

УДК 537.86:52.7+58.027

## ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ КОРНЕЙ КРЕСС-САЛАТА И КУКУРУЗЫ ОТНОСИТЕЛЬНО КОМБИНИРОВАННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ИХ ГРАВИТРОПИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ. ЭКСПЕРИМЕНТ И НОВАЯ ГИПОТЕЗА, МЕХАНИЗМ АДАПТАЦИИ

*Богатина Н.И.<sup>1</sup>, Шейкина Н.В.<sup>2</sup>, Кордюм Е.Л.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины,  
Харьков, Украина*

<sup>2</sup>*Национальная фармацевтическая академия, Харьков, Украина*

<sup>3</sup>*Институт ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины, Киев, Украина*

*E-mail: n\_bogatina@rambler.ru*

Экспериментально показано, что гравитропическая реакция растений зависит от направления корней относительно комбинированного магнитного поля (КМП). При расположении корней перпендикулярно КМП и силе гравитации (КМП  $\perp$  гравитации) наблюдается отрицательная гравитропическая реакция. При расположении корней  $\perp$  КМП и силе гравитации (КМП  $\perp$  силе гравитации) гравитропическая реакция отсутствует. При расположении корней  $\parallel$  КМП и  $\perp$  силе гравитации (КМП  $\perp$  силе гравитации) гравитропическая реакция не изменяется. Эти эффекты и ранее полученные результаты хорошо согласуются с гипотезами Либова и нашей. Пользуясь ими можно утверждать, что основной поток ионов  $\text{Ca}^{2+}$  направлен вдоль корней. Основную роль играет электрическое поле мембраны клетки. Учет его величины позволяет убрать все возражения о невозможности действия КМП, т.к. мала его энергия. КМП является спусковым механизмом, освобождающим энергию клетки. С помощью КМП, можно регулировать скорость кальциевого обмена в клетке. Обсуждается возможный механизм адаптации клеток к КМП. Он связывается с ионами магния.

**Ключевые слова:** комбинированное магнитное поле, циклотронная частота, гравитропическая реакция, электрическое поле мембраны.

### ВВЕДЕНИЕ

Ранее было показано, что комбинированное магнитное поле (КМП), направленное параллельно силе тяжести, может существенно изменить гравитропическую реакцию растений [1–5]. Эффекты наблюдаются для определенных частот переменной составляющей комбинированного магнитного поля, формально совпадающих с циклотронными частотами ионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ , ауксина, абсцизовой кислоты, гиббереллинов. (КМП – это комбинация постоянного и коллинеарного ему переменного магнитного поля). Особенно велик эффект для частоты переменной составляющей, совпадающей с циклотронной частотой ионов  $\text{Ca}^{2+}$ . В этом случае изменяется знак гравитропической реакции как для корней кресс-салата, так и гороха. До настоящего времени нет общей теории, объясняющей все наблюдаемые эффекты. Поэтому очень важно выяснить, зависит ли

наблюдаемый эффект от ориентации корней относительно направления магнитного поля. Именно этому вопросу и посвящена настоящая работа.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схема используемой установки приведена на рис.1

Пермалловый экран с дном 2 размещали на резине 1, демпфирующей вибрации. Внутри экрана располагались кольца 3 из немагнитного материала, центрирующие обмотки соленоида 4 и 5 относительно центральной оси экрана. Обмотка 5 использовалась для создания постоянного магнитного поля в соленоиде, обмотка 4 - для создания переменного магнитного поля в соленоиде. 6 – подставка из немагнитного материала, на которой была размещена влажная камера 9 с образцами (корнями кресс-салата и кукурузы). В камере 9 на подставке 7 размещали корни 8 (двухсуточные проростки кресс-салата или кукурузы). Корни располагались в горизонтальной плоскости как параллельно вектору магнитного поля, направленного вдоль оси экрана, так и перпендикулярно вектору магнитного поля. В обоих случаях корни были ориентированы перпендикулярно вектору силы тяжести. Температура в камере стабилизировалась с точностью до  $\pm 0.2^\circ \text{C}$ . Внешний вид установки приведен на рис. 2 и 3.

Схема эксперимента

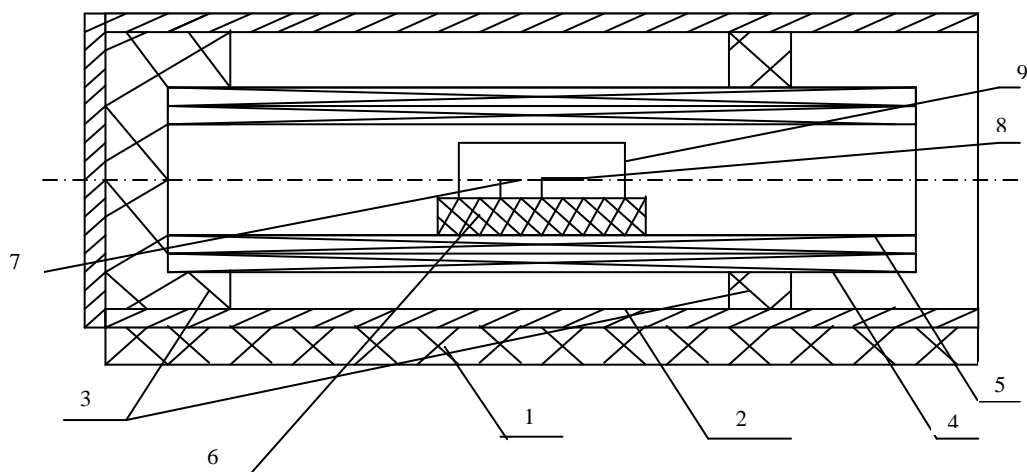


Рис.1. Вид экспериментальной установки в разрезе. 1 – демпфирующая резина; 2 – двухслойный пермалловый экран с дном.; 3 - кольца 3 из немагнитного материала, центрирующие обмотки соленоида 4 и 5 относительно центральной оси экрана; 4 и 5 – обмотки соленоида; 6 - подставка из немагнитного материала; 9 – влажная камера; 7 – подставка из немагнитного материала внутри влажной камеры; 8 – корни кресс-салата или кукурузы.

