

ДІЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ

УДК: 58.037.86.52.771

ЗАВИСИМОСТЬ ГРАВИТРОПИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ КОРНЕЙ КРЕСС-САЛАТА ОТ АМПЛИТУДЫ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ КОМБИНИРОВАННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Н.В. Шейкина¹, Н.И. Богатина², Е.Л. Кордюм³¹Харьковский национальный университет им В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, Харьков 61077, Украина
Sheykina@ukr.net²Физико-технический институт низких температур НАН Украины, пр. Ленина, 47, Харьков 61100, Украина
bogatina@ilt.kharkov.ua³Институт ботаники НАН Украины, ул. Терещенковская, 2, Киев 01004, Украина
Поступила в редакцию 28 октября 2006 г.

Было проведено подробное исследование гравитропической реакции корней кресс-салата в широкой области амплитуд переменной составляющей комбинированного магнитного поля. Величина амплитуды переменной составляющей комбинированного магнитного поля изменялась от 100 нТл до 35 мкТл. Полученные зависимости сравнивались с теорией параметрического резонанса для ионов кальция и водорода. Показано, что хотя положение максимумов согласуется удовлетворительно с предсказанными теорией параметрического резонанса результатами, однако форма кривой зависимости достоверно отличается от теоретической. Наблюдаемый эффект, скорее всего, связан с другим механизмом возникновения биологического эффекта в комбинированном магнитном поле. Предлагается другой механизм действия, адекватно объясняющий как положение амплитудного максимума, так и форму кривой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гравитропическая реакция, комбинированное магнитное поле, ионный циклотронный резонанс, параметрический резонанс.

В настоящее время существует довольно много работ, посвященных изучению влияния комбинированного магнитного поля (КМП) на целый ряд биологических процессов, в том числе и на гравитропическую реакцию растений (ГТР) [1–10] (Под гравитропической реакцией подразумевается свойство корней растений расти вдоль вектора гравитации, а coleoptилей - в противоположном направлении). Однако большинство работ имеет недостаток, заключающийся в том, что эксперименты проводятся в недостаточно хорошо воспроизводимых магнитных условиях. Это связано с тем, что большинство авторов [3–10] создает комбинированное магнитное поле, используя постоянную составляющую земного поля, не избавляясь от флуктуирующей во времени составляющей земного магнитного поля. В этих работах предполагается, что переменная составляющая земного поля действует одинаково как на опытные, так и на контрольные образцы, а все изменения, обнаруженные между «контролем» и опытом связаны только с добавочной искусственной переменной составляющей. Такое утверждение не доказано, и может являться причиной плохой воспроизводимости результатов. Использование экранирующей техники (в том числе сверхпроводящей) позволяет избежать неприятностей, связанных с дрейфом земного магнитного поля, а также позволяет более точно изучить зависимость эффектов комбинированного магнитного поля от амплитуды переменной составляющей. Такие исследования позволяют сделать выбор модели механизма воздействия комбинированного магнитного поля на гравитропическую реакцию. Наиболее реальной является гипотеза с использованием ионного параметрического резонанса, предложенная В.В. Ледневым применительно к биосистеме [11], поэтому ее проверка представляет большой интерес. Основной вывод, следующий из модели ионного параметрического резонанса – это пропорциональность интенсивности биологического эффекта квадрату функции Бесселя первого порядка с аргументом. Равным $\beta = V_{AC}/V_{DC}$, где V_{AC} – переменная составляющая, а V_{DC} – постоянная составляющая магнитной индукции. Из этого следует, что максимум биологического эффекта реализуется при $\beta = 1.84$, а минимум при $\beta = 0$ и $\beta = 4$. Экспериментальной проверке положений модели ионного параметрического резонанса и посвящена настоящая работа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись корни кресс-салата. Семена кресс-салата предварительно проращивались в течение двух дней. Кресс-салат был выбран для исследования гравитропической реакции, так как он имеет один центральный очень тонкий аксиально симметричный корень, и его гравитропическая реакция проявляется спустя относительно короткое время после гравистимуляции

Зависимость гравитропической реакции корней кресс-салата...

(через 30 мин при температуре 21-24 °С). Гравистимуляция осуществлялась путем расположения двухдневного ровного без изгибов корня параллельно поверхности земли, т.е. перпендикулярно вектору гравитации. Влажная камера с двухдневными проростками кресс-салата помещалась в цилиндр, образованный трехслойным пермалловым экраном (Рис.1а, б). Искусственное постоянное магнитное поле в камере создавалось с помощью соленоида. Постоянная компонента магнитного поля могла изменяться в широком диапазоне магнитных индукций (от 0.02 мкТл до 200 мкТл). Амплитуда спектральной плотности магнитного шума, генерируемая искусственным постоянным магнитным полем, зависит от величины магнитной индукции B магнитного поля, созданного искусственно (она возрастает с увеличением значения магнитного поля, однако для постоянной составляющей меньше 20 мкТл она не превышает $1 \text{ нТл/Гц}^{0.5}$, а для постоянной составляющей меньше 50 мкТл – $2 \text{ нТл/Гц}^{0.5}$). Измерения магнитного шума и его анализ обеспечивались феррозондовым магнитометром или СКВИД магнитометром (с использованием анализатора спектров Philips в обоих случаях). Для сравнения величины проявления гравитропической реакции в комбинированном магнитном поле с данными, рассчитанными по модели ионного параметрического резонанса, необходимо произвести измерения гравитропической реакции в области, где отношение амплитуды переменной составляющей V_{AC} к амплитуде постоянной составляющей комбинированного магнитного поля V_{DC} изменяется от 0 до 4. Зная, что вибрационные частоты комнаты, где размещена наша установка, равны $f_1=5.9 \text{ Гц}$ и $f_2=9.5 \text{ Гц}$ (рис. 2) мы в целях чистоты эксперимента и для несовпадения циклотронной частоты f для ионов кальция (f_{Ca}) с частотами f_1 и f_2 , работали на частоте $f_{Ca}+6.85 \text{ Гц}$, что обеспечивалось $V_{DC}=8.6 \text{ мкТл}$. (Здесь важно отметить, что согласно [12], вибрации оказывают на гравитропическую реакцию такое же действие, как и гравитация)

