

## ВПЛИВ СКЛАДУ СУПРАМОЛЕКУЛЯРНИХ КОМПЛЕКСІВ ЗОСТЕРАН–БОРНА КИСЛОТА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОСТОВИХ ПРОЦЕСІВ ЗЛАКОВИХ КУЛЬТУР

С.В. Примаченко<sup>1\*</sup>, А.Д. Кустовська<sup>1</sup>, Д.С. Мохнев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний авіаційний університет, Київ, Україна

<sup>2</sup>MicrobioSerum™, Київ, Україна

\*Corresponding author: svp@nau.edu.ua

Received 20 January 2019; Accepted 1 March 2019

**Проблематика.** Бор визнаний важливим мікроелементом для процесів функціонування вищих рослин. Роль бору специфічна – він є незамінним елементом живлення, без якого життєдіяльність рослин неможлива. Основним джерелом бору для живлення рослин є борна кислота, яка в ґрунтовому розчині перебуває у вигляді недисоційованих молекул і характеризується досить низькою розчинністю та біодоступністю. Для транспортування борної кислоти в рослину може бути використаний пектин, що утворює з борною кислотою комплекси з молярним співвідношенням 1:1 і 2:1. Визначення біодоступності кожного з цих комплексів дасть можливість оптимізувати процес введення борвмісних добрив.

**Мета.** Введення бору в рослини у формі супрамолекулярних комплексів борної кислоти з пектином для дослідження біоактивності таких комплексів залежно від їх складу.

**Методика реалізації.** Пектин екстрагували з листя гідробіонта Зостери морської (*Zostera marina*). Ареал поширення цієї вищої рослини в Україні – узбережжя Чорного моря Одеської області. Об'єктами дослідження впливу біологічної активності зостеран–борних супрамолекулярних комплексів на функції росту кореневої та наземної частин були використані тест-культури кукурудзи та пшениці. Маса кореневої системи і наземної частини рослини вимірювалася за оригінальною методикою через 96 год після закладення експерименту (24 год замочування насіння в дистильованій воді та 72 год у розчині супрамолекулярного комплексу зостеран–борна кислота).

**Результати.** У результаті пророщування насіння на розчинах супрамолекулярних комплексів різного складу було виявлено, що на ростові процеси наземної частини рослин комплекси чинять значний активуючий вплив. Показано, що біологічна активність розчинів суттєво залежить від природи культури. Кукурудза показала більш високу загальну біологічну активність супрамолекулярних комплексів (до 108 %) порівняно з пшеницею (60 %). При цьому розчин супрамолекулярного комплексу зостеран–борна кислота у мольному співвідношенні 1:1 виявився ефективним для обох культур. Комплекси зостеран–борна кислота в мольному співвідношенні 2:1 не показали високої біологічної активності.

**Висновки.** Високу біологічну активність (107,87 % для кукурудзи і 60,35 % для пшениці) показав комплекс із масовим співвідношенням зостеран–борна кислота 1:20. За такого масового співвідношення найбільш імовірно утворення комплексів зостеран–борна кислота з молярним співвідношенням 1:1, що пов'язано з меншими розмірами і тому більшою біодоступністю таких комплексів. Комплекси пектин–борна кислота 2:1 показали нижчу біологічну активність (103,33 % для кукурудзи і 11,18 % для пшениці), що можна пояснити стеричними обмеженнями при проникненні їх у рослину.

**Ключові слова:** біологічна активність; біологічна доступність; комплексні сполуки; супрамолекулярні комплекси; борна кислота; пектин; зостеран.

### Вступ

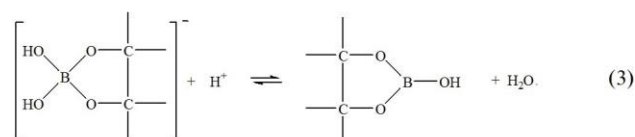
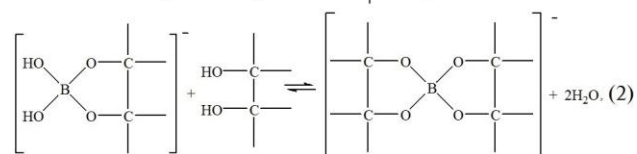
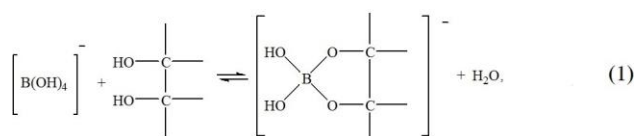
Інтенсифікація сільськогосподарських процесів є причиною додаткового навантаження на ґрунти. За даними [1], у 2017 р. в Україні під посіви сільськогосподарських культур було задіяно 18424,8 тис. га, і лише 39,75 % становили площі, що оброблялися мінеральними добривами, та 1,2 % – площі, що оброблялися органічними добривами.