Для наблюдения биологических эффектов комбинированного магнитного поля необходимо, чтобы однородность постоянной составляющей магнитного поля была не менее 1.5 %. Такая однородность в данной конструкции обеспечивается в цилиндре диаметром 60–70 мм вокруг оси и вдоль оси на расстоянии лишь 8–12 мм.

Таким образом, в случае, когда корни расположены вдоль оси экрана, длина корня не должна превышать 8-12 мм, чтобы объект исследования полностью находился в области магнитного поля необходимой однородности.



Рис.2. Внешний вид установки сбоку.



Рис.3. Внешний вид внутренней части установки.

Необходимая однородность магнитного поля определяется шириной резонансной кривой биологического эффекта, которую наблюдали ранее [2, 3, 6, 7]. Обычно она составляет 1.5 – 2%.

Так как зачастую использовалась длина корня порядка 15 мм, необходимо было добавить обмотки на концах соленоида, которые бы увеличивали область однородности магнитного поля и позволили использовать корни такой длины.

В ходе эксперимента были измерены магнитные шумы пермаллового экрана, расположенного горизонтально, с помощью феррозондового магнитометра и анализатора спектра в области частот от  $10^{-4}$  до 100 Гц, а так же с помощью индукционной катушки и узкополосного усилителя У2-8 в области частот от 16 Гц до 100 кГц. Также был измерен коэффициент ослабления магнитного поля, и на основе полученных результатов был рассчитан шум электрического поля внутри экрана. Полученные результаты приведены на рис. 4, рис. 5 и в таблице 1.

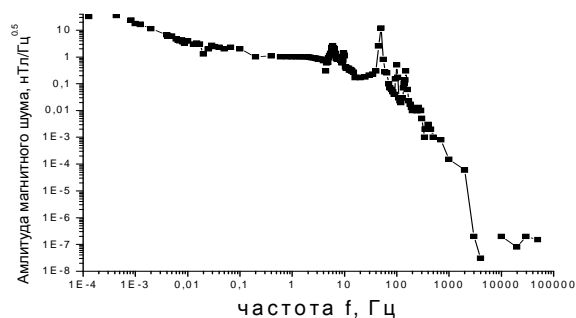


Рис.4. Зависимость амплитуды спектральной плотности магнитного шума от частоты внутри экрана.

Как хорошо видно из рисунков, в области частот 5 – 10 Гц существует 3 пика (около 5 Гц, 8 Гц и 9.5 Гц) и 3 заметных пика (при 50, 100 и 150 Гц).

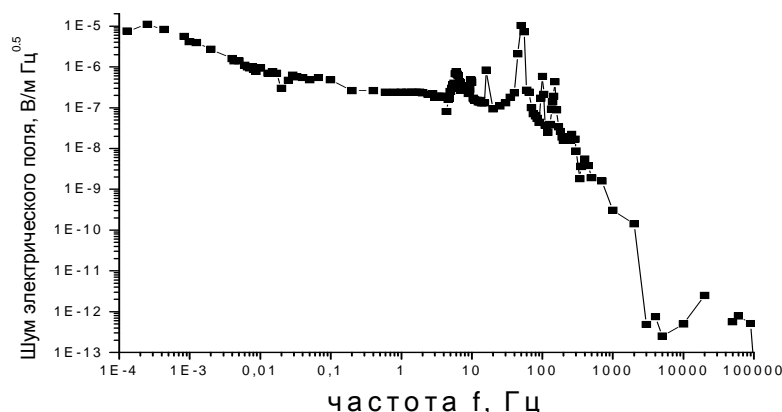


Рис.5. Зависимость амплитуды спектральной плотности шума электрического поля от частоты внутри экрана.

Измерение спектральной плотности магнитного шума в экране проводилось следующим образом. Сначала измеряли величину дрейфа магнитного поля в экране в течение суток с помощью феррозондового магнитометра, соединенного с Фурье спектроанализатором. Это дало кривую в области от  $10^{-4}$  Гц до 100 Гц. Затем с помощью индукционной катушки и узкополосного усилителя У2-8 измеряли магнитный шум вне экрана в области частот 16 Гц – 100 кГц. Полученные значения делили на коэффициент экранирования экрана.

Коэффициент экранирования экрана определяли следующим образом. Весь экран помещали в большой соленоид, в котором создавали большое магнитное поле. Измеряли это поле при отсутствии экрана, а затем при его присутствии внутри экрана. Отношение внешнего магнитного поля к тому, что проникло внутрь экрана, и есть коэффициент экранирования. Его значения приведены в таблице 1. Тут необходимо отметить, что величины магнитного шума, полученная этими двумя разными методами, в области частот 16 Гц – 100 Гц хорошо согласуются между собой.

По известной (измеренной непосредственно) спектральной плотности магнитного шума внутри экрана  $g_{B\parallel}^{0.5}$ , используя известную связь между векторами электрической напряженности  $E_{\perp}$  и напряженности  $H_{\parallel}$  магнитного поля внутри экрана, была вычислена спектральная плотность переменного электрического поля внутри экрана  $g_{E\perp}^{0.5}$ . Между напряженностью магнитного поля  $H_{\parallel}$  и напряженностью электрического поля  $E_{\perp}$  связь определяется формулой

$$E_{\perp} = H_{\parallel} (\omega \mu_0 \mu / 2\sigma)^{0.5},$$

где  $H_{\parallel}$  – продольная компонента переменного магнитного поля в экране,  $E_{\perp}$  – поперечная компонента переменного электрического поля в экране,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота магнитного поля,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость пермаллоя,  $\sigma$  – удельная проводимость пермаллоя.

