



Є.Л. КОРДЮМ¹, М.А. СОБОЛЬ¹, Я.М. КАЛІНІНА¹,
Н.І. БОГАТІНА², Н.В. ШЕЙКІНА²

¹ Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України
вул. Терещенківська, 2, м. Київ, 01001, Україна
cell@svitonline.com

² Фізико-технічний інститут низьких температур
ім. Б.І. Веркіна НАН України пр. Леніна, 47, м. Харків,
61100, Україна
bogatina@ilt.kharkov.ua

**БІОЛОГІЧНА ДІЯ
КОМБІНОВАНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ
НА ГРАВІТРОПІЧНУ РЕАКЦІЮ КОРЕНЯ
LEPIDIUM SATIVUM L.**

*К л ю ч о в і с л о в а: комбіноване магнітне поле, кальцій,
Lepidium sativum, гравістимуляція, гравітропізм, корене-
вий чохлак*

Вступ

Ростові реакції рослин під дією вектора гравітаційного поля, що визначають їх просторову орієнтацію, ріст і життєдіяльність, називають гравітропізмом. У гравітропізмі розрізняють три фази: сприйняття гравітаційного сигналу, його перетворення на біохімічний сигнал, який передається до клітин, що відповідають на сигнал, та власне росту відповідь, тобто вигин кореня або стебла. Хоча дослідження гравітропізму рослин ведуться уже тривалий час [5, 6, 13, 14, 16, 20, 22, 23, 25, 26], ряд питань щодо механізмів сприйняття і трансдукції гравітаційного стимулу, зокрема ролі іонів кальцію та цитоскелета в цих процесах, залишається дискусійним.

© Є.Л. КОРДЮМ,
М.А. СОБОЛЬ,
Я.М. КАЛІНІНА,
Н.І. БОГАТІНА,
Н.В. ШЕЙКІНА, 2008

Тому необхідні нові експериментальні підходи для з'ясування ролі кальцію у гравітропічній реакції рослин.

У 1985 р. Блекмен та Лібов незалежно один від одного запропонували модель іонного циклотронного резонансу, який, на їхню думку, лежить в основі біологічних ефектів слабких комбінованих магнітних полів з частотою, резонансною циклотронній частоті окремих іонів [4, 17]. Ми вперше показали, що комбіноване магнітне поле (КМП) з частотою, резонансною циклотронній частоті іонів кальцію, впливає на гравітропізм кореня [15]. Тому метою даної роботи було подальше вивчення гравітропічної реакції кореня в такому КМП з використанням світлової та конфокальної лазерної мікроскопії. Особливу увагу приділяли розподілу іонів Ca^{2+} в дистальній зоні розтягнення кореня під час гравістимуляції у стаціонарних умовах та КМП.

Матеріал і методи досліджень

В експериментах використано дводобові проростки *Lepidium sativum* L. Насіння пророщували в чистій дистильованій воді або з додаванням 0,44 г/л CaCl_2 . Проростки в горизонтальному положенні (гравістимуляція) вміщували у вологу камеру всередині пермалоевого екрана (рис. 1) з КМП у темряві при 21 ± 1 °С. Контролем були проростки, вміщені в такий самий екран з постійним магнітним полем (ПМП). Експерименти повторювали тричі для

кожних умов.

ПМП дорівнювало 40 мкТл, що приблизно відповідає величині геомагнітного поля. Змінне магнітне поле, яке створювали з використанням соленоїдів, мало частоту 32 Гц, резонансну циклотронній частоті іонів кальцію, обчислену за формулою:

$$f_c = qV/2\pi m,$$

де q — заряд іона ($q = 2e$ для Ca^{2+}), e — заряд електрона, V — магнітна індукція, m — маса іона.

Параметри КМП контролювали за допомогою ферозондового магнітометра та надпровідного квантового інтерференційного детектора.

Для світлової мікроскопії апекси коренів (завдовжки 5 мм) фіксували в 1 %-му глютаральдегіді та 5 %-му формальдегіді



Рис. 1. Пермалоевий екран
Fig. 1. μ -metal magnetic shield

(1:1) на какодилатному буфері (рН 7,2) після 15, 30 та 60 хв. гравістимуляції в ПМП і КМП. Зразки постфіксували в 1 %-му OsO_4 за кімнатної температури, дегідрували в етанолі та серіях ацетону і заливали в суміш смол епо-ну та аралдиту. Напівтонкі зрізи товщиною 2 мкм отримували на ультрамікроскопі МТ-XL (RMC), фарбували реактивом Шиффа і толуїдиновим блакитним та досліджували у світловому мікроскопі Axioscope (Carl Zeiss, Німеччина).

Для конфокальної мікроскопії проростки інкубували у кальційспецифічному флуоресцентному барвнику fluo-4 (Molecular Probes, США) протягом 25 хв. у темряві перед гравістимуляцією в ПМП і КМП. Матричний розчин індикатора готували в концентрації 1 мМ у безводному диметилсульфоксиді (DMSO) за [10]. Остаточна концентрація завантажувального розчину індикатора становила 8 мкМ, кінцевий об'єм — 1 мл. Дослідження проводили в конфокальному лазерному сканувальному мікроскопі LSM 5 Pascal (Carl Zeiss, Німеччини) за довжину хвилі збудження 494 нм, а хвилі емісії — 516 нм. Дистальну зону розтягнення (ДЗР) довжиною ~400 мкм (на відстані ~800 мкм від кореневого апекса) сканували поперек кореня у напрямку від верхнього до нижнього боку гравістимульованого кореня. Ми представляємо середню інтенсивність флуоресценції в першій половині (200 мкм) ДЗР, починаючи від меристеми, та в другій половині (200 мкм) ДЗР. Кожну половину ДЗР сканували двічі на відстані 100 мкм. Дані щодо розподілу та відносного вмісту іонів кальцію у клітинах отримували з використанням програмного забезпечення «Pascal», яке дозволяє кольорово кодувати інтенсивність флуоресценції іонів кальцію після обробки індикатором. Інтенсивність флуоресценції прямо корелює з концентрацією цитозольного кальцію за відповідної довжини хвилі емісії [8, 18, 19, 21].

Результати досліджень та їх обговорення

Мікроскопічний аналіз. Результати досліджень підтвердили попередні дані [15] щодо зміни спрямування гравітропічної реакції кореня з позитивного (рис. 2, а, б) на негативне (рис. 2, в, г). Після 15 хв. гравістимуляції у ПМП і КМП амілопласти змінювали своє положення у статочитах кореневого чохла. Після 30 хв. гравістимуляції в контролі амілопласти-статоліти переміщувалися до фізично нижнього боку статочитів. У КМП амілопласти мали тенденцію скупчуватися в центрі статочитів, часто розподіляючись уздовж довгої осі клітини (положення амілопластів було подібним до такого за умов мікрогравітації). Після 60 хв. гравістимуляції у ПМП амілопласти розташовувалися у дистальній частині статочитів. У КМП амілопласти-статоліти локалізувалися біля однієї з поздовжніх стінок клітин (рис. 3). Ядро залишалося у проксимальній частині статочита під час гравістимуляції в ПМП і КМП. Актинові філаменти, які оточували ядро та амілопласти у статочитах, у ПМП та КМП розташовувалися однаково.

Результати проведених нами експериментів підтверджують функціонування амілопластів як статолітів у статочитах кореневого чохла.