Роль макроелементів у живленні рослин є незаперечною [2]. Для отримання стабільних показників врожайності потрібно також врахувати наявність у ґрунті цілої низки мікроелементів. Дефіцит будь-якого з них може суттєво вплинути на фізіологію культури, особливо це стосується бору [3].

За оцінками експертів продовольчої та сільськогосподарської організації (FAO), нестача бору є одним із основних обмежень рос-

линництва у світі. Вважається, що в глобальному масштабі нестача бору є другим за значимістю мікрохарчовим обмеженням для сільськогосподарських культур після цинку [4]. Бор визнаний важливим мікроелементом для процесів функціонування вищих рослин. Усі спроби замінити бор будь-яким іншим елементом дали абсолютно чіткий негативний результат. Це показує, що роль бору в рослинах специфічна і він є незамінним елементом живлення, без якого життєдіяльність рослин неможлива. На доступність бору впливають тип ґрунту, вологість, вміст органічної речовини та інші фактори [5]. Вивчення вимог рослин до вмісту бору в ґрунтах дало змогу встановити, що дводольні рослини частіше є залежними від вмісту бору, ніж однодольні [6].

Основним джерелом бору для живлення рослин є борна та бура кислоти [7]. Бор у ґрунтовому розчині може перебувати у вигляді іонів  $\text{B}(\text{OH})_4^-$  та недисоційованих молекул борної кислоти  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , яка характеризується досить низькою біодоступністю [8]. З підвищенням рН, особливо за наявності поліолів, розчинність борної кислоти підвищується, за рахунок чого збільшується її біологічна доступність унаслідок підвищення концентрації іонів  $\text{B}(\text{OH})_4^-$  і утворення супрамолекулярних комплексів відповідно до таких рівноваг:



Причому в лужному і нейтральному середовищах рівновага зміщується праворуч у рівняннях (1), (2) і ліворуч у рівнянні (3).

Через вищу розчинність комплекси борної кислоти з поліолами можуть використовуватись для транспортування бору в рослини. Поліолами можуть бути як лінійні (гліцерин, етиленгліколь тощо), так і циклічні (цукри) полігідроксисполуки.

Джерелом полігідроксисполук є рослинні полісахариди, до яких належить пектин. Зазвичай близько 90 % пектину становить полігалактуронова кислота [9], у ланцюг якої періодично вбудовані молекули рамнози, які в позиції  $\text{C}_4$  з'єднані з вуглеводним ланцюгом (див. наведений нижче рис. 1). Залежно від виду рослини вуглеводний ланцюг пектину містить рамнозу, арабінозу, ксилозу, апіозу, монозу, глюкозу, галактозу.

Предметом вивчення багатьох дослідницьких центрів у всьому світі є фізіологічна активність рослинних полісахаридів і їх вплив на функціонування рослинних і тваринних клітин. Однак вони переважно стосуються вивчення сорбційної здатності пектину виводити з організму іони важких металів. Дослідження застосування пектинвмісних рослинних полісахаридів для реалізації цілей сільського господарства є поодинокими та несистематизованими. Так, у працях [9, 10] показано, що в стінці клітини бор перебуває у формі комплексу, що утворюється відповідно до реакції (2). Опрацювавши літературні дані, ми дійшли висновку, що пектин-борні комплекси можуть бути використані як активатори росту рослин, що в кінцевому рахунку призведе до підвищення врожайності сільськогосподарських культур. Зважаючи на ймовірність існування бору у вигляді комплексів різної будови, ми вважали за доцільне визначити більш біодоступну форму таких комплексів.

## Матеріали і методи

Як пектинвмісну сировину було використано гідробіонт *Zостера морська* (*Zostera marina*), що відноситься до: царства зелених рослин (*Viridiplantae*), відділу вищих рослин (*Streptophyta*), надкласу: покритонасінних (*Magnoliophyta*), класу: однодольних (*Monocots*), порядку: частухоцвіті (*Alismatales*), родини: камкові (*Zosteraceae*), роду: Камка (*Zostera*) [11]. Ареал поширення цієї рослини в Україні – узбережжя Чорного моря Одеської області.