Конструкция установки описана детально в [13]. После воздействия комбинированного магнитного поля производили измерения углов отклонения корней кресс-салата от горизонтальной плоскости с точностью до $\pm 3^\circ$. Температура все время опытов поддерживалась $23 \pm 1^\circ\text{C}$, что достигалось помещением влажной камеры в толстостенную пенопластовую камеру, обеспечивающей стабильность температуры за время эксперимента не менее 0.1°C .

Для получения достоверных результатов необходимо было произвести измерения статистических массивов порядка 50 корней для каждого значения V_{AC}/V_{DC} . В качестве контроля использовались аналогичные корни, но помещенные в постоянное магнитное поле $V_{DC}=8.6 \text{ мкТл}$. Здесь необходимо отметить, что во время эксперимента феррозонд магнитометра вынимался из рабочего объема экрана и отдалялся от измеряемых образцов на расстояние, порядка 50 см, чтобы исключить возможность влияния магнитного материала указанного феррозонда на биообъекты.

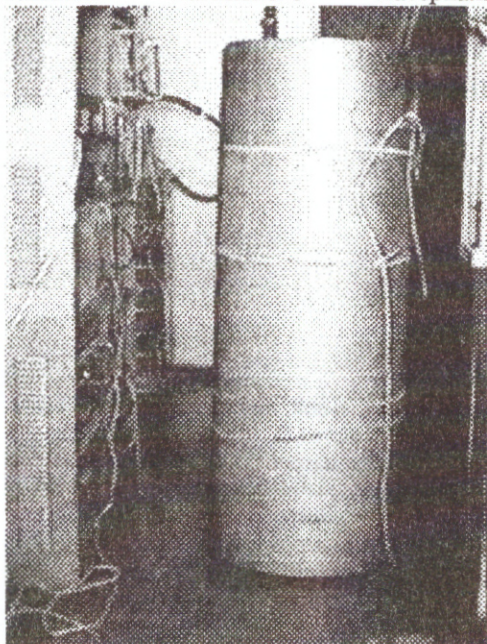


Рис. 1а – общий вид установки

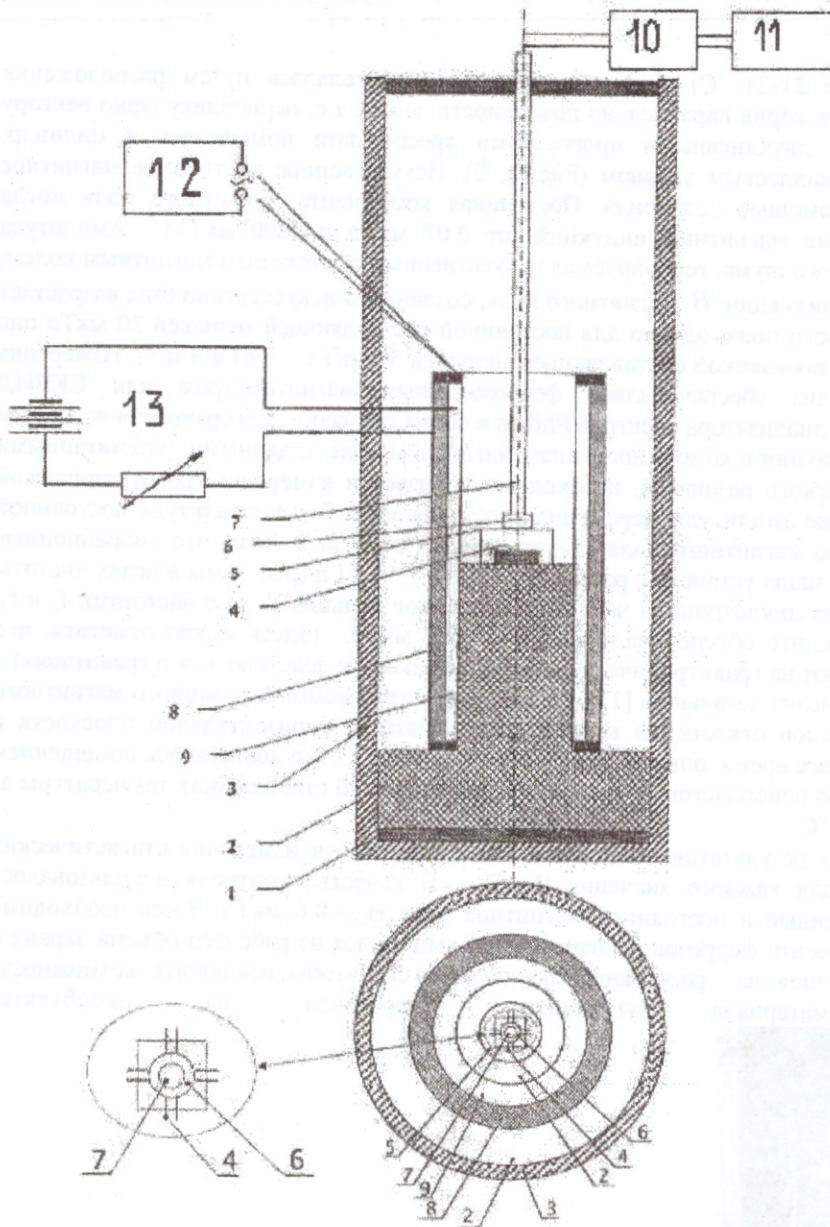


Рис.16. Схема экспериментальной установки с пермалловым экраном в продольной, центральной части (верх), и вид сверху (дно). Демпфирующая резина (1) поддерживает подставку из пенопласта (2). Пермалловый экран (3) окружает образец (4), который помещен во влажную камеру из немагнитного материала, а затем в обмотки соленоидов (8, 9). Магнитное поле измеряется и контролируется чувствительными элементами (датчиками магнитного поля (феррозонд или СКВИД))(6) внутри штока (7). Соленоиды (8, 9) генерируют постоянное магнитное поле (8) и переменное поле (9). И постоянное и переменное поля ориентированы параллельно центральной оси. Увеличенная центральная часть вида сверху показывает ориентацию четырех пар корней (4). 10 – электронная часть магнитометра, 11 – анализатор спектра, 12 – генератор низких частот, 13 – система питания соленоида постоянным током.

Зависимость гравитропической реакции корней кресс-салата...

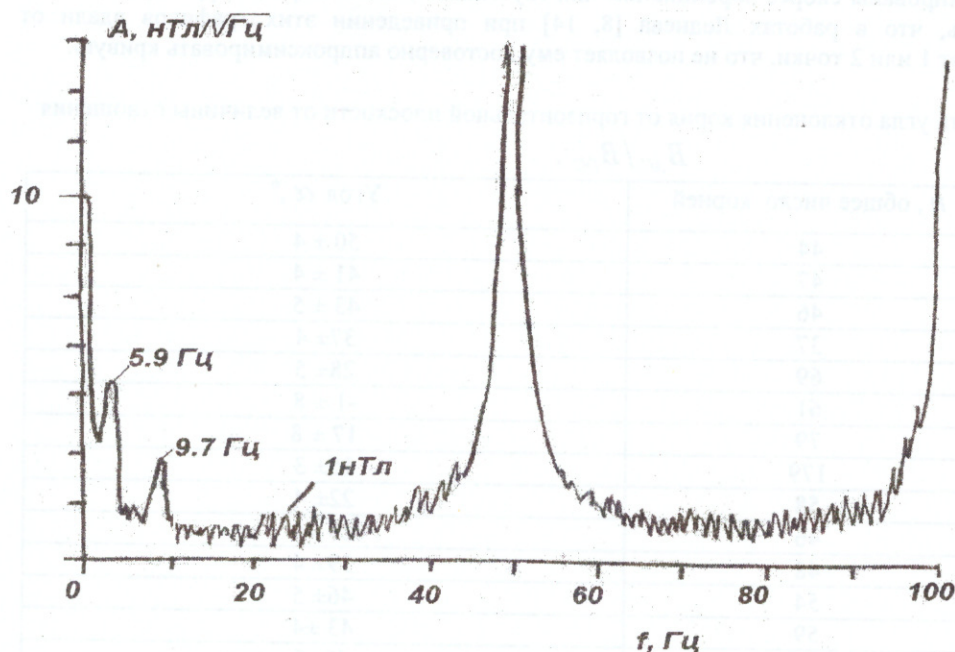


