

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.03.092>

УДК 574.63

О.М. Міхеєв¹, <https://orcid.org/0000-0003-4069-3625>

О.В. Лапань², <https://orcid.org/0000-0001-6509-4456>

С.М. Маджд³, <https://orcid.org/0000-0003-2857-894X>

Л.М. Черняк², <https://orcid.org/0000-0003-4192-3955>

¹ Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України, Київ

² Національний авіаційний університет, Київ

³ Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Київ

E-mail: mikhalex7@yahoo.com, k.lapan@ukr.net

Розроблення гідрофітної споруди типу біоплато для цілей фітореMediaції

Представлено членом-кореспондентом НАН України О.О. Стасиком

Розроблено плавучу конструкцію біоплато, біотичною складовою якої є наземні рослини, для очищення водних об'єктів від токсичних речовин. Для конструювання біоплато як субстрат використано інертні в хімічному відношенні плавучі матеріали: перліт, керамзит, гранульований пінопласт, вермикуліт, коркову пробку. У результаті випробування субстратів з'ясовано, що найбільш оптимальним у використанні є гранульований пінополістирол (полістирол). Дослідження різних варіантів пророщування насіння в конструкції біоплато показало, що його розміщення поверх субстрату є найкращим варіантом. Для оптимізації гідрофітної споруди використовували сітку, що дало змогу збільшити загальну щільність біоплато. Проведено порівняльне дослідження ефективності очищення водного середовища від іонів радіоцезію біоплато з рослинами пшениці різного сорту. Підтверджено, що ефективність сорбції наземними рослинами іонів ¹³⁷Cs залежить від природи і концентрації макрокатіонів у водному середовищі.

Ключові слова: очищення водойм, фітореMediaція, біоплато, наземні рослини.

Антропогенна діяльність супроводжується аварійними ситуаціями, що може призводити до значного забруднення навколишнього середовища і зокрема водойм. Все це набуває глобальних масштабів та зумовлює небажані наслідки для людини та екосистем [1]. Традиційно для очищення стічних вод застосовують хімічні і фізико-хімічні методи, але на сьогодні велику увагу приділяють фітореMediaційним технологіям з використанням вищих водних

Цитування: Міхеєв О.М., Лапань О.В., Маджд С.М., Черняк Л.М. Розроблення гідрофітної споруди типу біоплато для цілей фітореMediaції. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2022. № 3. С. 92–98.

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.03.092>

рослин для покращення стану водних об'єктів [2–4]. Проте відомо, що вищі наземні рослини також характеризуються високим рівнем накопичення екотоксикантів в умовах водної (гідропонної) культури [5]. Тому, незважаючи на досягнення в практиці використання біоплато, актуальним є наукове обґрунтування розроблення фітореMediaційної технології, яке передбачало б вивчення поглинальної здатності наземних рослин і створення ефективної гідрофітної споруди типу біоплато.

На процес накопичення радіоцезію біоплато з рослинами може впливати ряд чинників, зокрема сортові особливості рослин, наявність та концентрація макрокатіонів, типових для природних водойм – Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Оптимальний вміст вказаних макрокатіонів у середовищі є необхідним для забезпечення важливих процесів життєдіяльності рослинних організмів: метаболізму, росту, експресії генів, фотосинтезу, синтезу білків, вуглеводів та ін. Відомо [6], що в природних умовах навіть із відносно високим рівнем радіонуклідного забруднення середовища (ґрунтів чи водних об'єктів), концентрації ^{137}Cs на багато порядків нижчі, ніж макрокатіонів, тому ефективність сорбції ^{137}Cs значною мірою залежить від наявності та концентрації у середовищі цих елементів, що можуть виступати як специфічні і неспецифічні конкуренти (ізотопні чи неізотопні носії).

Мета роботи – експериментальне розроблення методу доочищення водних об'єктів від іонів ^{137}Cs за допомогою нової конструкції біоплато, в основі якої лежить використання наземних рослин та субстрату, що забезпечує плавучість конструкції.