Камка морська здатна синтезувати та накопичувати полісахариди, які не зустрічаються у вищих рослинах, і має унікальні властивості. Пектинова складова Камки морської – зостеран – має емпіричну формулу  $(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6)_n$  і на 93 % представлена полігалактуроновою кислотою з високим вмістом апіози [12] та інших природних цукрів (рис. 1).

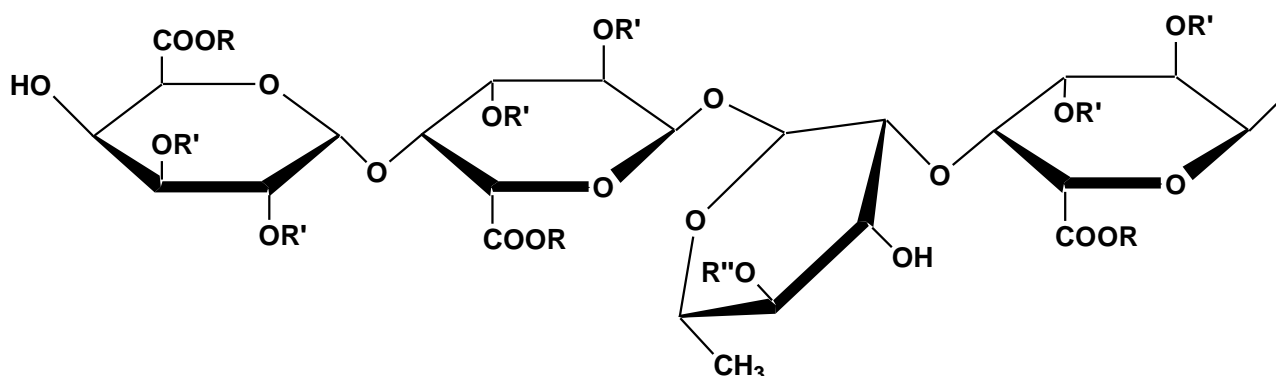


Рисунок 1: Структура пектину: R = H або CH<sub>3</sub>; R' = H, CH<sub>3</sub>CO, рідше – вуглеводний ланцюг; R'' = H або вуглеводний ланцюг

Сировину для екстракції збирали в серпні місяці [13]. Вміст полісахариду в рослині в цей час є найбільшим.

Зостеран екстрагували за запропонованою схемою. Сухе листя *Zostera marina* промивали у водопровідній воді (гідромодуль – 1:50). Сировину замочували в 1 %-ному розчині формаліну за кімнатної температури впродовж 24 год (для вилучення пігментів та зв'язування вільних іонів Ca<sup>2+</sup> і Mg<sup>2+</sup>). Потім зразок обробляли 1 %-ним розчином хлоридної кислоти впродовж 6 год у термостаті за температури 70 °С із помірним перемішуванням. Далі екстракцію проводили в 1 %-ному розчині оксалату амонію впродовж 12 год у термостаті за температури 50 °С. Розчин відфільтровували на лавсановому фільтрі. В очищений фільтрат додавали 10 %-ний розчин хлоридної кислоти до повного осадження полісахариду (рН 1,2). Осад віджимали від надлишку води та здійснювали видалення аніонів хлору методом електролізу. Контроль наявності хлору у воді та сировині здійснювали якісною реакцією з аргентум нітратом. Потім висушували отриманий осад у тонкому шарі за температури 45 °С упродовж 3 год. Отримані зразки мали вигляд сіро-коричневих лусочок, без запаху, з кислим смаком.

Зважаючи на те, що утворення супрамолекулярних комплексів пектин–борна кислота (I–VII) відбувається за рахунок поліолів, вміст яких у зостерані становить близько 7 %, були приготовані розчини з мольним співвідношенням зостеран–борна кислота 1:2; 2,5:1 та 5:1 (таблиця). Розчином КОН (0,01 моль/дм<sup>3</sup>) доводили показник рН середовища до значення 6,5 для створення сприятливих умов утворення комплексів.

Як рослинні об'єкти дослідження (технічні культури) для визначення активності бор-пектинових супрамолекулярних комплексів на функції росту кореневої та наземної частин були використані кукурудза і пшениця. Об'єкти дослідження належать до груп, що не однаково відгукуються на концентрацію бору на ріст і розвиток.

Біологічну активність супрамолекулярних комплексів досліджували за запропонованою методикою. У чашках Петрі на фільтрувальному папері розміщували по 10 шт насіння у трьох повторях для кожної рослини, після чого вони замочувалися в дистильованій воді впродовж 24 год. Потім воду замінювали відповідним розчином (див. таблицю). Через 72 год росту вимірювалася маса коренів і наземної частини проростка.