Таблица 1

Зависимость продольного  $S_{B\parallel}$  и перпендикулярного  $S_{B\perp}$  коэффициентов экранирования пермалловым экраном переменного магнитного поля, коэффициента экранирования экраном переменного электрического поля  $S_E$ , глубины проникновения переменного магнитного поля в пермаллой 79НМ  $\delta$  и волнового сопротивления пермаллоя 79НМ  $Z_{c\text{ перем}}$  от частоты внешнего поля  $f$

$f$ , Гц	$S_{B\parallel}$	$S_{B\perp}$	$S_E$	$\delta$ $10^{-4}$ , м	$Z_{c\text{ перем}}$ , Ом
20	11	34	304698	8.6	$9.9 \times 10^{-4}$
30	12	36	303539	7.4	$1.2 \times 10^{-3}$
40	14	38	347010	6.1	$1.4 \times 10^{-3}$
50	16	46	387300	5.5	$1.5 \times 10^{-3}$
60	17	51	409875	5.0	$1.7 \times 10^{-3}$
70	18	56	420745	4.8	$1.8 \times 10^{-3}$
80	18	57	435091	4.5	$2.0 \times 10^{-3}$
90	19	58	459493	4.3	$2.1 \times 10^{-3}$
100	20	58	547052	4.0	$2.1 \times 10^{-3}$
120	23	61	595520	3.8	$2.2 \times 10^{-3}$
130	26	64	611720	3.7	$2.3 \times 10^{-3}$
140	29	67	684135	3.5	$2.4 \times 10^{-3}$
150	32	70	780935	3.3	$2.5 \times 10^{-3}$
170	39	75	794910	3.2	$2.7 \times 10^{-3}$
200	45	80	944055	3.0	$2.8 \times 10^{-3}$
250	60	100	1022541	2.9	$2.9 \times 10^{-3}$
350	107	140	1379510	2.6	$3.2 \times 10^{-3}$
450	168	194	1514295	2.5	$3.4 \times 10^{-3}$
500	240	240	1583110	2.5	$3.4 \times 10^{-3}$
550	327	277	1632281	2.4	$3.4 \times 10^{-3}$
600	375	297	1788928	2.4	$3.4 \times 10^{-3}$
650	422	315	1813920	2.4	$3.4 \times 10^{-3}$
1000	1560	920	1892100	2.3	$3.8 \times 10^{-3}$
2000	2230	3543	2590274	2.1	$4.1 \times 10^{-3}$
4000	2900	6356	5182931	1.9	$4.7 \times 10^{-3}$
9000	3437	8546	8790100	1.8	$4.8 \times 10^{-3}$
10000	3571	9090	$1.3 \times 10^7$	1.9	$4.8 \times 10^{-3}$
20000	5913	4760	$1.3 \times 10^7$	1.5	$5.7 \times 10^{-3}$
30000	1687	2354	$3.3 \times 10^7$	1.3	$6.2 \times 10^{-3}$
40000	1111	1332	$3.7 \times 10^7$	1.2	$6.8 \times 10^{-3}$
50000	555	344	$5.4 \times 10^7$	1.2	$7.2 \times 10^{-3}$
60000	333	300	$1.05 \times 10^8$	1.1	$7.9 \times 10^{-3}$
70000	313	292	$1.06 \times 10^8$	1.1	$8.0 \times 10^{-3}$
80000	203	210	$1.06 \times 10^8$	1.1	$8.0 \times 10^{-3}$
90000	250	200	$1.1 \times 10^8$	1.1	$7.6 \times 10^{-3}$

На рис.5 приведена зависимость расчетного значения амплитуды спектральной плотности переменного электрического поля в рабочем объеме пермаллового

экрана от частоты. Хорошо видно, что эта зависимость имеет максимумы на тех же частотах, что и зависимость амплитуды спектральной плотности переменного магнитного поля (рис. 4). На частоте 50 Гц  $g_E^{0.5}$  максимальна, и ее поперечная компонента достигает значения

$$g_{E\perp}^{0.5} = 2.2 \cdot 10^{-5} \text{ В/м Гц}^{0.5}, \text{ а продольная компонента } g_{E\parallel}^{0.5} = 8.3 \cdot 10^{-6} \text{ В/м Гц}^{0.5}.$$

В качестве образцов использовались двухдневные корешки кресс-салата и кукурузы, предварительно выращенные в бидистиллированной воде. Для того, чтобы они были максимально ровными, их проращивали на фильтровальной бумаге на планшетах. Предварительная ориентация зародышей зерен была направлена вниз, так что корни росли вдоль силы тяжести.

Корни длиной 7–15мм помещали на подложку из немагнитного материала так, что они располагались параллельно земной поверхности, т.е. перпендикулярно силе гравитации. Эксперименты далее проводились в двух вариантах. В первом варианте корни изначально помещали параллельно комбинированному магнитному полю, во втором – перпендикулярно комбинированному магнитному полю. Контрольные образцы располагались точно также относительно магнитного поля, которое однако было постоянным.

Вариант, когда магнитное поле параллельно силе гравитации для корней кресс салата, исследовался нами очень подробно ранее [1–5, 7]. Аналогичные результаты получены нами и для корней кукурузы в настоящей работе.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты для кресс-салата приведены на Рис. 6. здесь показано 3 случая. КМП во всех случаях направлено параллельно земле, как показано на Рис.1. Вектор гравитации во всех случаях направлен перпендикулярно вектору КМП. Корни же направлены либо перпендикулярно КМП (верхний ряд), либо параллельно КМП (центральный ряд), нижний ряд – контрольные образцы, находящиеся в ПМП.

Проведены исследования корней кукурузы в КМП на установке, подробно описанной в работе [3], в этом случае КМП направлено параллельно силе тяжести, а корни направлены параллельно земле, т.е. перпендикулярно КМП и силе тяжести. Полученные результаты представлены на рис.7 и аналогичны полученным ранее результатам для корней кресс-салата [1–5], т.е. получена отрицательная гравитропическая реакция для корней кукурузы.

Результаты для корней кукурузы, расположенных параллельно КМП, аналогичны результатам, полученным для корней кресс-салата (рис. 6), т.е. получена обычная гравитропическая реакция, как в КМП, так и в ПМП. (рис. 8), хотя и немного более слабая.