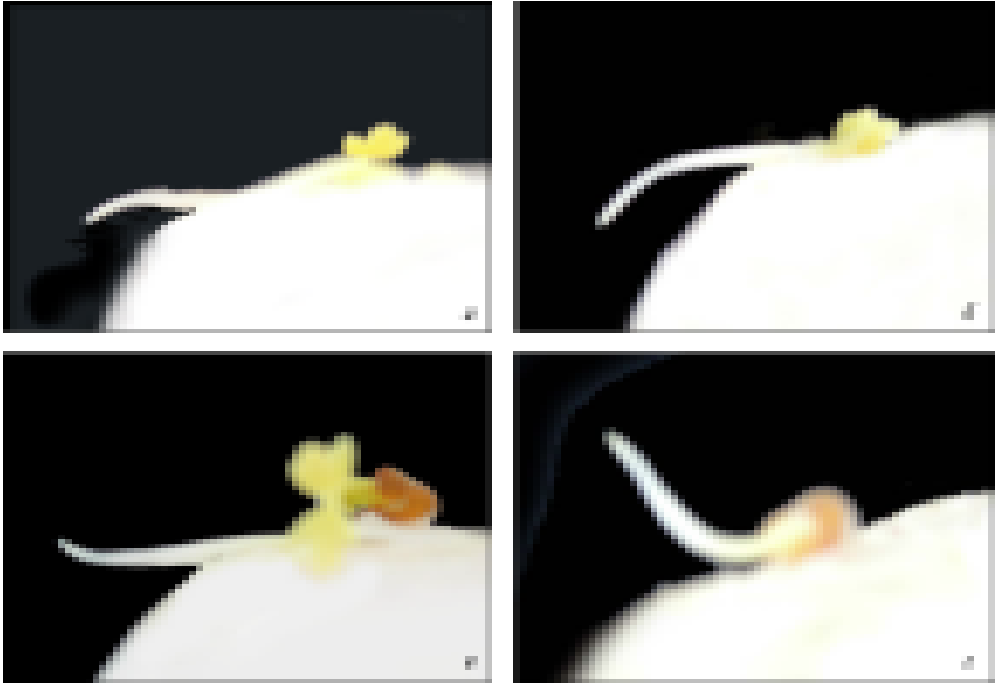


Рис. 2. Проростки *Lepidium sativum* L. через 30 хв. (а, в) та 1 год. (б, г) гравістимуляції у ПМП (а, б) і КМП (в, г)

Fig. 2. *Lepidium sativum* L seedlings after 30 min (а, в) and 1 hour (б, г) of gravistimulation in SMF (а, б) and CMF (в, г)

Розподіл іонів кальцію в дистальній зоні розтягнення кореня. Ми дослідили розподіл іонів Ca^{2+} у дистальній зоні розтягнення, оскільки саме тут відбувається гравітропічний вигин. Клітини ДЗР ростуть поволі за рахунок збільшення обсягу цитоплазми. Вони розташовані між апікальною меристемою та зоною швидкого росту клітин — так званою центральною зоною розтягнення [2, 12]. Головною відмінною ознакою клітин ДЗР є специфічні фізіологічні властивості, зокрема чутливість до різних ендогенних сигналів і екзогенних факторів, таких як етилен, позаклітинний кальцій, механічний тиск, водний і сольовий стреси, гравітація, алюміній та мікроорганізми. Клітини ДЗР відіграють важливу роль у гравітропізмі [1, 3, 7, 11, 12].

Іони кальцію у присутності специфічного флуоресцентного індикатора яскраво флуоресціювали зеленим у шарах епідермісу та кори кореня. Через 10 хв. гравістимуляції в першій половині ДЗР відношення між інтенсивністю флуоресценції на нижньому та верхньому боках гравістимульованого кореня дорівнювало 1,6 у контролі, в постійному магнітному полі (ПМП) (табл. 1, рис. 4, а), тимчасом як у КМП — 0,8 (табл. 1, рис. 4, б). Якщо проростки росли у воді з CaCl_2 , ці відношення для першої половини ДЗР у ПМП і КМП дорівнювали 1,5 та 0,8, відповідно (табл. 1). У контролі, у другій половині ДЗР, відношення між інтенсивністю флуоресценції на нижньому та

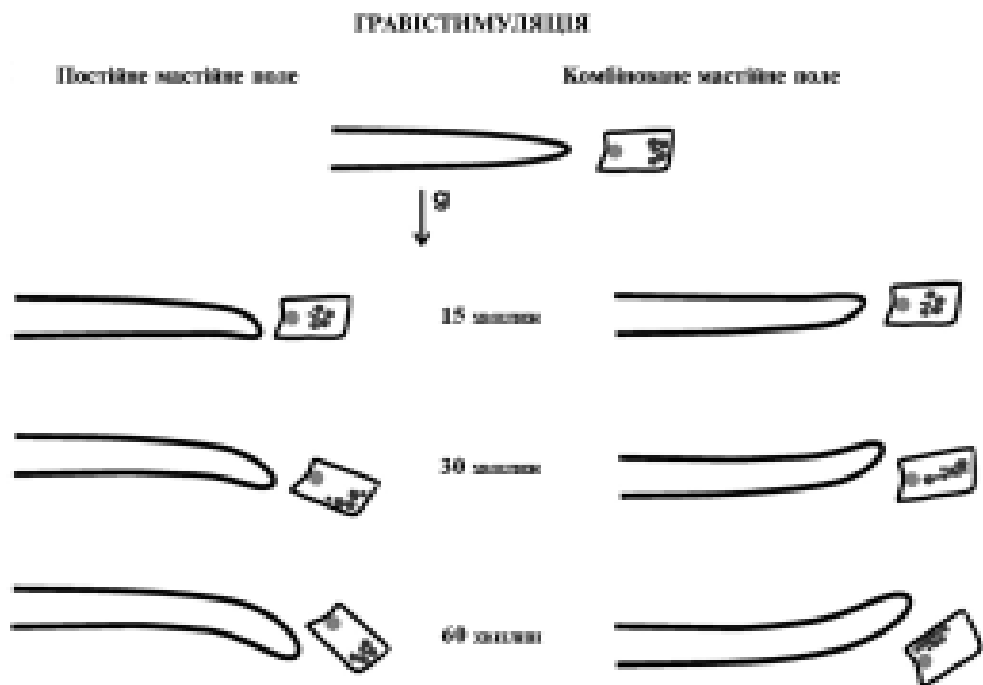


Рис. 3. Розташування амілопластів у статоцитах після 15, 30 та 60 хв. гравістимуляції у ПМП і КМП

Fig. 3. Amyloplast arrangement in statocytes after 15, 30, and 60 min of gravistimulation in SMF and CMF

Таблиця 1. Інтенсивність флуоресценції іонів кальцію, зв'язаних зі специфічним флуоресцентним індикатором флюо-4, у ДЗР після 10 хв. гравістимуляції, ум. од.

Умови гравістимуляції	ДЗР		Середовище для проростків	
			вода	вода з CaCl ₂
ПМП	перша половина	верх	115,91±3,31	149,75±2,43
		низ	184,43±5,51	230,59±3,47
	друга половина	верх	130,59±2,26	72,37±1,13
		низ	194,59±3,08	221,05±2,86
КМП	перша половина	верх	155,07±4,07***	232,83±3,45***
		низ	116,24±2,36***	92,26±2,98***
	друга половина	верх	159,32±3,53***	193,77±2,67***
		низ	100,84±2,41***	128,39±2,23***

Примітки (тут і в таблицях 2, 3). Середнє ± стандартне відхилення; *** $p < 0,001$ для всіх значень; «верх» та «низ» означають верхній та нижній боки гравістимульованого кореня.