Таблиця: Характеристика робочих розчинів зостеран–борна кислота

№ зразка	Зостеран, % мас.	Борна кислота, % мас.	Співвідношення зостеран–борна кислота, моль/моль	Співвідношення зостеран–борна кислота, г/г	Імовірний комплекс зостеран–борна кислота (відповідно до рис. 2)
1	0,1	–	1:0	1:0	–
2	0,1	0,005	1:2	20:1	IV(1:1), V(1:1)
3	0,1	0,001	2,5:1	100:1	IV(1:1), V(1:1), VI(1:2), VII(1:2)
4	0,1	0,0005	5:1	200:1	VI(1:2), VII(1:2)

Розрахунок приросту маси відповідної частини рослини відносно контролю (контроль – дистильована вода):

$$\Delta l = l_{\text{зразок}} - l_{\text{контроль}}, \quad (4)$$

де  $\Delta l$  – приріст маси проростка, г,  $l_{\text{зразок}}$  – маса проростка зразка, г,  $l_{\text{контроль}}$  – маса проростка контролю, г;

$$\Delta n = n_{\text{зразок}} - n_{\text{контроль}}, \quad (5)$$

де  $\Delta n$  – приріст маси кореня, г,  $n_{\text{зразок}}$  – маса кореня зразка, г,  $n_{\text{контроль}}$  – маса кореня контролю, г.

Розрахунок біологічної активності у відсотках відносно контролю;

– для наземної системи:

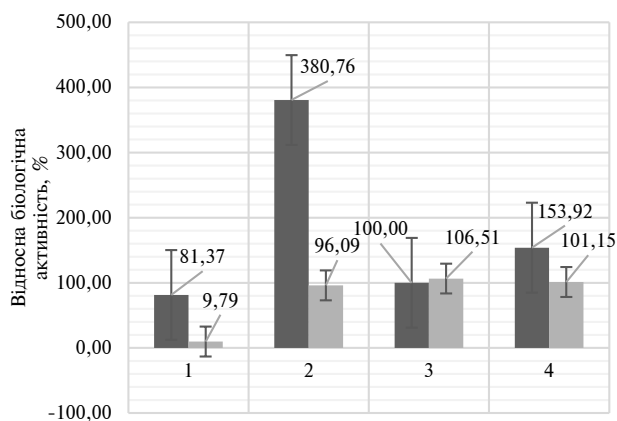
$$BA_{(н)} = (l_{\text{зразок}} - l_{\text{контроль}}) \times 100 \% / l_{\text{контроль}}, \quad (6)$$

– для кореневої системи:

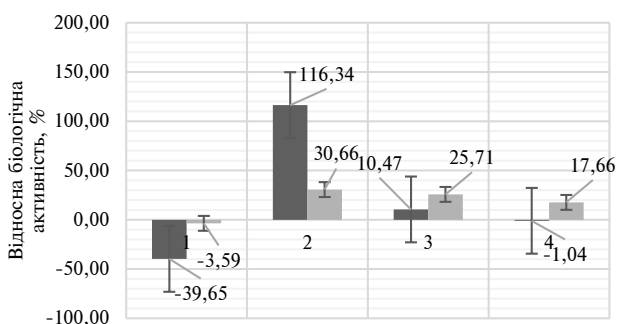
$$BA_{(к)} = (n_{\text{зразок}} - n_{\text{контроль}}) \times 100 \% / n_{\text{контроль}}, \quad (7)$$

– загальна:

$$BA = (\Delta l + \Delta n) \times 100 \% / (l_{\text{контроль}} + n_{\text{контроль}}), \quad (8)$$



**Рисунок 2:** Відносна біологічна активність розчинів (нумерація відповідно до таблиці) щодо проростання наземної (■ –  $BA_{(н)}$ ) та кореневої (■ –  $BA_{(к)}$ ) системи кукурудзи



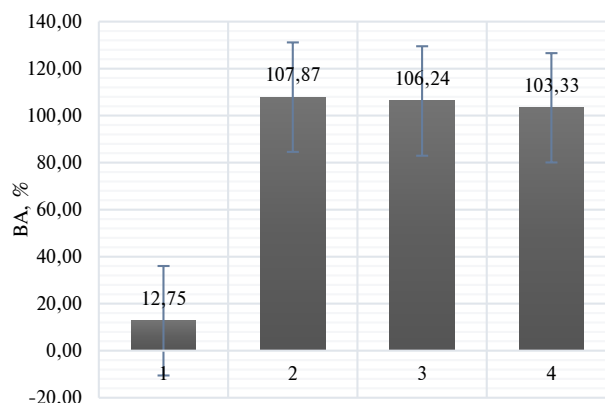
**Рисунок 4:** Відносна біологічна активність розчинів (нумерація відповідно до таблиці) щодо проростання наземної (■ –  $BA_{(н)}$ ) та кореневої (■ –  $BA_{(к)}$ ) системи пшениці

