gamma B_{AC}/f$  [12,14]. Это означает, что экспериментальные данные, а именно амплитудная и частотная зависимости эффектов, могут быть использованы для идентификации первичных мишеней, т.е. определенных магнитных моментов, на которые действуют магнитные поля. Возбуждение прецессионного движения

этих магнитных моментов, индуцированного магнитным полем, может инициировать цепочку событий, приводящих к макроскопическим флуктуациям или метаболическим изменениям, регистрируемым в конкретном эксперименте.

Как показано на рис. 2–5, выражение (1) хорошо аппроксимирует экспериментально наблюдаемые зависимости величины биоэффекта от амплитуды КС ПеМП (при фиксированной частоте  $f = 1000$  Гц) и от частоты КС ПеМП (при фиксированной амплитуде  $B_{AC} = 192$  нТл) для  $\gamma = 14000$  Гц/мкТл, соответствующей магнитным моментам, создаваемым орбитальным движением электронов в атомах. Максимальные

величины биоэффектов КС ПеМП (т.е. ингибирование скорости регенерации планарий и активацию гравитропического изгиба в отрезках стеблей льна) наблюдали при значениях параметра  $\gamma B_{AC}/f = 0,9$  и  $2,75$ , «минорные» максимумы – при  $\gamma B_{AC}/f = 4,5$  и  $6,1$ , в то время как при  $\gamma B_{AC}/f = 1,8; 3,8; 5,3; 6,7$  эффект отсутствовал. Экспериментально наблюдаемые положения максимумов и минимумов биоэффектов совпадают с теоретическими предсказаниями при значении  $\gamma = 14000$  Гц/мкТл. Отсюда следует, что первичными мишенями КС ПеМП данного типа являются магнитные моменты, создаваемые орбитальным движением электронов в атомах. Важно отметить, что описанные биоэффекты наблюдаются на фоне 50-Гц магнитного шума, амплитуда которого в десятки раз превышает амплитуду переменного поля, используемого в эксперименте.

Можно предположить, что такие закономерности будут справедливы и для других параметров КС ПеМП, например  $B_{AC} = 64$  нТл,  $f = 1$  Гц;  $B_{AC} = 32$  нТл,  $f = 0,5$  Гц и ряда других величин амплитуд и частот. Эти параметры характерны для геомагнитных пульсаций типа Pc1.

Результаты широкомасштабных эпидемиологических исследований свидетельствуют о наличии корреляции между числом вызовов скорой помощи по поводу инфаркта миокарда и гипертонического криза, а также смертностью людей с сердечно-сосудистыми заболеваниями и суммарной продолжительностью природных магнитных пульсаций типа Pc1 (pulsation continuous 1) с частотой от 0,2 до 5,0 Гц и амплитудами в диапазоне, равном десяткам–сотням пТл [15,16]. Нетрудно видеть, что для пульсаций типа Pc1 значение параметра  $\gamma B_{AC}/f$  близко к значению 0,9 при величине гиромангнитного отношения  $\gamma = 14000$  Гц/мкТл. Это позволяет предположить, что биотропная активность таких пульсаций может быть обусловлена их воздействием на магнитные моменты, создаваемые орбитальным движением электронов в атомах. Подтверждением этого предположения являются наши экспериментальные данные по влиянию КС ПеМП с параметрами  $B_{AC} = 192$  нТл,  $f = 3000$  Гц ( $\gamma B_{AC}/f = 0,9$ ) на вариабельность сердечного ритма человека [17]. Экспонирование добровольцев в поле такого типа оказывает существенное влияние на сердечно-сосудистую систему. В частности, аппликация поля в течение 15 мин приводит к увеличению так называемого стресс-индекса примерно в два раза. Это означает, что возрастание стресс-индекса,

обусловленное воздействием магнитных Pc1-пульсаций, может быть непосредственной причиной сердечно-сосудистых осложнений.