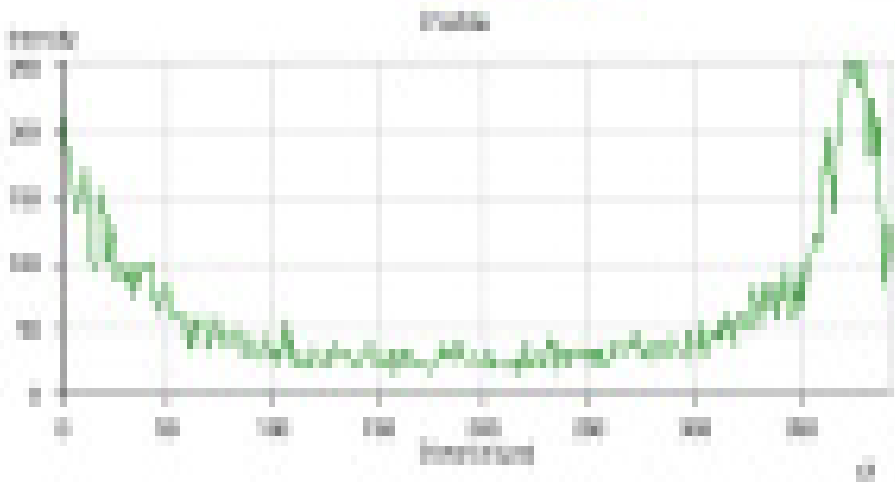
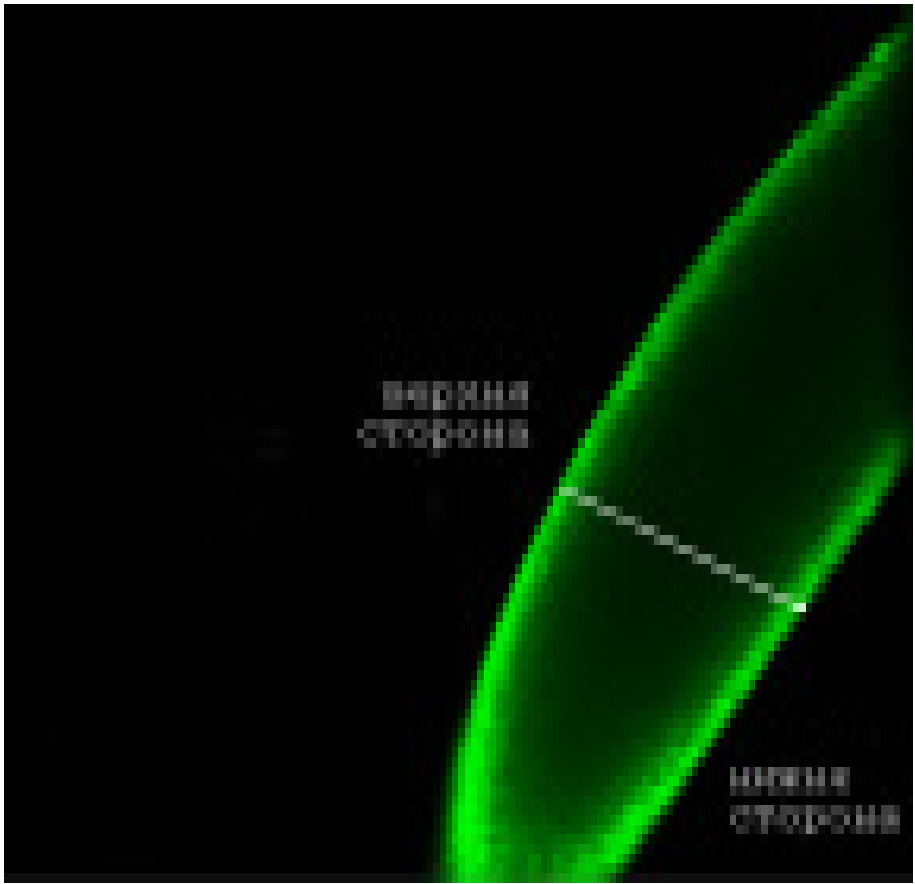


Рис. 4. Інтенсивність флуоресценції іонів кальцію після 10 хв. гравістимуляції у першій половині дистальної зони розтягнення коренів, візуалізованих з використанням конфокальної лазерної сканувальної мікроскопії: *a* – ПМП, *б* – КМП

Fig. 4. Fluorescent intensity of calcium ions after 10 min. of gravistimulation in the first half of a root distal elongation zone visualized with confocal laser scanning microscopy: *a* – SMF, *б* – CMF

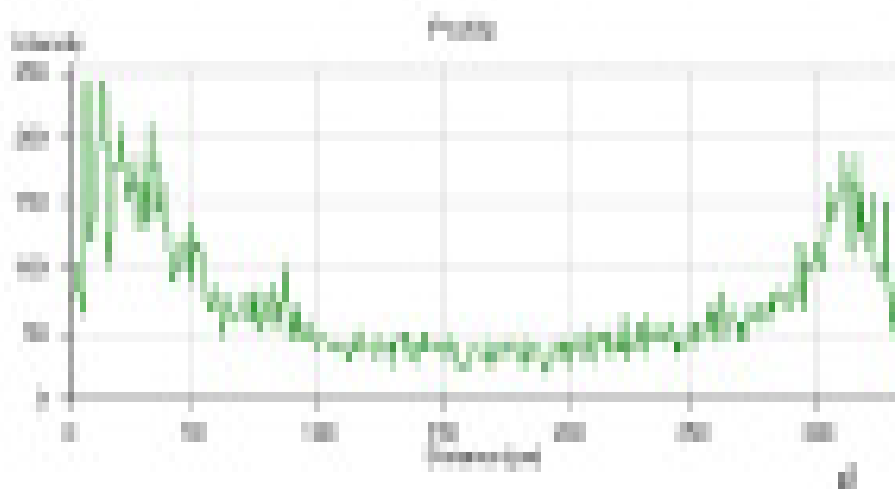
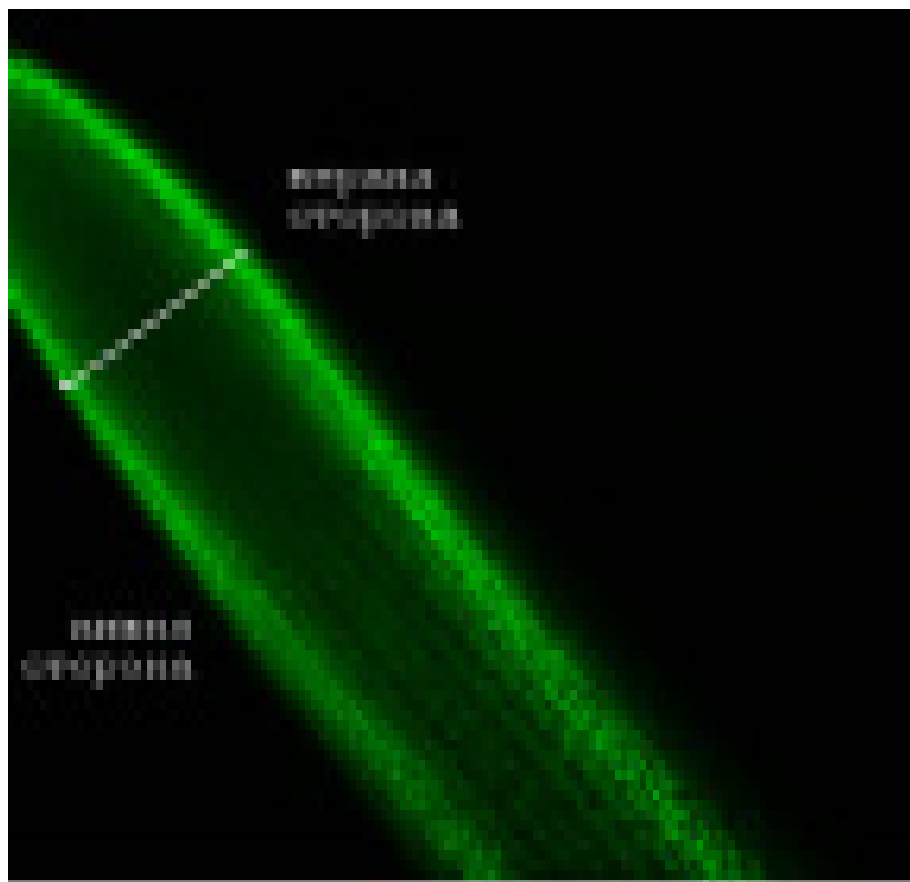