Если же корни расположены перпендикулярно КМП, то гравитропическая реакция для корней кукурузы практически отсутствует в течение первых 6 часов, хотя при увеличении времени выдержки все же она возникает.

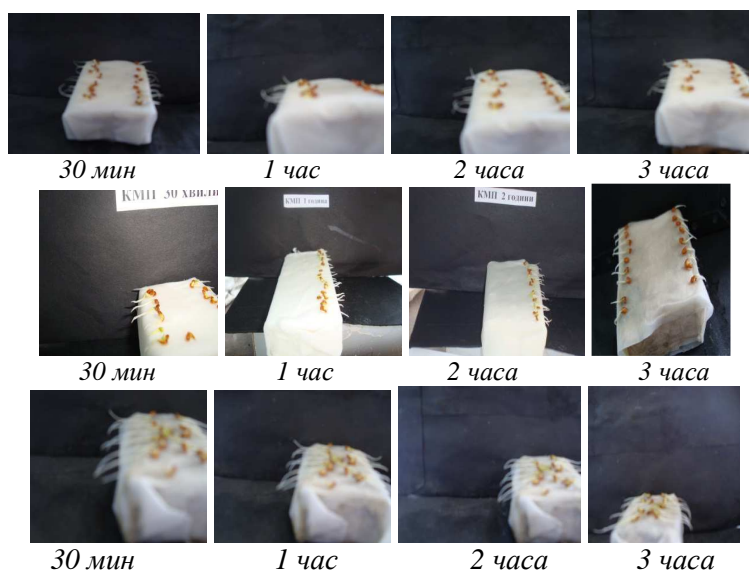


Рис. 6. Гравитропическая реакция корней кресс-салата, расположенных перпендикулярно силе тяжести и направлению КМП (КМП перпендикулярно вектору силы тяжести) – вверх.

Гравитропическая реакция корней кресс-салата, расположенных перпендикулярно силе тяжести и параллельно направлению КМП (КМП перпендикулярно вектору силы тяжести) – в середине.

Гравитропическая реакция корней кресс-салата, расположенных перпендикулярно силе тяжести и направлению ПМП (ПМП перпендикулярно вектору силы тяжести) – вниз.

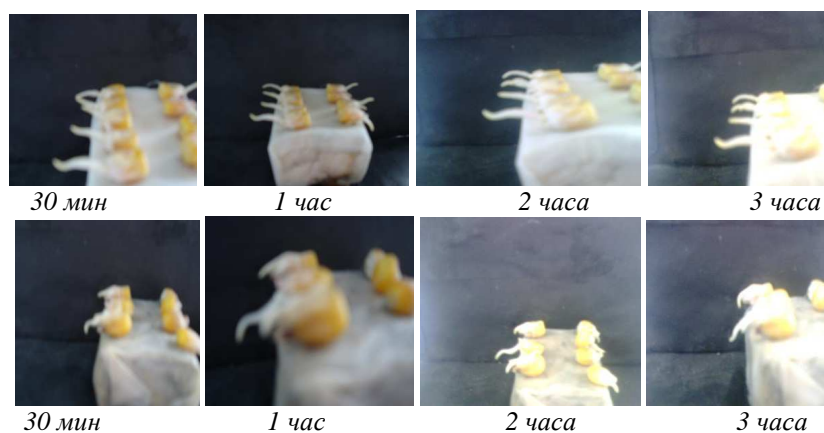


Рис. 7. Гравитропическая реакция корней кукурузы, расположенных перпендикулярно силе тяжести и направлению КМП (КМП параллельно вектору силы тяжести) – вверх. Гравитропическая реакция корней кукурузы, расположенных перпендикулярно силе тяжести и параллельно направлению ПМП (ПМП параллельно вектору силы тяжести) – вниз.

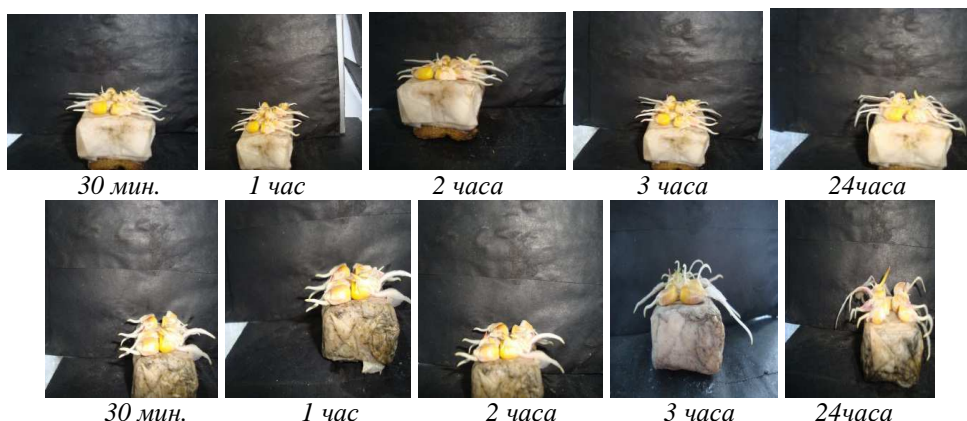


Рис.8. Гравитропическая реакция корней кукурузы, расположенных перпендикулярно силе тяжести и направлению КМП (КМП перпендикулярно вектору силы тяжести) – вверх.

Гравитропическая реакция корней кукурузы, расположенных перпендикулярно силе тяжести и параллельно направлению КМП (КМП перпендикулярно вектору силы тяжести) – вниз.

Сравнение полученных углов отклонения от горизонтали для всех начальных направлений корней кукурузы представлено на рис 9.