Рис.2. Зависимость амплитуды спектральной плотности магнитного шума пермаллового экрана от частоты, измеренная с помощью феррозондового магнитометра,

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1 случай- амплитуда переменной составляющей КМП порядка нескольких мкТл

Согласно представлениям о параметрическом резонансе в биосистемах значения биологически эффективных частот переменной компоненты формально совпадают с циклотронной частотой для данного типа ионов в вакууме [3,4].

Величина вычисленного биологического эффекта p , вычисленная в этих же работах, индуцируемого комбинированным магнитным полем в режиме параметрического резонанса, т.е. при частотах переменной составляющей МП, близких к циклотронной, определяется квадратом функции Бесселя 1-ого порядка (J_1):

$$p \sim J_1^2(2f_L/f) / (1 + (f - f_c)^2 / \lambda^2), \quad (1)$$

где f — частота переменной составляющей КМП, f_L — частота Лармора, соответствующая пику амплитуды переменной компоненты комбинированного магнитного поля, $(2f_L/f) = (B_{AC}/B_{DC})$ — аргумент функции Бесселя, f_c — циклотронная частота иона в вакууме. При $f = f_c$ должен наблюдаться максимум эффекта, λ — полуширина (на половине высоты) пика частотной зависимости ответа биологического объекта на воздействие комбинированного магнитного поля. Здесь необходимо отметить, что, согласно [11], константа скорости диссоциации данного иона из центра связывания Ca^{2+} определяется как $k = 2\pi\lambda$ [11].

Из формулы (1) видно, что наибольшая величина эффекта достигается при максимуме функции Бесселя, который находится при значении отношения $B_{AC}/B_{DC} = 1.84$.

Для проверки этих количественных предсказаний были проведены эксперименты, в которых B_{AC} можно было изменять в широких пределах.

Полученные результаты для корней кресс-салата приведены в таблицах 1 и 2 и на рис. 3 – 5.

Анализ полученных кривых на указанных выше рисунках привел к следующим результатам:

1. Максимум наблюдаемого эффекта находится ниже предсказанного моделью параметрического резонанса, а именно, при отношении $B_{AC}/B_{DC} = 1.65$. Небольшой сдвиг, наблюдаемый в эксперименте, укладывается в стандартную ошибку эксперимента.