Рис. 4, б

верхньому боках гравістимульованого кореня, який виріс у воді, було 1,5 (табл. 1). Для другої половини ДЗР коренів, що зазнали впливу КМП, відношення між інтенсивністю флуоресценції на нижньому та верхньому боках гравістимульованого кореня дорівнювало 0,6 (табл. 1). У другій половині ДЗР для рослин, оброблених CaCl_2 під час вирощування, відношення між інтенсивністю флуоресценції на нижньому та верхньому боках гравістимульованого кореня було 3,1 і 0,7 — у контролі та в КМП, відповідно (табл. 1).

Після 20 хв. гравістимуляції в першій половині ДЗР відношення інтенсивності флуоресценції на нижньому та верхньому боках гравістимульованого кореня у ПМП і КМП для проростків, які виростили у воді, дорівнювало 1,7 та 0,6, відповідно (табл. 2, рис. 5, а, б). У присутності зовнішнього Ca^{2+} цей показник дорівнював 1,7 та 0,7 для гравістимульованих коренів, які зазнали впливу ПМП та КМП, відповідно. У другій половині ДЗР таке відношення збільшувалося до 2,2 для гравістимульованих коренів у ПМП та зменшувалося до 0,5 — у КМП. За наявності CaCl_2 відношення інтенсивності флуоресценції у другій половині ДЗР гравістимульованих коренів у ПМП і КМП становило 2,0 та 0,6, відповідно (табл. 2).

Після 30 хв. гравістимуляції в першій половині ДЗР відношення між інтенсивністю флуоресценції на нижньому та верхньому боках гравістимульованого кореня зменшувалося до 1,2 порівняно з обома попередніми часовими інтервалами для коренів у ПМП (табл. 3, рис. 6, а). Відношення інтенсивності флуоресценції на нижньому та верхньому боках гравістимульованого кореня після 30 хв. у КМП (0,5) було подібним до такого для 20-хвилинного інтервалу (0,5) та меншим за значення при гравістимуляції протягом 10 хв. (0,6) (табл. 3, рис. 6, б). Якщо проростки росли у воді з CaCl_2 , відношення інтенсивності флуоресценції в першій половині ДЗР за умов ПМП зменшувалося до 1,3 порівняно з попередніми часовими інтервалами, а для коренів,

Таблиця 2. Інтенсивність флуоресценції іонів кальцію, зв'язаних зі специфічним флуоресцентним індикатором флюо-4, в ДЗР після 20 хв. гравістимуляції, ум. од.

Умови гравістимуляції	ДЗР		Середовище для проростків	
			вода	вода з CaCl_2
ПМП	перша половина	верх	99,04±3,00	102,41±1,96
		низ	169,10±4,09	174,85±2,72
	друга половина	верх	74,48±2,28	102,30±1,31
		низ	164,64±3,04	202,43±2,52
КМП	перша половина	верх	181,69±3,40***	220,29±3,12***
		низ	107,80±1,69***	153,35±2,18***
	друга половина	верх	126,78±3,53***	195,44±2,71***
		низ	66,57±1,36***	119,12±1,97***

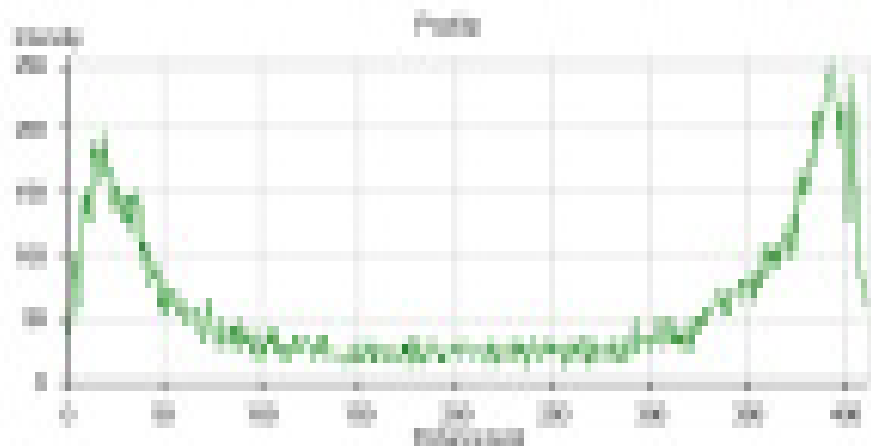
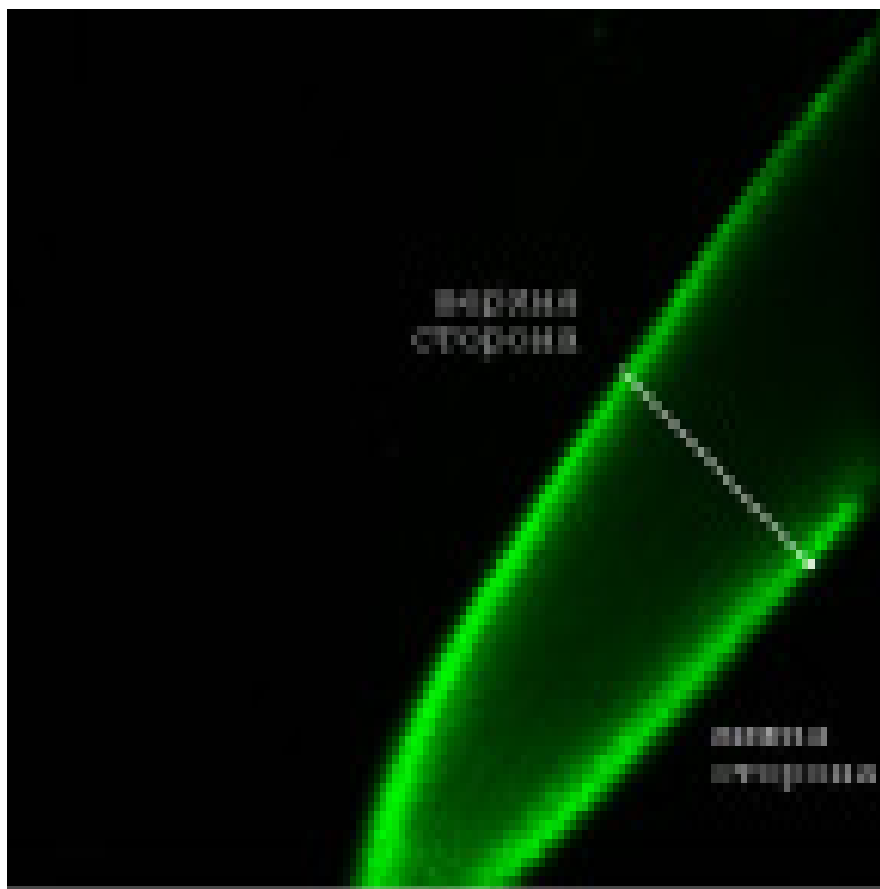