Таким образом, результаты данной работы показывают, что КС ПеМП в диапазоне амплитуд от 10 до 500 нТл и частот от 10 до 3000 Гц способны оказывать существенное влияние на биосистемы как животного, так и растительного происхождения. Первичными мишенями действия КС ПеМП данного типа являются магнитные моменты, создаваемые орбитальным движением электронов в атомах. Полученные данные о зависимости величины биоэффекта от амплитуды и от частоты КС ПеМП имеют важное значение, как для выявления механизмов взаимодействия КС ПеМП (природного и техногенного происхождения) с биосистемами, так и для планирования и оценки эпидемиологических исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 08-04-00290.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г. В. Новиков, В. В. Новиков и Е. Е. Фесенко, *Биофизика* **54** (6), 1120 (2009).
2. V. V. Novikov, I. M. Sheiman, and E. E. Fesenko, *Bioelectromagnetics* **29** (5), 387 (2008).
3. V. V. Novikov, G. V. Novikov, and E. E. Fesenko, *Bioelectromagnetics* **30** (5), 343 (2009).
4. J. I. Jacobson, *Panminerva Med.* **36** (4), 201 (1994).
5. M. A. Persinger, L. L. Cook, and S. A. Koren, *Internat. J. Neurosci.* **100** (1/4), 107 (1999).
6. L. L. Cook and M. A. Persinger, *Neurosci. Lett.* **13/292** (3), 171 (2000).
7. R. Sandycyk, *J. Neuroscience* **77** (3–4), 243 (1994).
8. R. Sandycyk and K. Derpapas, *J. Neuroscience* **69** (1–4), 167 (1993).
9. R. Sandycyk and R. P. Iacono, *J. Neuroscience* **73** (1–2), 93 (1993).
10. Н. А. Белова и В. В. Леднев, *Биофизика* **46**, 122 (2001).
11. В. В. Леднев, Н. А. Белова, З. Е. Рождественская и Х. П. Тирас, *Геофизические процессы и биосфера* **2** (1), 3 (2003).
12. N. A. Belova, et al., *The Environmentalist* **27** (4), 411 (2007).
13. В. В. Леднев, в сб. *Моделирование геофизических процессов* (Объединенный институт физики земли им. О.Ю. Шмидта, 2003), с. 130.
14. Е. Б. Александров, О. В. Константинов, В. И. Перель и В. А. Ходовой, *Журн. эксперим. и теорет. физики* **45**, 3(9), 503 (1963).
15. S. I. Rapoport, T. K. Breus, O. V. Kozyreva, and N.K. Malinovskaya, *Ter. Arkh.* **78** (4), (2006).
16. Н. Г. Клейменова, О. В. Козырева, Т. К. Бреус и С. И. Рапопорт, *Биофизика* **52** (6), 1112 (2007).
17. В. В. Леднев и др., *Биофизика* **53** (6), 1129 (2008).

## The Influence of the Extremely Weak Alternating Magnetic Fields on the Regeneration of Planarians and the Gravitropic Response of Plants

N.A. Belova, A.M. Ermakov, A.V. Znobishcheva, L.K. Srebnitskaya, and **V.V. Lednev**

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

The influence of extremely weak alternating magnetic fields (EW AMF) directed colinearly to the static Earth magnetic field on the rate of regeneration of planarians and the rate of gravitropic response in the stem segments of flax has been studied. The value of bioeffects of EW AMF is determined by the parameter  $\gamma B_{AC}/f$ , where  $\gamma$  is the gyromagnetic ratio of the magnetic moments induced by the orbital movements of electrons in atoms, and  $B_{AC}$  and  $f$  correspond to magnetic induction and frequency of the alternating magnetic component. It was shown that the magnitude of bioeffects depends on the amplitude (at fixed 1000 Hz – frequency) and frequency (at fixed 192 nT – amplitude) of the alternating component. Maxima of bioeffects are observed at  $\gamma B_{AC}/f = 0.9; 2.75$ , and minor maxima  $\gamma B_{AC}/f = 4.5; 6.1$ . The bioeffects are absent at  $\gamma B_{AC}/f = 1.8, 3.8, 5.3, 6.7$ . The positions of the maxima and minima of bioeffects correspond to the theoretical prediction (at  $\gamma = 14000 \text{ Hz}/\mu\text{T}$ ). Primary targets for the EW AMF of this type are the magnetic moments induced by the orbital movements of electrons in atoms.

*Key words: extremely weak alternating magnetic fields; magnetic parametric resonance; magnetic moments induced by orbital movements of electrons in atoms; planarian regeneration; gravitropic response of plants*