2. Однако, характер максимума сильно отличается от квадрата функции Бесселя $J_1^2(B_{AC}/B_{DC})$. Из рисунков 3 – 5 хорошо видно, что полученные кривые носят резонансный характер

и могут быть аппроксимированы скорее лоренцианом или гауссианом, чем квадратом функции Бесселя. Здесь следует отметить, что в работах Леднева [8, 14] при приведении этих графиков вдали от максимума присутствуют 1 или 2 точки, что не позволяет ему достоверно аппроксимировать кривую.

Таблица 1. Зависимость угла отклонения корня от горизонтальной плоскости от величины отношения B_{AC}/B_{DC} ,

B_{AC}/B_{DC}	n , общее число корней	Угол α , °
0.184	44	50 ± 4
0.368	47	41 ± 4
0.736	46	43 ± 5
1.104	37	37 ± 4
1.288	69	28 ± 5
1.472	61	-1 ± 8
1.656	79	17 ± 8
1.84	179	15 ± 3
2.02	58	22 ± 4
2.21	46	23 ± 4
2.39	48	39 ± 4
2.58	54	46 ± 5
3.12	59	43 ± 4
3.68	48	40 ± 5
0	51	57 ± 5
ГМП	62	68 ± 5

Таблица 2. Зависимость количества корней с аномальной гравитропической реакцией (т.е. реакцией, когда они растут вверх или параллельно) от величины отношения B_{AC}/B_{DC}

B_{AC}/B_{DC}	n , общее число корней	N , число выборок	n_{up}/n , %	$n_{ }/n$, %
0.184	44	4	0 ± 2	4 ± 2
0.368	47	4	4 ± 2	9 ± 4
0.736	46	4	4 ± 4	11 ± 4
1.104	37	4	4 ± 4	8 ± 4
1.288	69	6	14 ± 6	19 ± 6
1.472	61	6	33 ± 10	15 ± 6
1.656	79	6	15 ± 6	35 ± 6
1.84	179	14	16 ± 6	32 ± 6
2.02	58	6	6 ± 2	31 ± 6
2.21	46	4	3 ± 2	23 ± 6
2.39	48	4	4 ± 2	12 ± 4
2.58	54	4	4 ± 2	11 ± 4
3.12	49	4	0 ± 2	14 ± 4
3.68	48	4	0 ± 2	10 ± 4
0	51	4	0 ± 2	4 ± 2
ГМП	62	5	0 ± 2	1 ± 4

Здесь n – количество исследованных корешков, N – количество выборок, α – угол отклонения от горизонтальной плоскости

Зависимость гравитропической реакции корней кресс-салата...

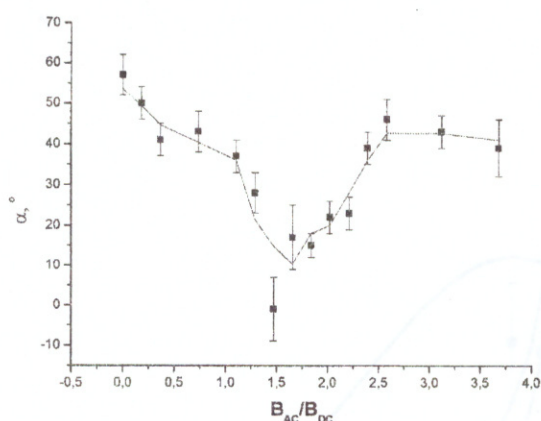


Рис.3. Зависимость угла отклонения корней от горизонтальной плоскости α от величины соотношения B_{AC}/B_{DC} .

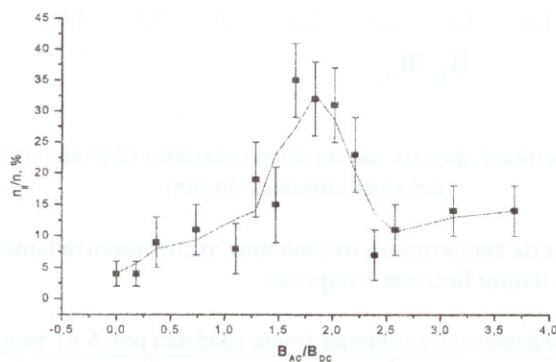


Рис.4. Зависимость количества корней растущих параллельно от соотношения B_{AC}/B_{DC} (отсутствует гравитропическая реакция).

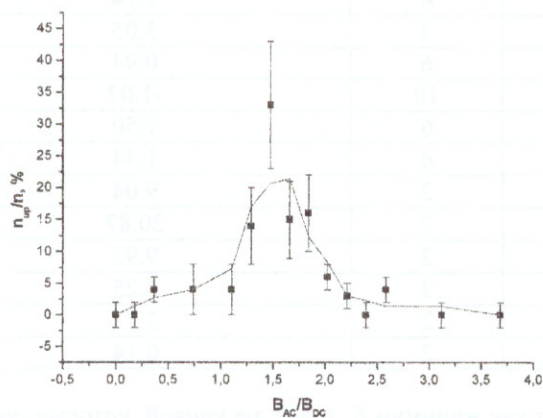


Рис.5. Зависимость количества корней, имеющих гравитропическую реакцию противоположного знака, от величины соотношения B_{AC}/B_{DC} .

Для сравнения с расчетами, выполненными согласно представлениям параметрического резонанса нами был проведен подробный анализ полученных кривых. Кривая рис. 5. была обработана с помощью функции Бесселя, лоренциана и гауссиана. Анализ такой обработки приведен на рис. 6 и в таблице 3.