Рис. 5. Інтенсивність флуоресценції іонів кальцію після 20 хв. гравістимуляції в першій половині дистальної зони розтягнення коренів, візуалізованих з використанням конфокальної лазерної сканувальної мікроскопії: *a* – ПМП, *б* – КМП

Fig. 5. Fluorescent intensity of calcium ions after 20 min of gravistimulation in the first half of a root distal elongation zone visualized with confocal laser scanning microscopy: *a* – SMF, *б* – CMF

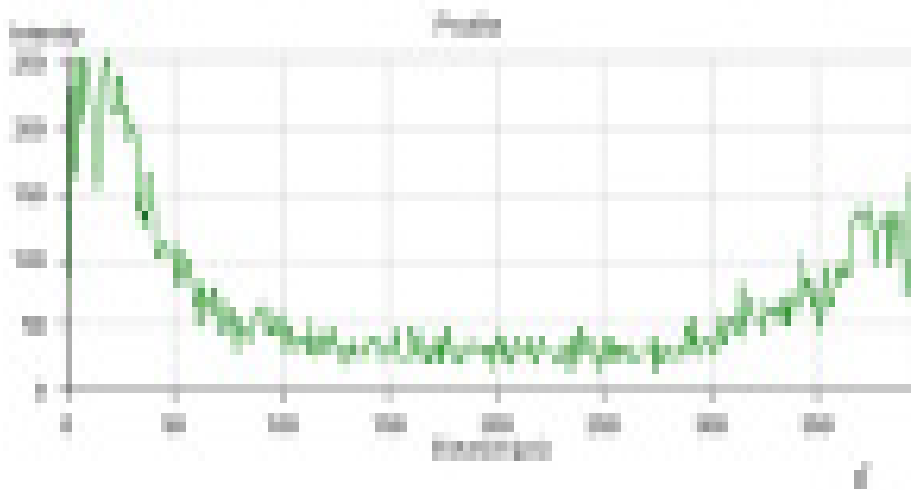
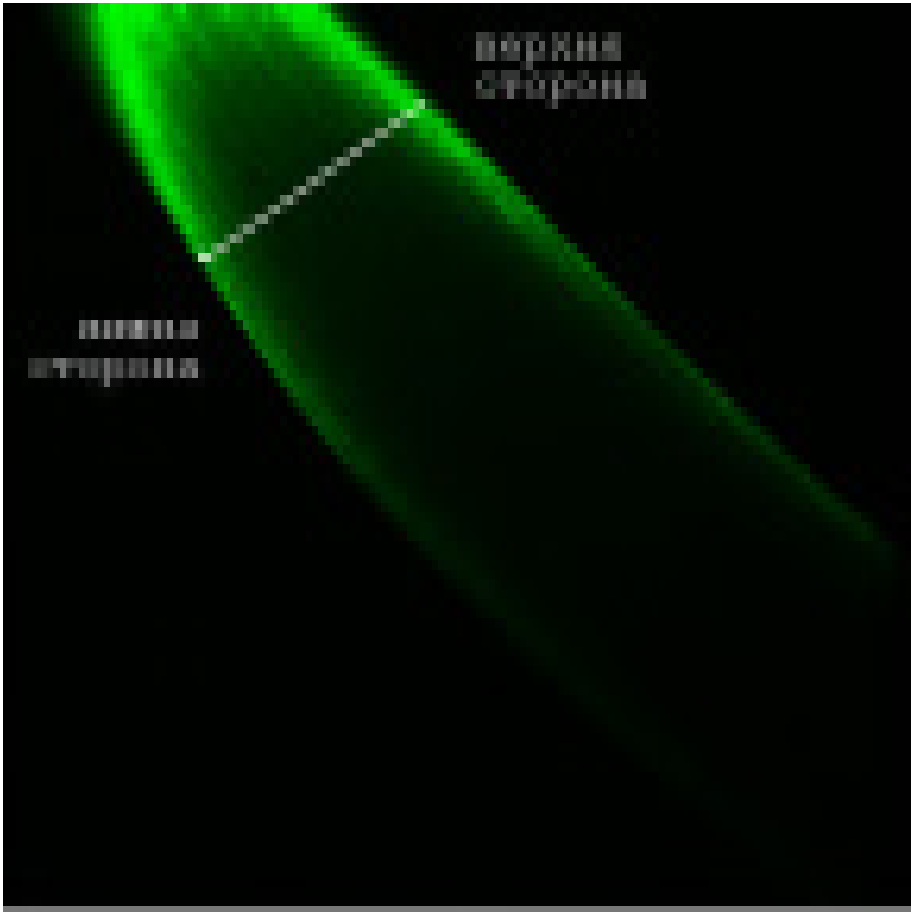


Рис. 5, б

підданих дії КМП, це відношення коливалося протягом зміни часу гравістимуляції (таблиці 1—3). Для другої половини ДЗР коренів, що виростили у воді, як і в першій половині ДЗР, відношення інтенсивності флуоресценції зменшувалося до 1,5 у ПМП (табл. 3). Відношення між інтенсивністю флуоресценції на нижньому та верхньому боках гравістимульованого кореня дорівнювало 0,5 за умов КМП (табл. 3). Після 30 хв. у другій половині ДЗР цей показник на нижньому та верхньому боках гравістимульованих коренів, оброблених під час вирощування CaCl_2 , становив 1,8 та 0,6 для ПМП і КМП, відповідно (табл. 3).

Таблиця 3. Інтенсивність флуоресценції іонів кальцію, зв'язаних зі специфічним флуоресцентним індикатором флюо-4, у ДЗР після 30 хв. гравістимуляції, ум. од.

Умови гравістимуляції	ДЗР		Середовище для проростків	
			вода	вода з CaCl_2
ПМП	перша половина	верх	119,48±2,39	160,58±2,54
		низ	145,82±3,75	215,31±3,02
	друга половина	верх	92,96±2,16	119,07±1,54
		низ	138,92±2,87	214,19±2,74
КМП	перша половина	верх	186,63±3,33***	227,90±3,13***
		низ	112,94±2,25***	170,33±2,44***
	друга половина	верх	149,95±3,53***	202,19±2,83***
		низ	79,23±2,01***	127,49±1,69***

Отже, показано, що негативна гравітропічна реакція кореня в КМП має ознаки нормального фізіологічного процесу (рис. 7).

Як відомо, гравістимуляція ініціює швидкий рух іонів Ca^{2+} до нижнього боку кореня [24]. В результаті концентрація кальцію в стінці підвищується в зоні, де меншою є швидкість росту, та знижується в зоні прискореного росту [18, 20]. Було показано, що висока концентрація кальцію у тканині суттєво інгібує ріст її клітин [9].

Ми вперше показали, що при гравістимуляції в КМП відносний вміст Ca^{2+} у дистальній зоні розтягнення вищий на верхньому, увігнутому боці гравістимульованого кореня, коли проростки росли у чистій воді або з CaCl_2 . До того ж відношення між концентрацією іонів кальцію на нижньому та верхньому боках гравістимульованого кореня в КМП менше за таке у контролі. Присутність зовнішнього Ca^{2+} у воді під час росту проростків збільшувала відношення концентрації іонів кальцію на нижньому та верхньому боках гравістимульованого кореня в ПМП і КМП.