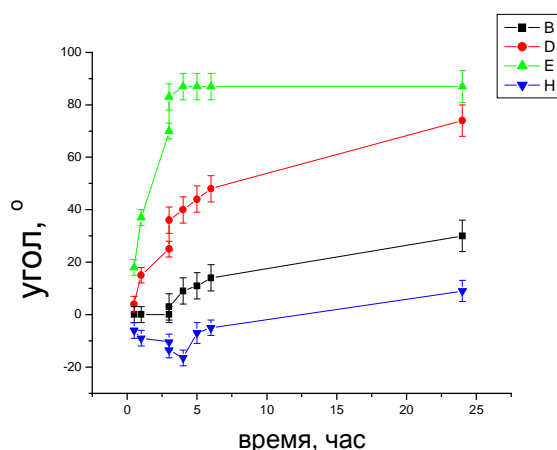


Рис. 9. Зависимость угла отклонения корней кукурузы от горизонтальной плоскости от времени эксперимента: кривая H – корни перпендикулярны КМП, КМП параллельно силе тяжести; кривая B – корни перпендикулярны КМП, КМП перпендикулярно силе тяжести; кривая D – корни параллельны КМП, КМП перпендикулярно силе тяжести; кривая E – контроль в ПМП.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Прежде всего, здесь изложим свое понимание влияния КМП на гравитропическую реакцию



растений. Используем гипотезу, высказанную нами в [2], что ГТР связана с давлением тяжелых элементов клетки на ее мембрану в нижней части клетки, что, в свою очередь, приводит к открытию дополнительных каналов в нижней части клетки и образованию каналов для направленного транспорта ионов. Такое предположение вполне может объяснить ряд наблюдаемых эффектов и в нашем случае. Постоянная составляющая КМП заставляет все ионы (от знака заряда иона зависит только направление вращения) вращаться вокруг поля в ту или другую сторону. Любые столкновения приводят только к изменению радиуса вращения, но не частоты. Вращение связано с возникновением центробежных сил, а, следовательно, приводит к увеличению давления на клеточную оболочку. Наложение переменной составляющей МП на постоянную составляющую должно приводить к возникновению колебаний мембраны с частотой, равной частоте переменной составляющей КМП, что может привести к дополнительному открытию каналов в мембране в области максимального давления и дополнительному направленному транспорту ионов через образовавшиеся каналы. В КМП эти каналы могут быть расположены не только в месте нахождения самых тяжелых частиц в клетке, т.е. внизу, что может привести к изменению направленного транспорта ионов и знака ГТР. Изменение количества каналов приводит к изменению скорости ГТР. Однако резонансное образование новых каналов должно наблюдаться при этом на частотах собственных колебаний мембраны под действием силы тяжести, оценка этих частот дает величину порядка  $10^6 - 10^7$  Гц. Оценки давления, оказываемого на стенку мембраны крахмальными зернами, дают величину порядка  $(0.3 - 5) \cdot 10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup>, аналогичные расчеты для давления, оказываемого на стенку мембраны силой, возникающей в результате вращения ионов в КМП, дают величину того же порядка  $(0.1 - 0.5) \cdot 10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup>. Т.о. могут образовываться дополнительные каналы в мембране, причем в направлении, перпендикулярном силе гравитации, в нашем случае их образуется больше, т.к. направление силы Лоренца перпендикулярно силе гравитации. Кроме этого, наличие переменной составляющей КМП должно приводить к осцилляциям давления и растяжения мембраны в направлении, перпендикулярном силе гравитации, что, в свою очередь, должно приводить к осцилляциям размеров ионных каналов и изменению их пропускной способности. Однако образование новых дополнительных каналов в мембране при таком давлении затруднительно, т.к. для этого надо гораздо большее давление. Если же учесть давление оказываемое ионами, находящимися в электрическом поле, на стенку мембраны, то оно будет значительно больше: порядка  $10^7$  Н/м<sup>2</sup>, а это уже значительное давление. На него дополнительно накладывается давление, связанное с вращением. И даже малые добавки к давлению могут привести к образованию дополнительных каналов в мембране, причем в направлении, перпендикулярном силе гравитации, в нашем случае их образуется больше, т.к. направление силы Лоренца перпендикулярно силе гравитации. Кроме этого, наличие переменной составляющей КМП должно приводить к осцилляциям давления. А это уже ведет к осцилляциям мембраны и ее растяжению в направлении, перпендикулярном силе гравитации, что, в свою очередь, вызывает осцилляции размеров ионных каналов и их пропускной способности. Численная

оценка растяжения кальциевых каналов дает величину 10–100 нм. Это больше размера канала, равного приблизительно 0.3–0.7 нм. Осцилляции мембраны происходят с частотой переменной составляющей КМП. Размер пучка ионов (уширение одного размера) осциллирует с циклотронной частотой. Возможен резонанс этих двух процессов.

Однако резонансные эффекты на циклотронных частотах ионов должны наблюдаться только, если места синтеза ионов в клетке локализованы (вблизи этих мест должно быть максимальное число новых каналов в мембране). Таким образом, сама по себе эта гипотеза, высказанная нами в [2] не может приводить к резонансным эффектам на циклотронных частотах. Она объясняет только эффекты постоянного магнитного поля. Но если ее объединить с гипотезой и расчетами Либова с соавторами [8], то можно сделать очень интересные выводы.

Согласно [8], скорость дрейфа ионов пропорциональна величине электрического поля, времени столкновения ионов, функции Бесселя в квадрате от отношения магнитной индукции переменного магнитного поля к магнитной индукции постоянного магнитного поля, отношению заряда к массе иона. Уравнение для движения иона в комбинированном магнитном поле  $B_z$  и электрическом поле  $E_x$  можно записать следующим образом [8]:

$$\begin{aligned} m \, dv_x/dt + mv_x/\tau &= qE_x + qB_z v_y \\ m \, dv_y/dt + mv_y/\tau &= -qB_z v_x \\ m \, dv_z/dt + mv_z/\tau &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $m$  – масса иона,  $v$  – его скорость,  $\tau$  – время свободного пробега иона (до столкновения с какими либо другими частицами)/ Из этих уравнений ясно, что скорость дрейфа лежит в  $xy$  – плоскости и его можно выразить как  $v = v_x + iv_y$ . Учитывая, что  $B = B_{DC} + B_{AC} \exp i\omega t$ , где  $\omega$  – частота внешнего магнитного поля, получается, что

$$dv/dt + 2\beta v = \Gamma - i\Omega (1 + \varepsilon \cos \omega t)v \quad (2)$$

Здесь  $\beta = 1/2 \tau$ ,  $\Omega = qB_{DC}/m$  – циклотронная частота,  $\varepsilon = B_{AC}/B_{DC}$ ,  $\Gamma = \Omega E_x / B_{DC}$ .