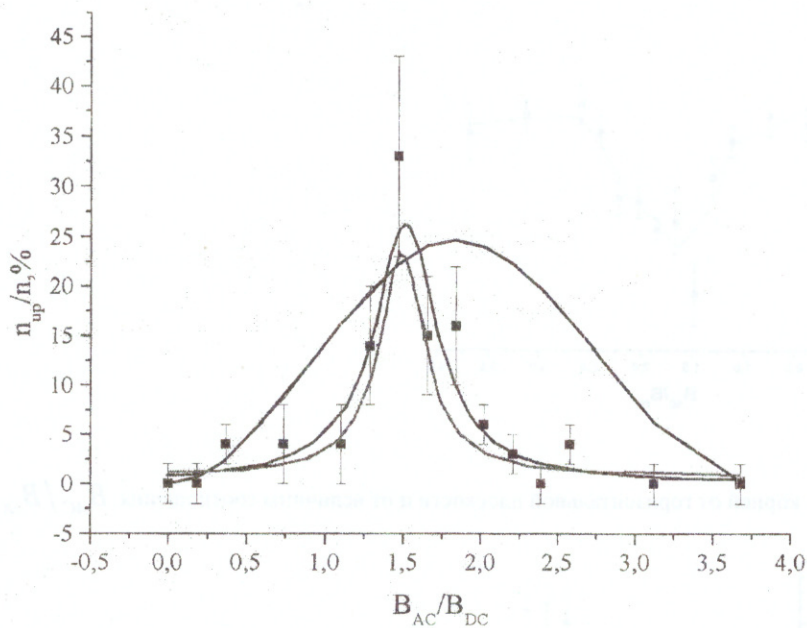


Рис.6. Аппроксимация полученных данных двумя лоренцианами (2 узкие линии) и функцией Бесселя (верхняя широкая линия).

В таблицах 3 и приведены расчеты вероятности отклонения экспериментальных данных от зависимости пропорциональной квадрату функции Бесселя 1 порядка.

Таблица 3 Вероятность наблюдаемого отклонения точек графика рис.6 от теоретической зависимости

B_{AC}/B_{DC}	$AJ_1^2(B_{AC}/B_{DC})$	$n_{up}/n,$ %	$\Delta n_{up}/n,$ %	$[AJ_1^2(B_{AC}/B_{DC}) - n_{up}/n]/\Delta = t$	$P, \%$
0	0	0	2	0	100
0.184	0.061	0	2	0.03	>5
0.368	2.38	4	2	-0.4	>5
0.736	8.59	4	4	1.14	>5
1.104	16.21	4	4	3.05	4
1.288	19.62	14	6	0.94	>5
1.472	22.32	33	10	-1.07	>5
1.656	24.04	15	6	1.50	>5
1.84	24.63	16	6	1.44	>5
2.02	24.08	6	2	9.04	0.1
2.21	22.37	3	2	20.87	0.001
2.39	19.84	0	2	9.92	0.1
2.58	16.5	4	2	6.25	0.2
3.12	6.25	0	2	3.13	4
3.68	0.28	0	2	0.14	>5

Как хорошо видно из таблицы существует как минимум 6 точек, на кривой, которые достоверно (>95%) отклоняются от квадрата функции Бесселя. Чтобы как можно ближе осуществить сравнение наших данных с теорией параметрического резонанса нами была построена кривая, отражающая зависимость биологического эффекта в процентах от величины B_{AC}/B_{DC} . Ее мы также попытались аппроксимировать лоренцианом и квадратом функции Бесселя. Полученные результаты приведены на

рис.7

и

в

таблице

4.

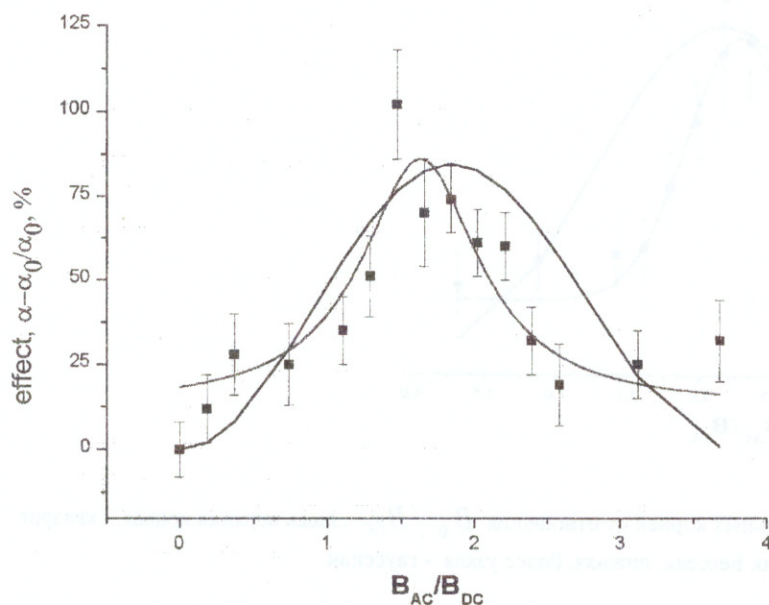


Рис. 7. Аппроксимация наблюдаемого отклонения (обобщенные данные в %) функцией Бесселя (более широкая кривая) и Лоренцианом (узкая кривая)

Таблица 4. Вероятность наблюдаемого отклонения точек графика рис.7 от теоретической зависимости