Похибка розраховувалась згідно зі стандартним методом із використанням коефіцієнта Стюдента та програмного забезпечення Excel від Microsoft Office. Порівняння маси наземної та кореневої системи пшениці й кукурудзи досліджуваних та контрольних зразків використовували як показник біологічної активності супрамолекулярних комплексів зостеран–борна кислота на перших стадіях онтогенезу злаків.

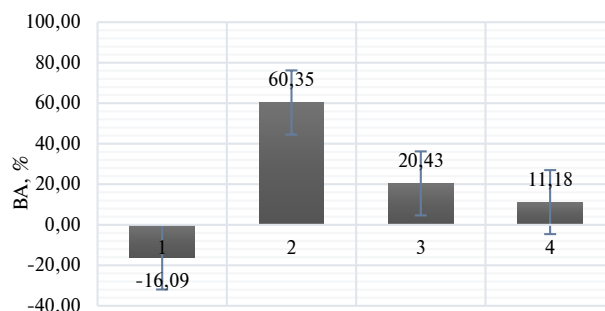
## Результати

Результати розрахунків із використанням формул (4)–(8) біологічної активності ( $BA$ ,  $BA_{(н)}$ ,  $BA_{(к)}$ ) розчинів супрамолекулярних комплексів пектин–борна кислота IV–VII (таблиця, схема на рис. 6) на ефективність проростання наземної та кореневої частини досліджуваних зразків кукурудзи та пшениці наведені на рис. 2–5.

Згідно з одержаними результатами, біологічна активність розчинів суттєво залежить від



**Рисунок 3:** Загальна біологічна активність розчинів (нумерація відповідно до таблиці) щодо проростання кукурудзи



**Рисунок 5:** Загальна біологічна активність розчинів (нумерація відповідно до таблиці) щодо проростання пшениці

природи рослини. Так, розчин пектину без борної кислоти (рис. 3, зразок 1) дещо активує (12,75 %) ріст кукурудзи, але пригнічує (-16,09 %) ріст пшениці (рис. 5, зразок 1) Комплекси зостеран-борна кислота також чинять різний вплив на різні культури. Так, проростання кукурудзи більш залежне від наявності комплексів, але мало залежить від їх структури, тоді як проростання пшениці більш залежить від структури супрамолекулярних комплексів.

### Обговорення

Імовірна схема утворення супрамолекулярної системи пектин-борна кислота через вуглеводний фрагмент (на прикладі апіози) наведена на рис. 6.

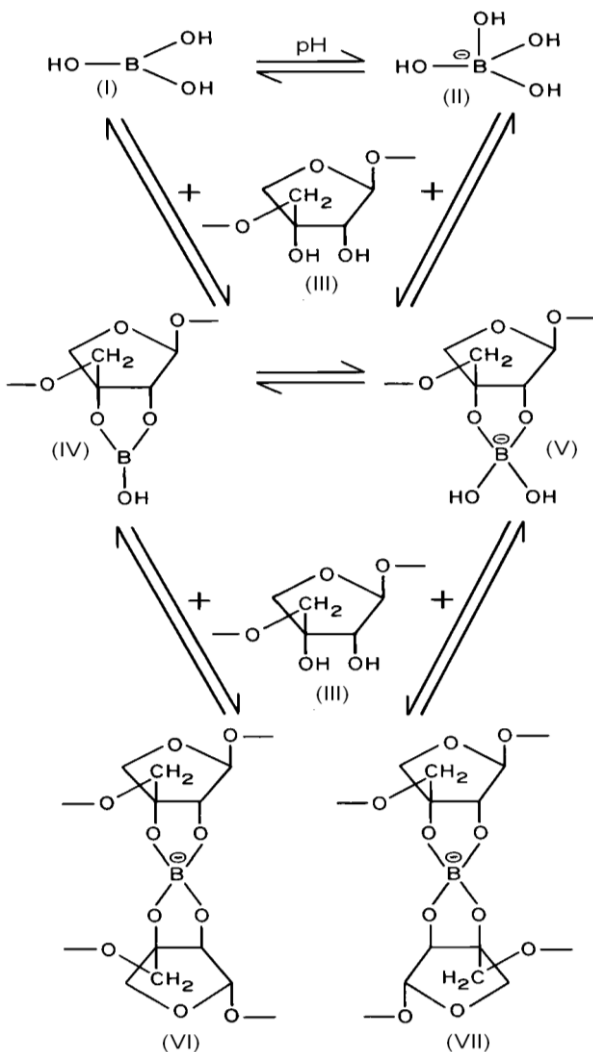


Рисунок 6: Схема утворення супрамолекулярних комплексів (IV, V, VI, VII) пектин-борна кислота через молекули апіози