Перша половина ДЗР характеризувалася зниженим латеральним перерозподілом іонів кальцію порівняно з другою незалежно від умов гравістиму-

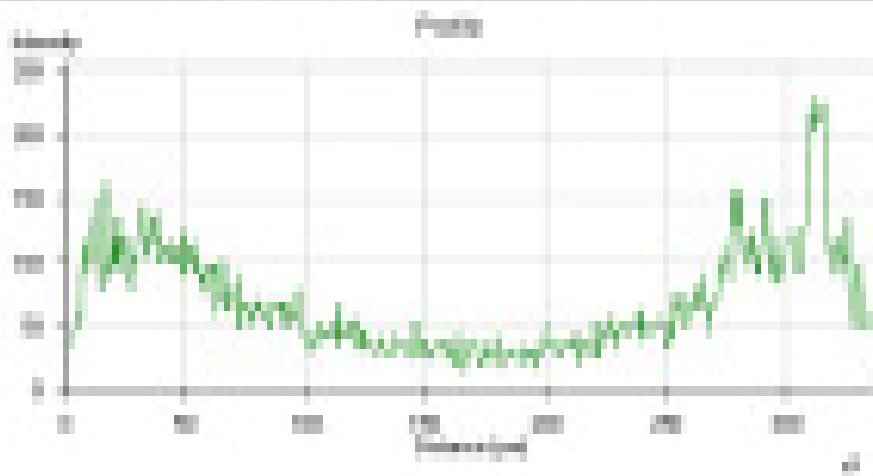
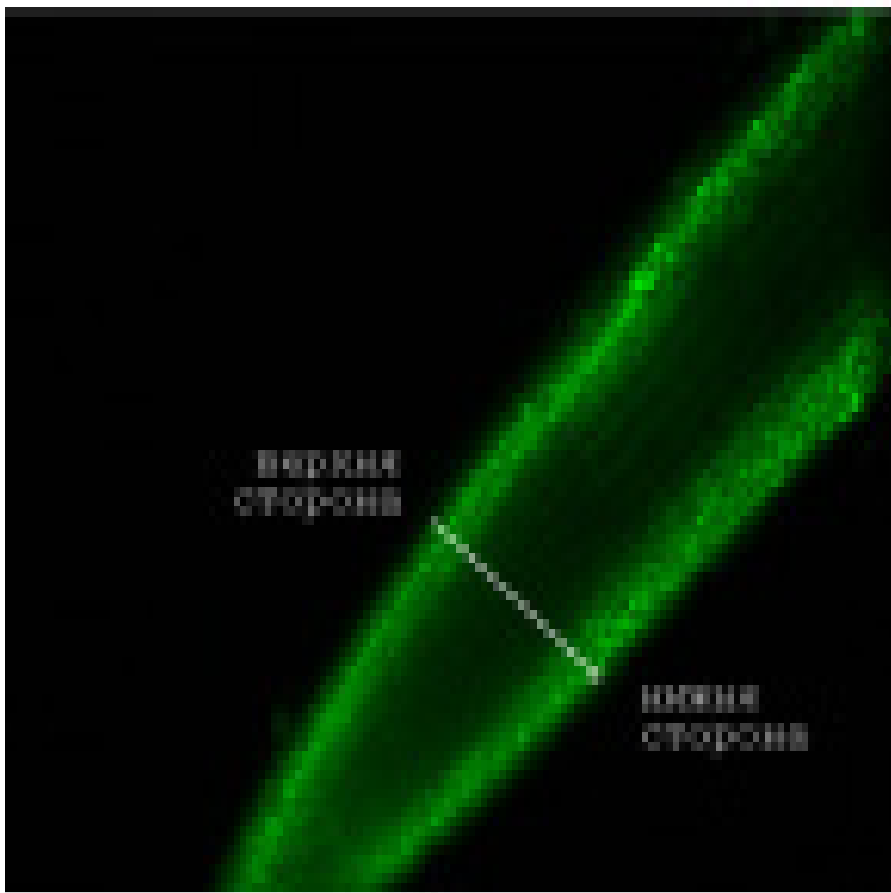


Рис. 6. Інтенсивність флуоресценції іонів кальцію після 30 хв. гравістимуляції у першій половині дистальної зони розтягнення коренів, візуалізованих з використанням конфокальної лазерної сканувальної мікроскопії: *a* – ПМП, *б* – КМП

Fig. 6. Fluorescent intensity of calcium ions after 30 min. of gravistimulation in the first half of a root distal elongation zone visualized with confocal laser scanning microscopy: *a* – SMF, *б* – CMF

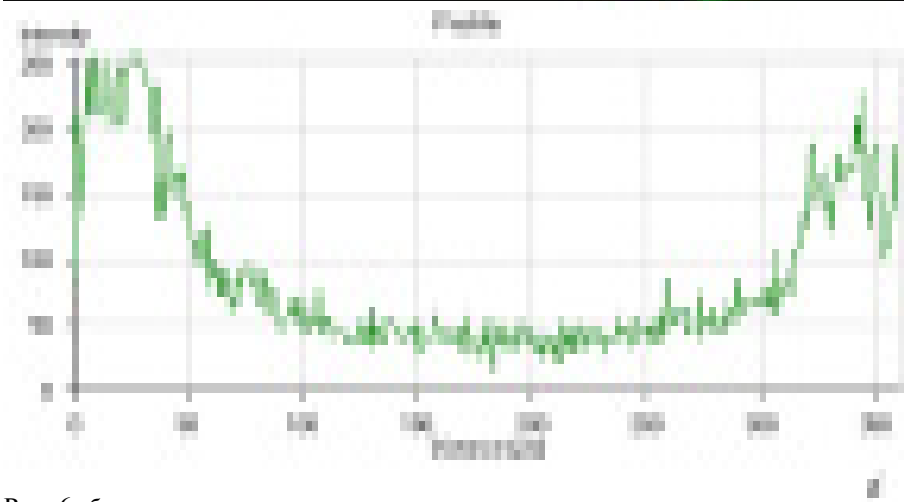
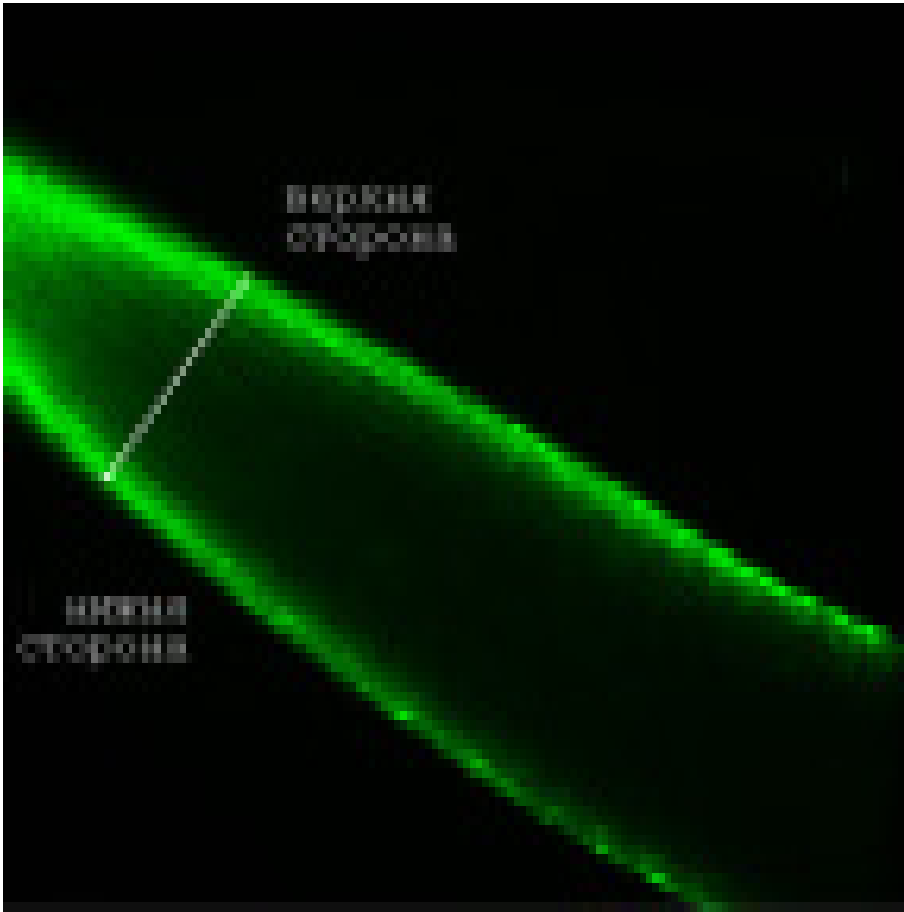