B_{AC}/B_{DC}	$AJ_1^2(B_{AC}/B_{DC})$	$\alpha - \alpha_0/\alpha_0$, %	$\Delta(\alpha - \alpha_0)/\alpha_0$, %	$[AJ_1^2(B_{AC}/B_{DC}) - (\alpha - \alpha_0)/\alpha_0] / \Delta = t$	$P, \%$
0	0	0	2	0	100
0.184	0.18	12	10	1.18	>5
0.368	7.14	28	12	1.75	>5
0.736	25.77	25	12	0.06	>5
1.104	48.63	35	10	1.3	>5
1.288	58.86	51	12	0.65	>5
1.472	66.96	102	16	2.19	>5
1.656	72.12	70	16	0.13	>5
1.84	84.01	74	10	1.00	>5
2.02	72.24	61	10	1.12	>5
2.21	67.11	60	10	0.71	>5
2.39	59.52	32	10	2.75	5
2.58	49.5	19	12	2.54	>5
3.12	18.76	25	10	0.62	>5
3.68	0.84	32	12	2.60	>5

Как хорошо видно из рисунка и таблицы в этом случае после процедуры вычитания углов ошибка возрастает и полученную кривую можно аппроксимировать и с помощью Лоренциана и с помощью квадрата функции Бесселя. В работах Леднева [8, 14], к сожалению, возможность более точной аппроксимации Лоренцианом не рассматривалась.

В связи с тем, что величины B_{AC}/B_{DC} , при которых наблюдается максимальное количество корней, растущих вверх или параллельно земной поверхности, различаются между собой и оба эти типа корней считались имеющими аномальную гравитропическую реакцию, то исследовалась также кривая зависимости отношения аномальных корней к общему числу корней (рис. 8).

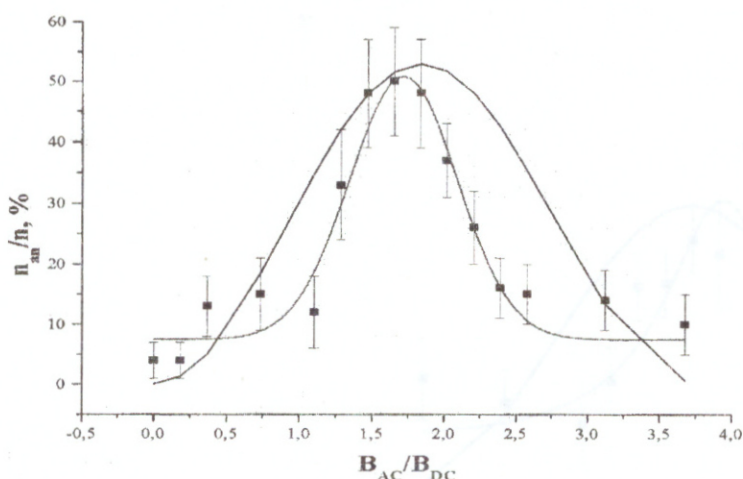


Рис.8. Зависимость процента аномальных корней от отношения B_{AC}/B_{DC} . Здесь верхняя кривая – квадрат функции Бесселя, нижняя, более узкая – гауссиан.

Как хорошо видно из рис. 8, в этом случае также экспериментальные данные лучше ложатся на кривую Гаусса. В таблице 5 приведена вероятность отклонения точек графика рис.8 от теоретической зависимости (черная кривая на рис.8).

Таблица 5. Вероятность наблюдения отклонения точек графика рис.8 от теоретической зависимости

B_{AC}/B_{DC}	$AJ_1^2(B_{AC}/B_{DC})$	$n_{an}/n, \%$	$\Delta n_{an}/n, \%$	$[AJ_1^2(B_{AC}/B_{DC}) - n_{an}/n] / \Delta = t$	$P, \%$
0	0	4	3	0	100
0.184	0.127	4	3	-1.29	>5
0.368	4.95	13	5	-1.61	>5
0.736	17.87	15	6	0.48	>5
1.104	33.72	12	6	3.62	2
1.288	40.80	33	9	0.87	>5
1.472	46.43	48	9	-0.17	>5
1.656	50.00	50	9	0	100
1.84	51.23	48	9	0.36	>5
2.02	50.09	37	6	1.45	>5
2.21	46.53	26	6	3.42	3
2.39	41.27	16	5	4.21	1.5
2.58	34.32	15	5	3.86	2
3.12	13.00	14	5	-0.2	>5
3.68	0.68	10	5	-1.96	>5

Из таблицы 5 также следует, что существует 5 точек, которые с вероятностью более 95% отклоняются от теоретически предсказанной зависимости.

Наблюдаемые результаты могут найти более простое объяснение, чем модель Леднева. Оно заключается в следующем. Как известно из нашей работы [15], гравитропическая реакция имеет порог, лежащий в районе 2 - 4 мкТл. При наложении на постоянное магнитное поле переменной составляющей, амплитуда которой может быть больше величины магнитной индукции постоянного магнитного поля, суммарное магнитное поле проходит через 0 и меняет знак. При этом корни часть периода находятся в магнитном поле, величина которого ниже порога чувствительности, что может приводить к замедлению гравитропической реакции. Очевидно, что биологический эффект начинается при $B_{AC} = B_{DC} - B_0$, максимальным это время будет при значении амплитуды переменного магнитного поля $B_{AC} = B_{DC} + B_0$, где B_0 – пороговая индукция для постоянного магнитного поля. Если подставить в последнее уравнение значение B_0 , то получим максимальный эффект для отношения B_{AC}/B_{DC} равном 1.3 – 1.6, что хорошо

Зависимость гравитропической реакции корней кресс-салата...

согласуется с экспериментом. Кроме того, начало эффекта будет наблюдаться при значении отношения B_{AC}/B_{DC} , равном 0.4 - 0.7, что также хорошо совпадает с опытом. Эффект при таком объяснении должен резко нарастать, достигать максимума и потом менее резко падать. Замедление падения также наблюдается в опыте. Максимальное время нахождения в МП ниже порогового равно $(0.285 - 0.39)T$, где T – период переменной составляющей КМП.