Згідно з цією схемою, форма борної кислоти з трикоординатним бором (I) перебуває в стані динамічної рівноваги з чотирикоординатною формою (II). Причому стан рівноваги залежить від кислотності середовища і при підвищенні рН зміщується в бік форми (II). Ці рівноважні форми утворюють відповідні етери (IV і V) типу 1:1 з вуглеводною (апіозною) групою пектину (III). У надлишку пектину етери типу 1:1 вступають у взаємодію з вільними вуглеводними групами з утворенням однієї або двох діастереомерних форм етерів типу 2:1 (VI, VII). Таким чином, існують чотири типи супрамолекулярних комплексів, структура яких залежить від співвідношення пектин-борна кислота.

Очевидно, що комплекси різної будови мають проявляти не однакову біологічну активність, тому в роботі ставилось завдання визначити біологічну (наполягаємо на терміні біологічна активність, тому що залежно від будови комплексу спостерігається різна ефективність проростання, і тим самим проявляється біологічна активність комплексу) активність супрамолекулярних комплексів залежно від їх будови.

При мольному співвідношенні зостеран-борна кислота 1:2 (таблиця, зразок 2; рис. 2-5), коли борна кислота знаходиться в надлишку, найбільш імовірне утворення комплексів типу IV і V, причому лужна реакція розчину робить більш імовірним утворення комплексу V. Зниження концентрації борної кислоти до співвідношення зостеран-борна кислота 2,5:1 (таблиця, зразок 3; рис. 2-5) робить імовірним разом із комплексом V утворення діастереомерних комплексів VI, VII. А співвідношення 5:1 (таблиця, зразок 4; рис. 2-5) сприяє переважному утворенню комплексів типу VI і VII.

Менший за розмірами комплекс типу V проявляє найвищу активність у випадку обох рослинних технічних культур (рис. 3, 5, зразок 2). Причому до активуючого впливу більш чутлива наземна частина рослин. Так, ефективність проростання наземної частини кукурудзи зростає майже у чотири рази (рис. 2, зразок 2), а пшениці – більш ніж у два рази (рис. 4, зразок 2). Коренева система обох технічних культур виявилась менш залежною від структури комплексу (рис. 2, 4). Очевидно, на біологічну активність розчинів суттєво впливають стеричні обмеження дифузії об'ємного супрамолекулярного комплексу типу 1:2 (VI, VII), що рухається від апікальних точок кореневої системи флоємою до апікальних точок наземної частини рослини.



Кукурудза показала більш високу загальну біологічну активність супрамолекулярних комплексів – до 108 % (рис. 3), порівняно з пшеницею – 60,35 % (рис. 5). При цьому в міру утворення більш розлогих комплексів типу VI і VII активність на насінні пшениці зменшується до 20,43 і 11,18 % для розчинів 3 і 4 відповідно (рис. 5).

З урахуванням викладеного вище, найбільш ефективними виявились розчини комплексів V із найменшою молярною масою (типу 1:1). Однак у роботах [9, 10] було доведено, що в рослинах комплекси пектин–борна кислота існують у формі VI і VII. Очевидно, транспортування бору відбувається у формі комплексу 1:1 з подальшим закріпленням у частинах рослини, які перебувають у фазі активного росту. На основі одержаних результатів можна запропонувати рекомендації для приготування добрив на основі комплексів зостеран–борна кислота. Оптимальне масове співвідношення зостеран–борна кислота має становити 20:1, однак необхідними є додаткові дослідження з визначення оптимальної концентрації утвореного комплексу в розчині та з визначення впливу природи рослини на біологічну активність комплексу, що є предметом подальшого дослідження.