Решение уравнения (2) содержит как члены, которые затухают во времени, так и периодические члены. Оставляя в уравнении члены типа резонансных, получили для скорости  $v$  серию функций Бесселя:

$$v = \Gamma \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\varepsilon \Omega/\omega) J_n(\varepsilon \Omega/\omega) / (2\beta + i\omega (\Omega/\omega - n)) \quad (3)$$

Для функции Бесселя 1-го порядка, т.е когда  $n=1$  для скорости дрейфа получается выражение

$$v = \Gamma J_1^2(\varepsilon) / 2\beta \quad (4)$$

При отходе от резонанса скорость дрейфа определяется формулой (5)

$$v = \Gamma J_1^2(\varepsilon \Omega/\omega) / [2\beta + (\omega^2/2\beta)(\Omega/\omega - 1)^2] \quad (5)$$

Для  $n=1$  имеем

$$v = q E_x \tau J_1^2(\varepsilon) / m \quad (6)$$

Подставляя в (6) численные значения  $E_x=10^6 - 10^7$  В/м,  $\tau=10^{-10}$  сек, получим для кинетической энергии пучка значение в 5 – 20 раз превышающее тепловую энергию ионов.

Полученные Либовым с соавторами формулы (4, 5) хорошо объясняют полученные эффекты в КМП, но не объясняют ни пороговых эффектов постоянного магнитного поля, ни сужения линии зависимости эффекта от отношения  $V_{AC}/V_{DC}$  при малых шумах  $V_{DC}$ .

Сравним данную гипотезу с нашей. Оба эти представления могут объяснить полученные нами ранее эффекты [1–5, 7, 9–11], если их объединить. Первый эффект – это наличие порога воздействия постоянного магнитного поля [9, 10].

Исходя из наших представлений, максимальное давление ионов на мембрану должно получаться в магнитном поле, направленном перпендикулярно потоку основных ионов, участвующих в изучаемом биологическом процессе, что приводит к возникновению новых каналов в направлении, перпендикулярном постоянному магнитному полю и параллельном направлению движения основных ионов либо увеличению их диаметра. Это в свою очередь должно приводить к возникновению пороговых биологических эффектов. С точки зрения формул (4, 5) наличие постоянного магнитного поля приводит к тому, что изменяется время затухания скорости пучка ионов  $a$ , следовательно, и к изменению потока ионов через мембрану, а значит, и к биологическим эффектам.

Комбинированное магнитное поле приводит, согласно нашим представлениям, к колебаниям мембраны в направлении, перпендикулярном магнитному полю с частотой переменной составляющей магнитного поля. Одновременно с циклотронной частотой колеблется радиус пучка ионов. Когда обе частоты совпадают, резонансно увеличивается поток ионов через мембрану. Это приводит к возникновению биологического эффекта. С точки зрения формул (4, 5) резонансно возрастает скорость дрейфа пучка ионов через мембрану.

Различие заключается в том, что Либов с соавторами учитывают большое электрическое поле мембраны и этот факт приводит к тому, что снимается основное возражение теоретиков, заключающееся в том, что энергия магнитного поля много ниже  $kT$ . Учет электрического поля мембраны, которое велико, дает величину в 5 – 20 раз большую, чем тепловая энергия  $kT$ . Т.е. основная энергия черпается из самой клетки, а комбинированное магнитное поле является спусковым механизмом для его включения.

Т.к. обе эти теории дают существенную зависимость наблюдаемых эффектов от направления движения определенных ионов, то полученные нами результаты можно трактовать следующим образом. Основное направление потока ионов кальция лежит вдоль корня: параллельно направлению его роста.

Здесь следует заметить, что, если основное направление ионов располагается вдоль направления комбинированного магнитного поля, то биологического эффекта не должно быть. Это и наблюдается нами в опыте.

Теперь постараемся объяснить расположение крахмальных зерен, подробно изученное нами в [3] в КМП. Колебания мембраны могут приводить к тому, что крахмальные зерна будут взаимодействовать с мембраной либо механически, либо

электрически. Они могут подталкиваться мембраной к центру клетки и даже дальше при колебании мембраны. Затем, если они даже и начнут оседать вниз, то попадут уже в противоположную часть клетки и, следовательно, могут изменить знак гравитропической реакции корня. Кроме того, столкновение крахмальных зерен с потоком ионов кальция должно приводить к возникновению в этих зернах дипольного момента (пьезоэлектрические свойства крахмала), направленного против электрического поля мембраны, что, по-видимому, также приводит к их движению к центру клетки на начальном этапе. В центре их энергия в электрическом поле меньше, т.к. электрическое поле в центре клетки минимально. Двигаясь к центру клетки, часть дипольных моментов начнет поворачиваться и может начать двигаться вверх, что приведет к отрицательной гравитропической реакции для корней. Т.е. в комбинированном магнитном поле гравитропическая реакция должна замедляться, или пропадать, или менять знак, если основной поток ионов направлен перпендикулярно КМП.

Пользуясь оценками Либова и нашими оценками, можно объяснить и зависимости наблюдаемого биологического эффекта от уровня внешнего магнитного шума [2, 12, 13]. Если уровень внешнего магнитного шума мал (пучок движущихся ионов не захватывает новых каналов из-за размытия ионного пучка в магнитном поле с индукцией, равной постоянной составляющей КМП), то КМП будет искажать зависимость величины биологического эффекта от отношения  $V_{AC}/V_{DC}$ , т.к. захват пучком нового канала будет сказываться резко в увеличении биологического эффекта. Линия этой зависимости будет более узкой, чем квадрат функции Бесселя [2]. При увеличении магнитного шума она будет приближаться к квадрату функции Бесселя первого порядка от  $V_{AC}/V_{DC}$ , как и определяется формулой (4). Это также хорошо совпадает с полученными нами ранее зависимостями [13].