У ході розроблення плавучого біоплато з використанням наземних рослин, що мають максимальну здатність до накопичення радіонуклідів, були поставлені та вирішені такі завдання:

- пошук видів наземних рослин, які здатні рости в умовах підвищеної вологості;
- випробування різних типів субстратів, що забезпечують необхідний рівень плавучості та щільності зв'язку з кореневою системою рослин;
- тестування субстратів і рослин щодо утворення плавучих біоплато;
- пошук оптимального засобу пророщування насіння;
- дослідження сорбційних властивостей біоплато із рослинами пшениці різного сорту щодо ^{137}Cs ;
- дослідження впливу макрокатіонів на сорбцію ^{137}Cs .

Матеріали та методи. Як біосорбційний елемент біоплато передбачене використання інтактних вищих наземних рослин або їхніх ізольованих частин (переважно листково-стеблових). Для конструювання плавучого біоплато було випробувано практично інертні у хімічному відношенні (у водному середовищі за температур, сприятливих для нормальної вегетації рослин) плавучі матеріали, такі як: перліт, керамзит, гранульований пінопласт, вермикуліт, коркова пробка.

Наступним етапом у конструюванні біоплато було комбінування різних варіантів розташування насіння щодо субстрату. Випробували розміщення насіння зверху субстрату, знизу та метод перемішування субстрату із насінням рослин. Для отримання гідрофітної системи з необхідними якостями також досліджували комбінації варіантів насіння вищих наземних рослин різних видів і сортів та різних видів субстрату.

Для конструювання біоплато методом розміщення насіння знизу субстрату на дно кювети розміром $21 \times 12,5 \times 2,5$ см насипали насіння (шт/м²) гороху (12 300), кукурудзи (11 400),

ячменю (16 150), вівса (16 150); зверху насипали гранульований пінопласт шаром 1,5 см (об'єм приблизно 500 см³); додавали 100 мл відстояної води з водогону; розміщували в термостаті за температури 24 °С.

Для створення біоплато методом перемішування насіння із субстратом використовували попередньо замочене протягом 8 год насіння кукурудзи (11 400 шт/м²) та гороху (12 300 шт/м²). У кювети розміром 21×12,5×2,5 см насипали пінопласт і перемішували з насінням. Додавали 100 мл відстояної води з водогону і розміщували в термостаті за температури 24 °С.

Конструювання біоплато методом розміщення насіння зверху субстрату проводили в такій послідовності: дно кювети (21×12,5×2,5 см) покривали шаром гранульованого пінопласту (500 см³); зволожували поверхню пінопласту; додавали 100 мл відстояної води з водогону; покривали шаром перліту (70 см³); зволожували перліт; на поверхні розміщували насіння (шт/м²) гірчиці (116 730), жита (16 150), вівса (16 150), амаранту (306 800), льону (32 320), проса (16 150), ячменю (16 150), кукурудзи (11 400), тимофіївки (298 480), вівсяниці (11 100); покривали насіння шаром перліту (50 см³); розміщували в термостаті за температури 24 °С. Для оптимізації гідрофітної споруди біоплато використовували пластикову підтримуючу сітку з дрібним вічком, що вистилала всю внутрішню поверхню ростильні.

Рослини пшениці (сортів Поліська 90, Миронівська 808, Донська напівкарлик, Фаворитка) культивували на розчині хлориду цезію-137 з питомою активністю 2,3 кБк/л у скляних ємностях об'ємом 0,5 л, які з метою запобігання сорбції іонів радіоізоотопу цезію внутрішньою поверхнею скла попередньо обробляли протягом трьох діб 0,1 М розчином хлориду стабільного цезію-133. Використовували відстояну водопровідну воду. Застосована питома активність радіоцезію за даними наших попередніх дослідів не виявляла помітного впливу на ріст і розвиток рослин. Один раз на добу розчин переливали в посудину Марінеллі для визначення питомої активності радіонукліда на гамма-спектрометрі СЕГ-001 "АПК-С"-63. Розрахунок питомої активності ¹³⁷Cs проводили до похибки вимірювання 3,8 %.

Ступінь очищення (зменшення рівня радіоактивності) водного середовища від ¹³⁷Cs (СО, %) розраховували за формулою:

$$CO = \frac{(C_0 - C_p)}{C_0} \cdot 100, \quad (1)$$

де C_0 , C_p – відповідно активність іонів цезію-137 у вихідному розчині і в розчині після певного періоду функціонування біоплато, кБк/л.