## References

- [1] Inclusion of mineral and organic fertilizers (1990–2017). [Internet]. Ukrstat.gov.ua; 2019 [cited 2019 Jan 21]. Available from: [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/cg.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/cg.htm)
- [2] Sillanpaa M. Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study [Internet]. Fao.org; 1982 [cited 2019 Jan 21]. Available from: <http://www.fao.org/3/a-at167e.pdf>
- [3] Ronen E. Micro-elements in agriculture. *Practical Hydroponics and Greenhouses*. 2016;164:35–44.
- [4] Türker O, Türe C, Böcük H, Çiçek A, Yakar A. Role of plants and vegetation structure on boron (B) removal process in constructed wetlands. *Ecol Eng*. 2016;88:143–52. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.12.021
- [5] Dannel F, Pfeffer H, Römheld V. Effect of pH and boron concentration in the nutrient solution on translocation of boron in the xylem of sunflower. In: Bell RW, Rerkasem B, edotirs. *Boron in Soils and Plants. Developments in Plant and Soil Sciences*. Dordrecht: Springer; 1997. Volume 76; p. 183–86. DOI: 10.1007/978-94-011-5564-9\_36
- [6] Linse L, Dahlin A, Nadeau E, Forkman J, Öborn I. Boron fertilisation of organically managed grass-clover swards on coarse-textured soils: effects on botanical and element composition. *Agricult Food Sci*. 2015;24(4):261–72. DOI: 10.23986/afsci.51469
- [7] Power P, Woods W. The chemistry of boron and its speciation in plants. *Plant and Soil*. 1997;193(1-2):1–13. DOI: 10.1023/A:1004231922434
- [8] van Haveren J, Peters J, Batelaan J, Kieboom A, van Bekkum H. pH dependence of the stability of boric acid and borate esters of amino acids and amino diols in aqueous medium as studied by  $^{11}\text{B}$  and  $^1\text{H}$  NMR spectroscopy. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*. 1989;108(5):179–84. DOI: 10.1002/recl.19891080504
- [9] Matoh T, Kawaguchi S, Kobayashi M. Ubiquity of a borate-rhamnogalacturonan II complex in the cell walls of higher plants. *Plant Cell Physiol*. 1996;37(5):636–40. DOI: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a028992
- [10] Matoh T, Ishigaki K, Ohno K, Azuma J. Isolation and characterization of a boron-polysaccharide complex from radish roots. *Plant Cell Physiol*. 1993;34:639–42. DOI: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a078465
- [11] Kotov M, Prokulín U. Identification of the highest plants of Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka; 1987. 548 p.

## Висновки

Показано що супрамолекулярні комплекси зостеран–борна кислота чинять стимулюючий вплив на ріст кореневої та наземної систем кукурудзи і пшениці, причому ступінь такого впливу залежить від молекулярних розмірів таких комплексів.

Найвищу біологічну активність (107,87 % для кукурудзи і 60,35 % для пшениці) показав комплекс із масовим співвідношенням зостеран–борна кислота 1:20. При такому масовому співвідношенні найбільш імовірно утворення комплексів зостеран–борна кислота з молярним співвідношенням 1:1, що пов'язано з меншими розмірами і тому більшою біодоступністю таких комплексів.

Комплекси зостеран–борна кислота 2:1 показали нижчу біологічну активність (103,33 % для кукурудзи і 11,18 % для пшениці), що можна пояснити стеричними обмеженнями при проникненні їх у рослину.

Біологічна активність розчинів суттєво залежить від природи культури і потребує подальшого дослідження.

- [12] Blevins DG, Lukaszewski KM. Boron in plant structure and function. *Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol.* 1998;49:481-500. DOI: 10.1146/annurev.arplant.49.1.481
- [13] Bisenova A, Mukatova M. Obtaining pectin polysaccharides from raw materials of the Volga-Caspian region. *Rybprom.* 2010;4:56-9.

С.В. Примаченко, А.Д. Кустовская, Д.С. Мохнев

#### ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЗОСТЕРАН–БОРНАЯ КИСЛОТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РОСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ ЗЛАКОВЫХ КУЛЬТУР

**Проблематика.** Бор признан важным микроэлементом для процессов функционирования высших растений. Роль бора специфическая – он является незаменимым элементом питания, без которого жизнедеятельность растений невозможна. Основным источником бора для питания растений является борная кислота, которая в почвенном растворе находится в виде недиссоциированных молекул и характеризуется довольно низкой растворимостью и биодоступностью. Для транспортировки борной кислоты в растение может быть использован пектин, образующий с борной кислотой комплексы с молярным соотношением 1:1 и 2:1. Определение биодоступности каждого из этих комплексов позволит оптимизировать процесс введения борсодержащих удобрений.

**Цель.** Введение бора в растения в форме супрамолекулярных комплексов борной кислоты с пектином для исследования биоактивности таких комплексов в зависимости от их состава.