Рис. 6, б

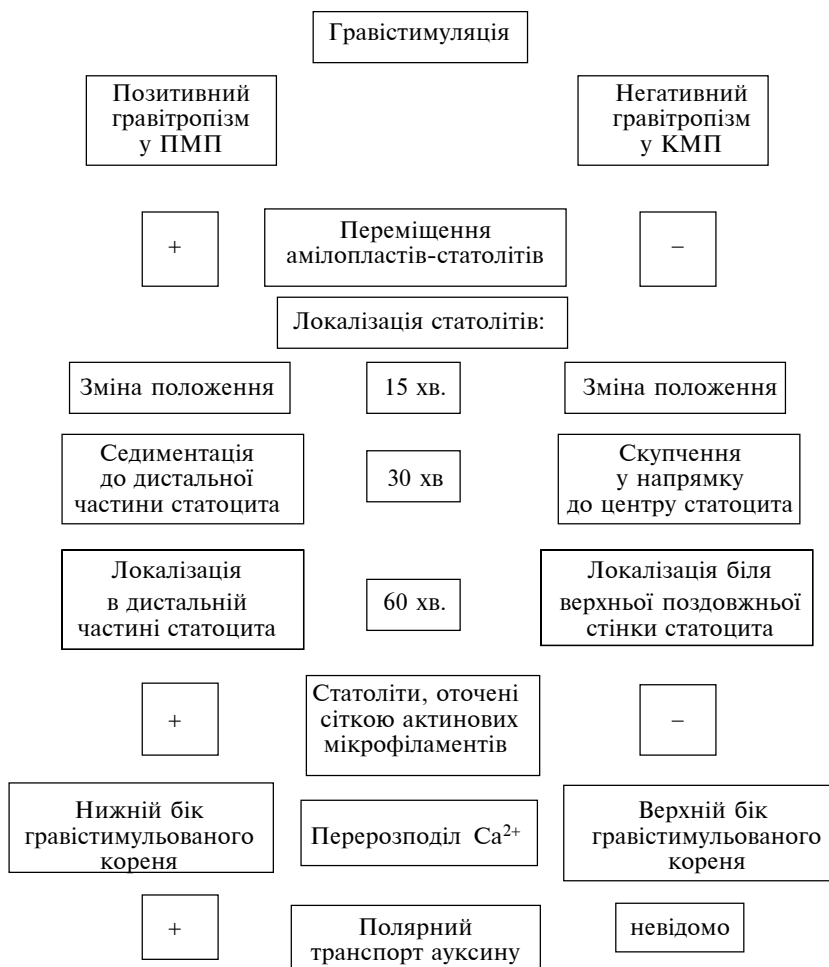


Рис. 7. Гравітропічна реакція коренів у ПМП та КМП

Fig. 7. Root gravitropic reaction in SMF and CMF

ляції (у ПМП чи КМП) та вирощування проростків (у чистій воді чи з $CaCl_2$). В обох половинах ДЗР найпомітніший перерозподіл Ca^{2+} виявлено після 10 та 20 хв. гравістимуляції в контролі (ПМП), незалежно від умов вирощування. У КМП найвиразніший латеральний перерозподіл Ca^{2+} спостерігали після 30 хв. гравістимуляції.

Припускається, що в умовах комбінованого магнітного поля з частотою, резонансною циклотронній частоті іонів кальцію, зростає енергія іонів і, отже, змінюється швидкість обертання та/або напрям іонних потоків у коренях проростків *L. sativum*, що, на нашу думку, відповідає моделі іонного циклотронного резонансу в біосистемах, запропонованій Лібовим [17]. Ми припускаємо також, що при гравістимуляції в КМП підвищується «чутливість» іонів кальцію до напрямку гравітаційного вектора. Біоелектричні градієнти,

які створюються в результаті транспорту іонів Ca^{2+} та H^+ крізь мембрани та спричинюються гравістимуляцією осьових органів [24], можуть також змінюватися у КМП.

Таким чином, одержані результати чітко демонструють участь іонів кальцію в гравітропічній реакції рослин. Подальші дослідження мають спрямовуватися на встановлення механізмів латерального перерозподілу іонів Ca^{2+} у відповідь на гравістимуляцію.

Використання моделі негативної гравітропічної реакції коренів у КМП з частотою, резонансною циклотронній частоті іонів Ca^{2+} , є перспективним для подальшого вивчення механізмів гравітропізму рослин, зокрема ролі іонів кальцію в їх ростових реакціях.

Висновки

1. Позитивна гравітропічна реакція коренів у КМП з частотою, резонансною циклотронній частоті іонів кальцію, змінюється на негативну. Реакція відбувається звичайним фізіологічним чином, що проявляється у згині кореня, але у напрямі, протилежному гравітаційному вектору.
2. Модель негативної гравітропічної реакції в КМП з частотою, резонансною циклотронній частоті іонів Ca^{2+} , рекомендується як нова та перспективна для майбутніх досліджень механізмів гравітропізму та ролі іонів Ca^{2+} у фізіологічних реакціях росту рослин.

1. *Baluska F., Barlow P.W., Kubica S.* Importance of post-mitotic isodiametric growth (PIG) region for growth and developmental of roots // *Plant Soil*. — 1994. — **167**. — P. 31–41.
2. *Baluska F., Kubica S., Hauskrecht M.* Postmitotic «isodiametric» cell growth in the maize root apex // *Planta*. — 1990. — **181**. — P. 269–274.
3. *Baluska F., Volkmann D., Barlow P.W.* A polarity crossroad in the transition growth zone of maize root apices: cytoskeletal and developmental implications // *J. Plant Growth Regul.* — 2001. — **20**. — P. 170–181.
4. *Blackman C.F., Benane S.G., Rabinowitz J.R. et al.* A role for the magnetic field in the radiation-induced efflux of calcium ions from brain tissue *in vitro* // *Bioelectromagnetics*. — 1985. — **6**. — P. 327–337.
5. *Braun M., Limbach C.* Rhizoids and protonemata of characean algae: model cells for research on polarized growth and plant gravity sensing // *Protoplasma*. — 2006. — **229**. — P. 133–142.
6. *Busch M.B., Kortje K.H., Rahmann H. et al.* Characteristic and differential calcium signals from cell structures of the root cap detected by energy-filtering electron microscopy (EELS/ESI) // *Eur. J. Cell Biol.* — 1993. — **60**. — P. 88–100.
7. *Fasano J., Swanson S., Blancaflor E. et al.* Changes in root cap pH are required for the gravity response of the *Arabidopsis* root // *Plant Cell*. — 2001. — P. 907–921.
8. *Franklin-Tong V.E., Hackett G., Hepler P.K.* Ratio-imaging of Ca^{2+}_i in the self-incompatibility response in pollen tubes of *Papaver rhoeas* // *The Plant J*. — 1997. — **12**. — P. 1375–1386.
9. *Hasenstein K.H., Evans M.L.* Calcium dependence of rapid auxin action in maize roots // *Plant Physiol.* — 1986. — **81**. — P. 439–443.
10. *Haugland R.P.* Handbook of Fluorescent Probes and Research Products. — Molecular Probes, USA, 9th ed., 2002. — 966 p.
11. *Ishikawa H., Evans M.L.* The role of the distal elongation zone in the response of maize roots to auxin and gravity // *Plant Physiol.* — 1993. — **102**. — P. 1203–1210.