Становится понятным также влияние экранирования внешнего магнитного поля на различные биологические процессы. Кроме эффекта, связанного с уменьшением постоянной составляющей, рассмотренного нами выше, должно существенно усилиться влияние внешних магнитных шумов. Например, при компенсации постоянной составляющей внешнего магнитного поля с помощью колец Гельмгольца или обычных ферромагнитных экранов до 10–1 мкТл [14, 15] отношение  $V_{AC}/V_{DC}$  для внешних магнитных шумов на частоте до 50 Гц равняется приблизительно 0.3–3. Следовательно, частоты до 50 Гц могут активно воздействовать на биологические процессы, т.к. большинство резонансных частот (для ионов кальция, магния, калия, меди) лежит в этой области. Магнитные бури при такой постановке эксперимента также являются активными. Поэтому уменьшение постоянной составляющей магнитного поля Земли является крайне нежелательным фактором, который может существенно изменять кальциевый, калиевый, магниевый обмен в клетке. Особенно это важно для ослабленных клеток, мембраны которых могут легко разрываться. Рассмотрим теперь возможный механизм адаптации клеток к влиянию КМП. Как хорошо видно из Рис. 9, ГТР постепенно (через 24 часа и далее) начинают восстанавливать свой знак. Увеличение транспорта кальция из клетки могут привести к тому, что концентрация

ионов магния внутри клетки возрастает. Т.к. ионы магния являются катализаторами синтеза липидов, то существенно может измениться коэффициент жесткости мембраны. Здесь следует отметить, что циклотронная частота ионов магния в постоянном магнитном поле Земли находится вблизи 50 Гц (в работах [16–18] было показано, что в КМП, постоянная составляющая которого равна магнитному полю Земли, а переменную составляющую КМП частотой 50 Гц создавали искусственно с помощью колец Гельмгольца, концентрация полярных липидов в мембране клеток редиса существенно изменялась, и при этом изменялась текучесть мембраны). Таким образом, изменение (уменьшение), коэффициента жесткости мембраны, согласно нашим предположениям, изложенным выше, может привести к уменьшению количества кальциевых каналов а, следовательно, и к увеличению концентрации ионов кальция внутри клетки.

### **ВЫВОДЫ**

1. Экспериментально показано, что гравитропическая реакция растений существенно зависит от направления корней относительно вектора комбинированного магнитного поля. При расположении корней перпендикулярно КМП и перпендикулярно силе гравитации (КМП параллельно силе гравитации) наблюдается отрицательная гравитропическая реакция. При расположении корней перпендикулярно КМП и силе гравитации (КМП перпендикулярно силе гравитации) гравитропическая реакция отсутствует. При расположении корней параллельно КМП и перпендикулярно силе гравитации (КМП перпендикулярно силе гравитации) гравитропическая реакция незначительно изменяется.
2. Полученные в этой работе эффекты и большинство полученных нами ранее результатов хорошо согласуются с гипотезами [2, 8]. Пользуясь ими можно утверждать, что основной поток ионов кальция направлен вдоль корней.
3. Существенную роль в наблюдении эффектов играет электрическое поле мембраны клетки. Учет его величины позволяет убрать все возражения теоретиков о невозможности действия магнитного поля, т.к. мала его энергия. МП и КМП являются лишь спусковым механизмом, освобождающим энергию клетки и приводящим к биологическим эффектам.
4. С помощью КМП, таким образом, можно регулировать скорость кальциевого обмена в клетке.
5. В нашем представлении механизм адаптации клеток к КМП может быть связан с ионами магния.

### **Список литературы**

1. Гравитропическая реакция растений в комбинированном (постоянном и переменном) магнитном поле // Н.И. Богатина, Н.В. Шейкина, Е.Л. Кордюм [и др.] // Доповіді НАН України. – 2002. – №4. – С. 176–179.
2. Шейкина Н.В. Влияние комбинированного магнитного поля на гравитропическую реакцию растений и спектр электромагнитного излучения, генерируемого ими в процессе роста //