Для дослідження впливу іонів калію, кальцію, магнію і натрію на сорбцію ¹³⁷Cs біоплато використовували рослини кукурудзи звичайної гібриду Достаток 300 МВ. Для конструювання біоплато застосовували метод пророщування рослин зверху субстрату (пінопласт).

Результати та обговорення. На першому етапі дослідження насіння гороху, кукурудзи та ячменю розміщували знизу субстрату – пінопласту. Через 3 доби пророщування насіння гороху майже не проросло, а насіння кукурудзи та ячменю почало проростати.

Рис. 1. Динаміка поглинання ^{137}Cs рослинами пшениці різних сортів, $A(^{137}\text{Cs}) = 2,3 \text{ кБк/л}$, $\Delta = 3,8 \%$

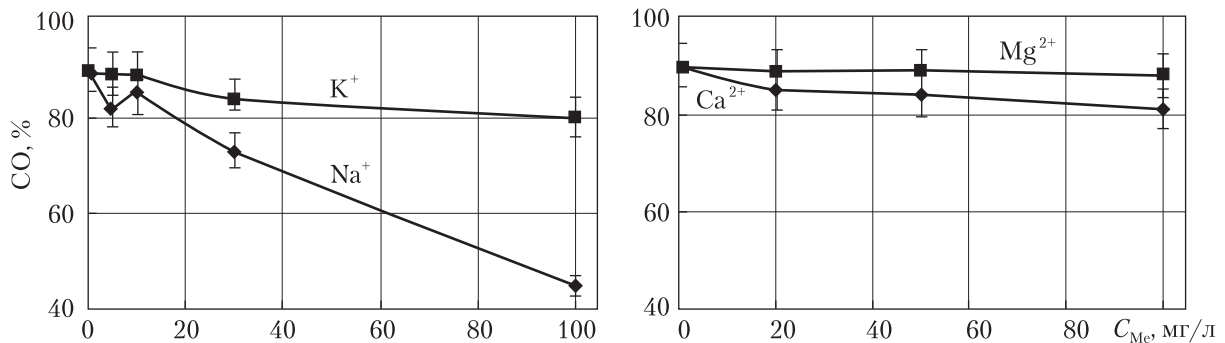
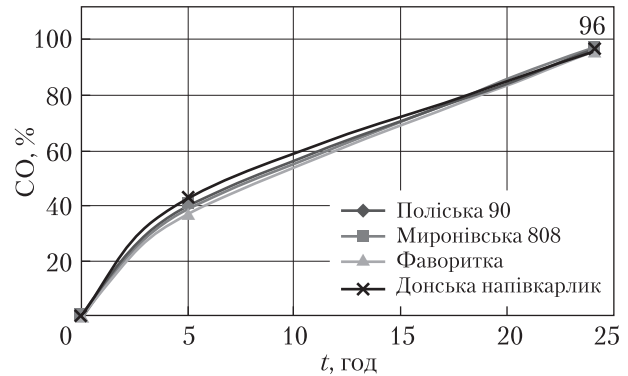


Рис. 2. Вплив концентрації макрокатіонів ($C_{\text{ме}}$) на сорбцію Cs^+ рослинами кукурудзи у складі біоплато. $C_0(\text{Cs}^+) = 10 \text{ мг/дм}^3$, $V_{\text{р-ну}} = 500 \text{ см}^3$, $t_{\text{сорб}} = 7 \text{ діб}$

Після 7 діб інкубації довжина пагонів рослин досягла: ячменю — приблизно 10 см; кукурудзи — близько 3–5 см; гороху — до 3 см, причому спостерігали бактеріальне зараження рослин. Крім цього, конструювання біоплато методом пророщування насіння знизу не задовольняє вимоги щодо гідрофітної споруди, оскільки субстрат біоплато кореневою системою рослин не зв'язувався необхідним чином і, відповідно, конструкція не набувала необхідної щільності.

У варіанті пророщування насіння гороху та кукурудзи, що було рівномірно перемішано з субстратом, також не відбувалося достатнього зв'язування субстрату з кореневою системою рослин для забезпечення необхідної міцності конструкції біоплато та його плавучості.