Влияние амплитуды переменной составляющей КМП в диапазоне $10^{-9} - 10^{-12}$ Тл на гравитропическую реакцию корней кресс-салата.

Особый интерес вызывают исследования биологических ответов при очень малых значениях амплитуды переменного МП в области пикотеслового и нанотеслового диапазона. Полученные результаты представлены на рис 9.

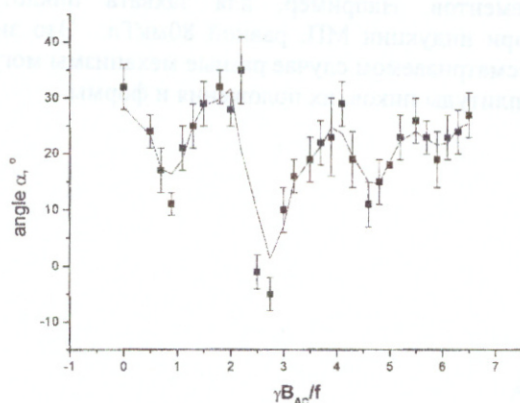


Рис.9. Зависимость угла отклонения α от горизонтальной плоскости от соотношения $\gamma B_{AC}/f$.

Здесь γ – величина гиромангнитного отношения для рассматриваемого магнитного момента. В нашем случае значение $\gamma = 42.578$ Гц/мкТл и соответствует спину ядра атома водорода. Из рисунка хорошо видно, что максимальные отклонения гравитропической реакции от нормы наблюдаются в следующих точках: $\gamma B_{AC}/f = 0.9, 2.75, 4.6, 5.9$, что хорошо совпадает с теоретическими предсказаниями [16]. Сравнение экспериментальных результатов с теоретически предсказанной зависимостью представлено на рис.10.

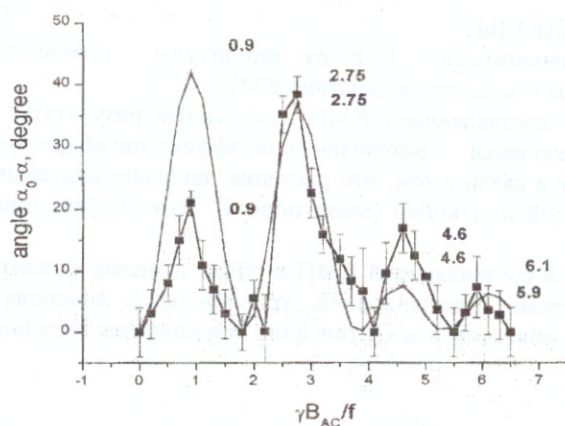


Рис. 10. Сравнение экспериментальных результатов (кривая, построенная по точкам) с теоретической кривой (сплошной).

Из рисунка хорошо видно, что хотя положение максимумов очень хорошо совпадает с теоретически предсказанными в работе [16], амплитуда 1-ого максимума существенно ниже, чем предсказанная, а 3-его – существенно выше. Это расхождение достоверно. Кроме того, здесь

необходимо отметить, что форма каждого пика может быть аппроксимирована также и Лоренцианом. Поскольку в нашем случае γ – это гиромагнитное отношение спина ядра атома водорода, то можно с уверенностью сказать, что ионы водорода также принимают непосредственное участие в ГТР кресс-салата.

Другое возможное объяснение наблюдаемого эффекта заключается в следующем. Если переменную составляющую МП рассматривать как магнитный шум, то согласно [17], при уровне шума превышающем величину $4 \text{ нТл/Гц}^{0.5}$ возникает генерация переменного МП из прорастающего растения, причем, эта генерация происходит на очень низких частотах (порядка 0.7; 1.8 Гц). Такая генерация может сопровождаться биологическими эффектами. Кроме того наложение на постоянное МП переменного МП может приводить к тому, что возникают эффекты, связанные не только с указанным выше эффектом, но и одновременным захватом циклотронных частот ионов Ca^{2+} и циклотронных частот других близ лежащих химических элементов. Например, для захвата циклотронной частоты Fe^{3+} необходимо изменение $\approx 3.5 \text{ мкТл}$ при индукции МП, равной 80 мкТл . Это значение близко к экспериментальному. Таким образом, в рассматриваемом случае разные механизмы могут накладываться друг на друга и приводить к изменению амплитуды пиков, их положения и формы.

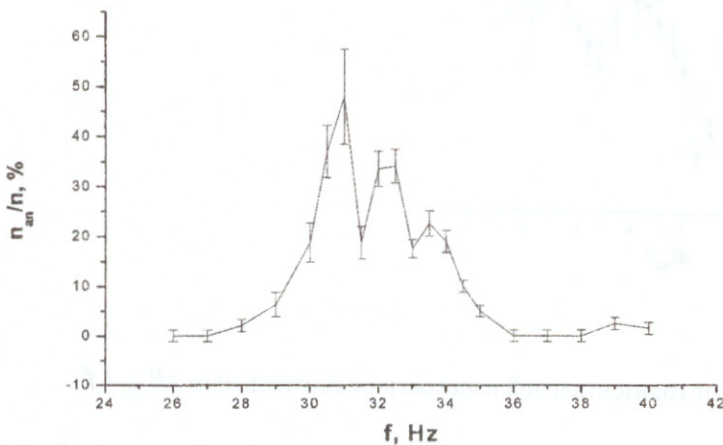


Рис. 11. Зависимость доли аномальных корней от частоты вблизи циклотронной частоты ионов кальция.