**Методика реализации.** Пектин экстрагировали из листьев гидробионта Зостеры морской (*Zostera marina*). Ареал распространения этого высшего растения в Украине – побережье Черного моря Одесской области. Как объекты исследования влияния биологической активности зостеран–борных супрамолекулярных комплексов на функции роста корневой и наземной части были использованы тест-культуры кукурузы и пшеницы. Масса корневой системы и наземной части растения измерялась по оригинальной методике через 96 ч после закладки эксперимента (24 ч замачивания семян в дистиллированной воде и 72 ч в растворе супрамолекулярного комплекса зостеран–борная кислота).

**Результаты.** В результате проращивания семян на растворах супрамолекулярных комплексов различного состава оказалось, что на ростовые процессы наземной части растений комплексы оказывают значительное активирующее влияние. Установлено, что биологическая активность растворов существенно зависит от природы культуры. Кукуруза показала более высокую общую биологическую активность супрамолекулярных комплексов (до 108 %) по сравнению с пшеницей (60 %). При этом раствор супрамолекулярного комплекса зостеран–борная кислота в молярном соотношении 1:1 оказался эффективным для обеих культур. Комплексы зостеран–борная кислота в молярном соотношении 2:1 не показали высокой биологической активности.

**Выводы.** Высокую биологическую активность (107,87 % для кукурузы и 60,35 % для пшеницы) показал комплекс с массовым соотношением зостеран–борная кислота 1:20. При таком массовом соотношении наиболее вероятно образование комплексов зостеран–борная кислота с молярным соотношением 1:1, что связано с меньшими размерами и поэтому большей биодоступностью таких комплексов. Комплексы пектин–борная кислота 2:1 показали более низкую биологическую активность (103,33 % для кукурузы и 11,18 % для пшеницы), что можно объяснить стерическими ограничениями при проникновении их в растение.

**Ключевые слова:** биологическая активность; биодоступность; комплексные соединения; супрамолекулярные комплексы; борная кислота; пектин; зостеран.

S.V. Prymachenko, A.D. Kustovska, D.S. Mokhniev

#### INFLUENCE OF COMPOSITION OF ZOSTERAN–BORIC ACID SUPRAMOLECULAR COMPLEXES ON THE EFFICIENCY OF GROWTH PROCESSES OF CEREALS

**Background.** Boron is recognized as an important trace element for the processes of functioning of higher plants. The role of boron is specific, it is an indispensable element of nutrition, without which the life of plants is impossible. The main source of boron for plant nutrition is boric acid, which in interstitial water is in the form of non-dissociated molecules and is characterized by rather low solubility and bioavailability. Pectin, which forms boric acid complexes with 1:1 and 2:1 molar ratios, can be used to transport boric acid to a plant. Determining the bioavailability of each of these complexes will optimize the process of boron fertilizers introduction.

**Objective.** The aim of the paper is introduction of boron into plants in the form of supramolecular complexes of boric acid with pectin in order study of bioactivity of such complexes depending on their composition.

**Methods.** Pectin was extracted from leaves of hydrobiont of *Zostera marina*. Distribution area of this higher plant in Ukraine is the Black Sea coast of the Odessa region. Test cultures of corn and wheat were used as the objects of the study of biological activity effect of zosteran-boron supramolecular complexes on the growth function of the root and the ground part. The mass of the root system and the ground part of the plant was measured according to original methodology in 96 hours after the experiment was started (seed soaking in distilled water for 24 h and in the solution of the supramolecular complex zosteran–boric acid for 72 h).

**Results.** As a result of seed germination on the solutions of supramolecular complexes of different composition, it was found out that complexes have a significant activating effect on the growth processes of aboveground part of plants. It was demonstrated that the biological activity of solutions substantially depends on the nature of culture. Corn showed a higher overall biological activity of supramolecular complexes (up to 108%) compared with wheat (60%). Solution of the supramolecular complex of zosteran–boric acid in a 1:1 molar ratio was found to be effective for both cultures. Zosteran–boric acid complexes in the molar ratio of 2:1 did not demonstrate high biological activity.

**Conclusions.** High biological activity (107.87% for corn and 60.35% for wheat) was demonstrated by complex with zosteran–boric acid mass ratio of 1:20. In such instance, the formation of zosteran–boric acid complexes with molar ratio of 1:1 is the most probable case. It is caused by smaller sizes and therefore better bioavailability of such complexes. Complexes with pectin-boric acid 2:1 molar ratio demonstrated lower biological activity (103.33% for corn and 11.18% for wheat). It can be explained by steric restrictions during penetration into the plant.

**Keywords:** biological activity; biological availability; complex compounds; supramolecular complexes; boric acid; pectin; zosteran.