Ще одним методом конструювання біоплато було пророщування насіння на поверхні субстрату. В усіх варіантах поєднання пінопласту з насінням забезпечувався ефект зв'язування субстрату з кореневою системою і спостерігався високий рівень міцності та плавучості біоплато. У результаті отримана щільна конструкція біоплато для подальших досліджень. Слабкий ефект зв'язування субстрату з кореневою системою спостерігали у варіанті комбінування вермікуліту із рослинами. Варіанти поєднання коркової пробки та керамзиту із рослинами також показали слабкий ефект зв'язування субстрату з кореневою системою, в результаті чого плавучість біоплато не забезпечувалась.

Наступним завданням дослідження була оптимізація гідрофітної споруди. Для досягнення мінімізації крайового ефекту (пухкості по краях біоплато) було застосовано дрібнопористу сітку, що дало змогу збільшити загальну щільність біоплато.

Для забезпечення більш повного контакту проростаючого насіння з субстратом був використаний перліт, який у комбінації з пінопластом створював додатковий капілярний ефект, що, в свою чергу, сприяло швидшому проростанню насіння.

Таким чином, сконструйована гідрофітна споруда відрізнялася від попередніх варіантів максимальною щільністю та однорідністю системи, що забезпечило високий рівень плавучості, і була зручною для транспортування до водних об'єктів.

Для визначення впливу сортової належності рослин на накопичення ^{137}Cs насіння пшениці досліджуваних сортів пророщували до стадії десятидобових проростків, які в подальшому культивували на водному розчині хлориду ^{137}Cs . Питому активність ^{137}Cs вимірювали через 5 та 24 год інкубації (рис. 1). З аналізу рис. 1 випливає, що сортова належність рослин пшениці, зрештою, практично не впливала на накопичення ^{137}Cs . Сортова специфіка незначною мірою виявлялася лише на перших етапах спостереження, а потім вона нівелювалася.

Було досліджено вплив іонів калію, кальцію, магнію і натрію на сорбцію ^{137}Cs наземними рослинами у складі біоплато. На рис. 2 наведено результати дослідження впливу концентрації іонів макроелементів на сорбцію Cs^+ рослинами кукурудзи звичайної.

Встановлено, що вплив конкуруючих іонів зростає в ряду $\text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{K}^+$. Іони магнію у використаних концентраціях майже не впливали на сорбцію ^{137}Cs , на відміну від кальцію та натрію, присутність іонів яких, проте, знижувала сорбцію ^{137}Cs лише на 10 % за концентрації 100 мг/л. Калій (хімічний аналог цезію) пригнічував сорбцію останнього до такого рівня у значно менших концентраціях — 10 мг/л. Причиною цього може бути конкуренція даних елементів за К-транспортні білки. Слід зазначити, що в природних водах концентрація калію досить низька і становить 3–10 мг/л.

Отримані результати вивчення впливу Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} на сорбцію іонів ^{137}Cs рослинами дають підставу припускати можливість високого рівня очищення водного об'єкта за умови наявності у водному середовищі зазначених конкуруючих іонів навіть у підвищених концентраціях, що може бути спричинено, наприклад, внесенням калійних добрив чи вапнуванням ґрунтів.

Висновки. Для очищення водойм від токсичних речовин розроблено новий спосіб конструювання плавучої конструкції біоплато, біотичною складовою якої є наземні рослини.

Випробування декількох типів плавучих субстратів показали, що найбільш оптимальним для використання є гранульований пінополістирол (пінопласт). Встановлено, що розміщення насіння поверх субстрату є оптимальним варіантом його пророщування. Використання перліту в комбінації з пінопластом створювало додатковий капілярний ефект, завдяки чому підвищувалась енергія проростання насіння. Необхідну щільність біоплато, зокрема ущільнення країв біоплато, забезпечувала сітка з дрібним вічком.

Вивчено сорбційні властивості біоплато з рослинами пшениці різних сортів щодо ^{137}Cs . Виявлено високий (понад 90 %) рівень очищення води від даного радіонукліда, який не залежав від сорту.