- Н.В. Шейкина, Н.И. Богатина, Е.Л. Кордюм // Радиофизика и электроника. – 2005. – Т.10, №2. – С.331–335.
3. A weak combined magnetic field changes root gravitropism // N.I. Bogatina, E.L. Kordyum, Ya.M. Kalinina [et al.] // Advances in Space Research (a COSPAR information). – 2005. –V. 36, №7. – P. 1229–1236.
  4. Cyclotron-based effects on plant gravitropism // E. Kordyum, N. Bogatina, M. Sobol [et al.] // Journal of Advances in Space Reseach – 2007. – V 39, №7. – P. 1210–1218.
  5. Біологічна дія комбінованого магнітного поля на гравітропічну реакцію кореня *Lepidium Sativum* L. // Е.Л.Кордюм, Н.И. Богатина, М.А. Соболев [и др.] // Укр.ботан. журн. – 2008. – Т. 65, №1. – С. 141–157.
  6. Леднев В.В. Биоэффекты слабых комбинированных, постоянных и переменных магнитных полей // В.В. Леднев // Биофизика. – 1996. – Т.41, № 1. – С. 224–232.
  7. Шейкина Н.В. Зависимость гравитропической реакции кресс-салата от амплитуды переменной составляющей комбинированного магнитного поля / Н.В. Шейкина, Н.И. Богатина, Е.Л. Кордюм // Біофізичний Вісник (Вісник Харківського університету). – 2007 – №18(1) – С. 78–90.
  8. Vincze G. New theoretical treatment of ion resonance phenomena // G.Vincze, A. Szasz, A.R. Liboff/. Bioelectromagnetics. – 2010 – Vol. 29 – P. 380–386.
  9. Изменения гравитропической реакции, вызванные постоянным магнитным полем. // Н.И. Богатина, Н.В. Шейкина, Е.Л. Кордюм [и др.] // Біофізичний вісник. 2006. – №17(1). – С. 78–82.
  10. Определение порога чувствительности проростков и корней пшеницы к величине магнитного поля // Н.И. Богатина, Б.И. Веркин, В.М. Кулабухов [и др.] // Физиология растений – 1979 – Т. 28, №3 – С. 620–624.
  11. Богатина Н.И. Влияние слабых магнитных полей на скорость роста, сухую массу и скорость клеточной репродукции гороха // Н.И. Богатина, Б.И. Веркин // Доклады АН УССР, серия Б – 1979 – №6 – С. 460–463.
  12. Богатина Н.И. Зависимость реакции биологических объектов на магнитные поля от их шумов (полей), возможное влияние на процессы эволюции // Н.И. Богатина, В.М. Литвин, М.П. Травкин // Электронная обработка материалов. – 1987. – №4. – С. 64–69.
  13. Шейкина Н.В. Влияние внешних магнитных шумов на гравитроническую реакцию растений и на амплитуду и спектр генерируемого ими в процессе роста магнитного шума. // Н.В. Шейкина, В.А. Бондаренко, Н.И. Богатина // Біофізичний вісник. 2008. – №20(1). – С. 96–102.
  14. Демцун Н.А. Влияние электромагнитного экранирования различной продолжительности на регенерацию планарий *Dugesia Tigrina* // Н.А. Демцун, М.М. Махонина, Н.А.Темурьянц, В.С. Мартынюк // Физика живого. – 2008. – Т.16, №1. – С. 68–73.
  15. Темурьянц Н.А. Особенности регенерации планарий *Dugesia Tigrina* при их электромагнитном экранировании в различные сезоны года. // Н.А. Темурьянц, Н.А. Демцун, В.С. Мартынюк // Физика живого. – 2008. – Т.16, №2. – С. 89–91.
  16. Новицкая Г.В. Влияние переменного магнитного поля на состав и содержание липидов в проростках редиса. // Г.В. Новицкая, О.А. Церенова, Т.К. Кочешкова, Ю.И. Новицкий // Физиология растений. – 2006. – Т.53, №1. – С. 83–93.
  17. Влияние переменного магнитного поля на состав и содержание липидов семядольных листьев редиса // Г.В. Новицкая, О.А. Церенова, Т.К. Кочешкова [и др.] // Воронеж: Центрально-Черноземное книжное издательство, 2006. – Выпуск 8. – С. 23–33.
  18. The influence of combined magnetic field on the fusion of plant protoplasts // O. Nedukha, N. Bogatina, E. Kordyum [et al.] // J. Gravit. Physiol. – 2007. – Vol.14, №1. – P. 117–118.

**Богатина Н.И. Вплив орієнтації коренів відносно комбінованого магнітного поля на зміни гравітропічної реакції коренів крес-салату та кукурудзи експеримент та нова гіпотеза, механізми адаптації / Н.И. Богатина, Н.В. Шейкина, Е.Л. Кордюм // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія „Біологія, хімія”. – 2012. – Т. 25 (64), № 2. – С. 16-30.**

Експериментально доведено, що гравітропічна реакція рослин залежить від напрямку коренів відносно комбінованого магнітного поля (КМП). При розтушовуванні коренів  $\perp$  КМП і силі гравітації (КМП  $\parallel$  силі гравітації) спостерігається негативна гравітропічна реакція. При розтушовуванні коренів  $\perp$  КМП і силі гравітації (КМП  $\perp$  силі гравітації) гравітропічна реакція відсутня. При

розтушовуванні коренів  $\parallel$  КМП і  $\perp$  силі гравітації (КМП  $\perp$  силі гравітації) гравітропічна реакція не змінюється. Отримані в цій роботі ефекти добре збігаються з гіпотезами Лібова і нашої. Якщо використовувати їх, можливо стверджувати, що основний потік іонів  $\text{Ca}^{2+}$  має напрямок уздовж коренів. Значну роль в спостереженні ефектів грає електричне поле мембрани клітини. Урахування його величини дозволяє не погоджуватися з усіма запереченнями, що до неможливості дії КМП, тому що мала його енергія. КМП є лише механізмом, який звільняє енергію клітини. За допомогою КМП можливо регулювати швидкість  $\text{Ca}^{2+}$  обміну в клітині. Обговорюється можливий механізм адаптації клітин к КМП. Він пов'язаний з іонами магнію.

**Ключові слова:** комбіноване магнітне поле, циклотронна частота, гравітропічна реакція, електричне поле мембрани.

**Bogatina N.I. Influence of roots orientation relatively combined magnetic field direction on the cress and mays roots gravitropic reaction's changes. Experiment and new hypothesis. Adaptation mechanism / N.I. Bogatina, N.V. Sheykina, E.L. Kordyum // Scientific Notes of Taurida V.I. Vernadsky National University. – Series: Biology, chemistry. – 2012. – Vol. 25 (64), No 2. – P. 16-30.**

It was shown experimentally that the graviyropic reaction of plants depended on the roots direction relatively to combined magnetic field (CMF) direction. While the roots were located  $\perp$  to gravitation force (CMF was  $\parallel$  to gravitation force) the negative gravitropic reaction was observed. While the roots were located  $\perp$  to CMF (CMF was  $\perp$  to gravitation force) the gravitropic reaction was absent. . While the roots were located  $\parallel$  to CMF and  $\perp$  gravitation force (CMF was  $\perp$  to gravitation force) the gravitropic reaction didn't change. The effects obtained in the work may be explained by Liboff's and our hypotheses. By using them we can conclude that the main  $\text{Ca}^{2+}$  current was directed along the roots. The essential role in observing the effects played the electrical field of cell membrane. By taking in account the magnitude of the electrical field we could get over all theoretic objections that the effects of magnetic fields observed were impossible because its energy was very small. We think that CMF was only the switching on mechanism, which released the cell energy. By means of CMF one may regulate the calcium exchange velocity in cell. The possible mechanism of cell adaptation in CMF was discussed It is proposed to be connected with  $\text{Mg}^{2+}$  ions.

**Keywords:** combined magnetic field, cyclotron frequency, gravitropic reaction, electric field of membrane.

*Поступила в редакцію 22.04.2012 г.*