Анализ линии резонансного поглощения из рис. 11 дает полуширину линии поглощения равную приблизительно $1.5 \pm 0.5 \text{ Гц}$, что соответствует величине k (эффективной константе скорости диссоциации ионов Ca^{2+} из центра связывания) равной $\sim 6 \text{ с}^{-1}$. Такое время характерно для сильных центров связывания двухвалентных ионов в Ca^{2+} -связывающих центрах белков [18].

ВЫВОДЫ

В результате подробных исследований зависимости ГТР от амплитуды переменной составляющей КМП можно сделать следующие выводы о механизме действия КМП:

1. В случае больших амплитуд переменной составляющей КМП полученные результаты не согласуются с теорией ионного параметрического резонанса. Биологический эффект ингибирования ГТР находит более простое объяснение: он возникает в связи с тем, что растение довольно длительное время (до трети) находится в магнитном поле с малой индукцией (ниже порога). Этот эффект имеет максимум при значении $V_{AC} = V_{DC} + V_0$.

2. Зависимость ГТР от амплитуды переменной составляющей КМП в области малых амплитуд может быть объяснена сразу несколькими эффектами: расщеплением уровней ядер водорода в магнитном поле, генерацией переменного МП самим объектом и захватом близ лежащих циклотронных частот других химических элементов,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богатина Н.И., Шейкина Н.В., Кордюм Е.Л., Карачевцев В.А. Гравитропическая реакция растений в комбинированном (постоянном и переменном) магнитном поле // Доповіді НАН України. - 2002. - №4. - С. 176-180.
- Богатина Н.И., Шейкина Н.В., Кордюм Е.Л. Влияние комбинированного магнитного поля на гравитропическую реакцию растений и спектр электромагнитного излучения, генерируемого ими в процессе роста // Радиофизика и электроника. - 2005. - 10. №2. - С.331-336.

Зависимость гравитропической реакции корней кресс-салата...

- 3..Liboff A.R. Cyclotron resonance in membrane transport.//1985 in Chiabrera C, Nicolini C., Schwan M.P. eds. Interaction between electromagnetic field and cells. London Plenum Press. - 1995. - P. 281-296.
4. Liboff A.R., Rozek R.J., Sherman M.L., McLeod B.R., Smith S.D. Ca^{2+} -45 cyclotron resonance in human lymphocytes// 1987, J. Bioelectricity . - 1987. - 8. - P.12-22.
- 5..Liboff A.R., Parkinson W.C. Search for ion-cyclotron resonance in an Na^{+} - transport system// Bioelectromagnetics. - 1991. - 12. - №2. - P. 78-84
- 6..Blanchard J.P., Blackman C.F. A mechanistic model for biological effects of magnetic fields// 1999, Biological effects of magnetic fields, Information Ventures Institute. - 1999. - P.13-20.
7. Белова Н.А., Леднев В.В. Активация и ингибирование гравитропической реакции растений с помощью слабых комбинированных магнитных полей.// Биофизика. - 2000. - 45. - № 6. - С.1102-1106.
8. Белова Н.А., Леднев В.В. Зависимость гравитропической реакции в сегментах стеблей льна от частоты и амплитуды переменной компоненты слабого комбинированного магнитного поля// Биофизика. - 2000. - 45. - №6. - С. 1108-1110.
9. Белова Н.А., Леднев В.В. Активация и ингибирование гравитропической реакции в сегментах стеблей льна при изменении величины магнитной индукции постоянного поля в пределах от 0 до 350 мкТл.// Биофизика. - 2001. - 46. - №1. - С. 118-121.
10. Белова Н.А., Леднев В.В. Влияние крайне слабых переменных магнитных полей на гравитропизм растений// Биофизика. - 2001. - 46. - №1. - С. 122-125.
- 11.Леднев В.В. Биоэффекты слабых комбинированных, постоянных и переменных магнитных полей// Биофизика. - 1996, 41. - №.1. - С. 224-232.
12. Kuznetsov, Oleg, Hasenstein, Karl H. Simulation of gravity by vibrational forces //American Society of Plant Biologists>Membership | Meetings | Publications | Education | Job Bank | Public Affairs | Resource Links | Discussion Forums | ASPB HOME Abstract Center. Session List. Abstract Number: 65 Program Information Session Number Session Name31 Signal Transduction.
- 13.Kordyum E., Bogatina N., Sheykina N., Kalinina Ya. Weak Combined Magnetic Field Changes Root Gravitation// Advances in Space Research (a COSPAR information). - 2005, 36. - P. 1229-1236.
- 14.Леднев В.В., Сребницкая Л.К., Ильясова Е.Н. и др. Магнитный параметрический резонанс в биосистемах: Экспериментальная проверка предсказаний теории с использованием регенирирующих планарий *Dugesia Tigrina* в качестве тест-системы// Биофизика. - 1996. - 41. - №4. - С.815-825.
- 15.Богатина Н.И., Шейкина Н.В., Кордюм Е.Л. Изменение гравитропической реакции, вызванные постоянным магнитным полем //Біофізичний Вісник (Вісник Харківського університету). - 2006.- Этот выпуск.
16. Белова Н.А., Ермакова О.Н., Ермаков А.М., Леднев В.В.. Амплитудная зависимость биологических эффектов КС ПемП с частотой 60 Гц// Сборник избранных трудов IV Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля в биологии и медицине». - С. - П. - 2006. - С.21 - 27.
17. Богатина Н.И., Шейкина Н.В. Собственное магнитное поле зерновок пшеницы и генерируемые ими магнитные шумы//Біофізичний Вісник (Вісник Харківського університету). - 2001. - №525. - вип. 1 (8). - С. 101-107.
- 18 Blackmann C.F., Blanchard J.P., Benane S.G., House D.N.//Bioelectromagnetics. - 1994. - 15. - P. 239 - 260.