Підтверджено, що на ефективність сорбції наземними рослинами іонів ^{137}Cs впливає природа і концентрація макрокатіонів у водному середовищі, вплив яких зменшувався в ряду $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Томільцева А.І., Яцик А.В., Мокін В.Б. та ін. Екологічні основи управління водними ресурсами: навч. посіб. Київ: Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. 200 с.
2. Sharma S., Singh B., Manchanda V. K. Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy metal contaminated soil and water. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015. **22**. P. 946—962. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3635-8>
3. Маджд С.М. Досвід експлуатації гідрофітних споруд в Україні та світі. *Наукоємні технології*. 2016. **30**, № 2. С. 228—231. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.30.10569>
4. Романенко В.Д., Крот Ю.Г., Киризії Т.Я., Коваль І.М., Кіпніс Л.С., Потрохов О.С., Зінковський О.Г., Леконцева Т.І. Природні і штучні біоплато. Фундаментальні та практичні аспекти. Київ: Наук. думка, 2012. 110 с.
5. Mikheev A.N., Lapan O.V., Madzhd S.M. Experimental foundations of a new method for rhizofiltration treatment of aqueous ecosystems from ¹³⁷Cs. *J. Water Chem. Tech.* 2017. **39**, No. 4. P. 245—249. <https://doi.org/10.3103/S1063455X17040117>
6. Пшинко Г.М., Гончарук В.В. Наукові засади прогнозування поведження радіонуклідів у довкіллі та при дезактивації водних середовищ. Київ: Наук. думка, 2019. 407 с.

Надішло до редакції 12.11.2021

REFERENCES

1. Tomiltseva, A. I., Yatsyk, A. V., Mokin, V. B. et al. (2017). Ecological bases of water resources management. Kyiv: Institute Environmental Management and Sustainable Nature Management (in Ukrainian).
2. Sharma, S., Singh, B. & Manchanda, V. K. (2015). Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy metal contaminated soil and water. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 22, pp. 946-962. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3635-8>
3. Madzhd, S. M. (2016). Experience in operation of hydrophytic structures in Ukraine and the world. *Naukoiemni tekhnolohii*, 30, No. 2, pp. 228-231 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.18372/2310-5461.30.10569>
4. Romanenko, V. D., Krot, Yu. H., Kyryzii, T. Ya., Koval, I. M., Kipnis, L. S., Potrokhov, O. S., Zinkovskyi, O. H. & Lekontseva, T. I. (2012). Natural and piece bioplato. Fundamental and practical aspects. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
5. Mikheev, A. N., Lapan, O. V. & Madzhd, S. M. (2017). Experimental foundations of a new method for rhizofiltration treatment of aqueous ecosystems from ¹³⁷Cs. *J. Water Chem. Tech.*, 39, No. 4, pp. 245-249. <https://doi.org/10.3103/S1063455X17040117>
6. Pshynko, H. M. & Honcharuk, V. V. (2019). Scientific principles of predicting the behavior of radionuclides in the environment and in decontamination of aquatic environments. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).

Received 12.11.2021

*O.M. Mikhyeyev*¹, <https://orcid.org/0000-0003-4069-3625>

*O.V. Lapan*², <https://orcid.org/0000-0001-6509-4456>

*S.M. Madzhd*³, <https://orcid.org/0000-0003-2857-894X>

*L.M. Cherniak*², <https://orcid.org/0000-0003-4192-3955>

¹ Institute of Cell Biology and Genetic Engineering of the NAS of Ukraine, Kyiv

² National Aviation University, Kyiv

³ State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management, Kyiv

E-mail: mikhalex7@yahoo.com, k.lapan@ukr.net

DEVELOPMENT OF A BIOPHYTE-TYPE HYDROPHYTIC STRUCTURE FOR PHYTOREMEDIATION PURPOSE

A floating structure of a bioplateau has been developed for the purification of water bodies from the toxic substances, the biotic component of which is terrestrial plants. Chemically inert floating materials were used as a substrate for the construction of the bioplateau: perlite, expanded clay, granular foam, vermiculite, cork. Substrate testing has shown that granular expanded polystyrene is the most optimal for the usage. The study of different options for seed germination in the design of the bioplateau has shown that its placement on the top of the substrate is the best option. To optimize the hydrophytic structure a grid was used, which made it possible to increase the overall density of the bioplateau. There was done a comparative study of the effectiveness of purification of the aquatic environment from ions of radiocesium bioplate with wheat plants of different varieties. It is confirmed that the efficiency of sorption of ¹³⁷Cs ions by terrestrial plants is influenced by the nature and concentration of macrocations in the aqueous medium.

Keywords: *water purification, phytoremediation, bio plateau, terrestrial plants, radionuclides, ¹³⁷Cs.*