12. *Ishikawa H., Evans M.L.* Specialized zone of development of roots // *Plant Physiol.* — 1995. — **109**. — P. 725—727.
13. *Knight H.* Calcium signaling during abiotic stress in plants // *Int. Rev. Cytol.* — 2000. — **195**. — P. 269—324.
14. *Kordyum E.L.* Calcium signaling in plant cells in altered gravity // *Adv. Space Res.* — 2003. — **32**. — P. 1621—1630.
15. *Kordyum E.L., Bogatina N.I., Kalinina Ya.M.* A weak combined magnetic field changes root gravitropism // *Adv. Space Res.* — 2005. — **36**. — P. 1229—1236.
16. *Lee J.S., Mulkley T.J., Evans M.L.* Gravity induced polar transport of calcium across root tips in maize // *Plant Physiol.* — 1983. — **73**. — P. 873—876.
17. *Liboff A.R.* Geomagnetic cyclotron resonance in living cells // *J. Biol. Physics.* — 1985. — **13**. — P. 99—102.
18. *McAinsh M.R., Brownlee C., Hetherington A.M.* Visualising changes in cytosolic-free Ca^{2+} during the response of stomata guard cells to abscisic acid // *Plant Cell.* — 1992. — **4**. — P. 1113—1122.
19. *McAinsh M.R., Webb A.A.R., Taylor J.E. et al.* Stimulus-induced oscillations in guard cell cytosolic-free calcium // *Plant Cell.* — 1995. — **7**. — P. 1207—1219.
20. *Moore R.* Movements of calcium across tips of primary and lateral roots of *Phaseolus vulgaris* // *Am. J. Bot.* — 1985. — **72**. — P. 785—787.
21. *Ng C.K.Y., McAinsh M.R.* Encoding specificity in plant calcium signaling: hot-spotting the ups and downs and waves // *Ann. Bot.* — 2003. — **92**. — P. 477—485.
22. *Roux S.J.* Calcium as mediator of plants' directional growth response to gravity // *Fundamentals of Space Biology.* — Tokyo: Jap. Sci. Soc. Press, 1990. — P. 57—67.
23. *Sinclair W., Trewavas A.J.* Calcium in gravitropism. A re-examination // *Planta.* — 1997. — **203**. — P. 85—90.
24. *Slocum R.D., Roux S.J.* Cellular and subcellular localization of calcium in gravistimulated oat coleoptiles and its possible significance in the establishment of tropic curvature // *Planta.* — 1983. — **157**. — P. 481—492.
25. *Wendt M., Sievers A.* The polarity of statocytes and the gravisensitivity of roots are dependant on the concentration of calcium in statocytes // *Plant Cell Physiol.* — 1989. — **30**. — P. 929—932.
26. *White P.J., Broadley M.* Calcium in plants // *Ann. Bot.* — 2003. — **92**. — P. 487—511.

Рекомендує до друку
І.В. Косаківська

Надійшла 26.06.2007

Е.Л. Кордюм¹, М.А. Соболев¹, Я.М. Калинина¹, Н.И. Богатина², Н.В. Шейкина²

¹ Інститут ботаніки ім. Н.Г. Холодного НАН України, г. Київ

² Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.И. Веркіна НАН України, г. Харків

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ КОМБИНИРОВАННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГРАВИТРОПИЧЕСКУЮ РЕАКЦИЮ КОРНЯ *LEPIDIUM SATIVUM* L.

Общеизвестно, что первичные корни проявляют позитивный гравитропизм и растут в направлении вектора гравитации, в то время как стебли являются негативно гравитропными и растут в противоположном направлении относительно гравитационного вектора. Мы впервые продемонстрировали, что использование слабого комбинированного магнитного поля (КМП), которое состоит из постоянного и переменного магнитных полей с частотой, резонансной циклотронной частоте ионов кальция, может изменять гравитропическую реакцию корня с позитивной на негативную. Двусуточные проростки *Lepidium*

sativum L. (*Brassicaceae* Burnett) гравистимулировали в камере, размещенной внутри пермалоидного экрана, где создавалось КМП. Используя эту «новую модель» гравитропической реакции корня, мы изучали некоторые ее компоненты, включая движение амилопластов-статолигов в статочитах и распределение ионов Ca^{2+} в дистальной зоне растяжения во время гравистимуляции.

В отличие от контроля, амилопласты не седиментировали в направлении дистальной части статочита в проростках в КМП, ионы кальция аккумулировались на верхней стороне гравистимулированного корня. В корнях проростков под влиянием КМП гравитропическая реакция имела признаки нормального физиологического процесса, но в результате корни изгибались в противоположном направлении. Эти результаты подтверждают участие амилопластов-статолигов и ионов кальция в гравитропической реакции растений.

К л ю ч е в ы е с л о в а: комбинированное магнитное поле, кальций, *Lepidium sativum*, гравистимуляция, гравитропизм, корневой чехлик

E.L. Kordyum¹, M.A. Sobol¹, I.A.M. Kalinina¹, N.I. Bogatina², N.V. Sheykina²

¹ Institute of Botany, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

² Institute for Low Temperature Physics & Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov

BIOLOGICAL EFFECTS OF THE COMBINED MAGNETIC FIELD ON A *LEPIDIUM SATIVUM* L. ROOT GRAVITROPIC REACTION

Primary roots exhibit positive gravitropism and grow in the direction of the gravitational vector, while shoots grow opposite to the gravitational vector. We first demonstrated that a weak combined magnetic field (CMF), which is comprised of a permanent magnetic field and an alternating magnetic field with the frequency resonance to the cyclotron frequency of calcium ions, can change the direction of root gravitropism. Two-day-old *Lepidium sativum* L. (*Brassicaceae* Burnett) seedlings were gravistimulated in a chamber that was placed into μ -metal shield where such CMF has been created. Using this «new model» of a root gravitropic reaction, we have studied some of its components, including the movement of amyloplasts-statoliths in root cap statocytes and Ca^{2+} ion distribution in the distal elongation zone during gravistimulation. In the CMF unlike control, amyloplasts did not sediment in the distal part of a statocyte, and more Ca^{2+} accumulation was observed in the upper side of a gravistimulated root. A root gravitropic reaction occurs by a normal physiological process resulting in root bending in the CMF although in the opposite direction. These results support the participation of amyloplasts-statoliths and calcium ions in plant gravitropism.

К е y w o r d s: combined magnetic field, calcium, *Lepidium sativum*, gravistimulation, gravitropism, root cap.