

<https://doi.org/10.15407/frg2019.04.338>

УДК 574.63

ДІЯ ІОНІВ КАДМІЮ НА РОСТОВІ ПРОЦЕСИ РОСЛИННОГО КОМПОНЕНТА БІОПЛАТО

О.М. МІХЄЄВ, О.В. ЛАПАНЬ

Інститут клітинної біології та генетичної інженерії Національної академії наук України

03143 Київ, вул. Академіка Заболотного, 148

e-mail: k.lapan@ukr.net

Показано можливість використання наземних рослин у фіторе mediaції водних об'єктів. Досліджено вплив різних концентрацій іонів Cd(II) на ріст рослин ячменю звичайного (*Hordeum vulgare* L.) і вівса посівного (*Avena sativa* L.), на біомасу та ступінь транспірації рослин жита посівного (*Secale cereale* L.). Для дослідження впливу іонів кадмію(II) на ростові характеристики рослин конструювали біоплато. Довжини коренів, стебел і біомасу вимірювали на 7-му, 15-ту і 21-шу доби інкубації біоплато на розчині, який містив іони кадмію 1, 20 і 100 мг/л. Виявлено сильніший інгібувальний вплив кадмію на ріст коренів рослин. Встановлено обернену залежність між ступенем транспірації рослин і концентрацією кадмію. В результаті проведених досліджень підтверджено залежність концентрація–ефект: вищі концентрації кадмію чинили сильніший токсичний вплив на рослини. Запропонована технологія фіторе mediaції придатна для використання в діапазоні концентрацій іонів кадмію, які щонайменше у 100 разів перевищують ГДК.

Ключові слова: *Secale cereale*, *Hordeum vulgare*, *Avena sativa*, фіторе mediaція, біоплато, кадмій(II).

Нині завдання очищення водних об'єктів від іонів кадмію є вкрай актуальним. Відомо, що кадмій належить до 1-го класу небезпеки («високонебезпечні речовини») та є одним із найтоксичніших важких металів. Як і багато інших важких металів, кадмій має виражену тенденцію до накопичення в організмі — період його напіввиведення становить 10–35 років [1].

Аналіз літературних джерел [2–13] підтвердив, що біологічні методи очищення вод із застосуванням фітотехнологій на сьогодні є найраціональнішим вирішенням поставленого завдання. Один із фіторе mediaційних методів очищення водойм, що ґрунтується на використанні екосистемних механізмів, в Україні отримав назву «біоплато».

Автори праці [14] запропонували новий тип біоплато, біотичним компонентом якого слугують наземні рослини, які, згідно з проведеними дослідженнями, мають високі сорбційні властивості щодо іонів кадмію(II), цинку(II) і хрому(VI).

З'ясовано, що наземні рослини як біотичні компоненти біоплато мають низку переваг, одна з головних — це зручність в експлуатації гідрофітної споруди: для доочищення водного об'єкта не потрібно облаштовувати додаткову ділянку для розміщення біоплато з вищими водяними рослинами, достатньо проростити насіння на субстраті, що забезпечує плавучість конструкції, та розмістити її на поверхні водного об'єкта, який потрібно очистити.

Важливими питаннями є визначення порога чутливості наземних рослин щодо іонів кадмію та з'ясування життєздатності рослин за високих концентрацій цього металу, адже в рослин існують межі витривалості навантаження важкими металами. Вважають, що кадмій не належить до необхідних для рослини елементів, однак він ефективно поглинається як кореневою системою, так і листками. Як рослини-гіперакумулятори кадмію ми обрали жито посівне, ячмінь звичайний та овес посівний, оскільки ці культури відповідають необхідним вимогам щодо конструкції біоплато.

Очевидно, що сорбційна здатність рослин біоплато залежить від їх фізіологічного стану: інгібування росту і розвитку рослин негативно позначається на поглинанні іонів взагалі та іонів кадмію зокрема. Ще однією причиною зниження ступеня очищення водного середовища є ослаблення транспірації рослинами, що пов'язано зі зменшенням розмірів листової поверхні й кореневої системи [15].

Метою роботи було з'ясування концентраційного інтервалу іонів кадмію, в якому достатньо ефективно відбуватиметься очищення водного об'єкта.

Для досягнення мети ми досліджували вплив іонів кадмію(II) на ростові процеси рослин ячменю звичайного та вівса посівного; вплив іонів кадмію(II) на біомасу рослин жита посівного; вплив іонів кадмію(II) на ступінь транспірації рослин жита посівного.

Методика

У роботі використано однорічні рослини родини Злакові (Poaceae): жито посівне (*Secale cereale*), ячмінь звичайний (*Hordeum vulgare*) та овес посівний (*Avena sativa*).

Для дослідження впливу іонів кадмію(II) на ростові характеристики рослин конструювали біоплато за такою методикою: використовували кювети розміром 21×12,5×2,5 см; дно кювет вкривали шаром гранульованого пінопласту завтовшки 1,5 см, зверху пінопласту насипали шар перліту (50 см³), в кювету наливали 100 мл водопровідної води, поверхню субстрату зволожували водою з пульверизатора, на поверхні розміщували насіння рослин (25 см³) і вміщували кювети в термостат, де підтримувалась температура 24 °С та освітленість 4,4 клк. На 9-ту добу біоплато (з кількох кювет загальною площею 2,8 дм²) з пророслим насінням переносили в ексикатори ($V = 2,5$ л, $S = 4,3$ дм²) з водопровідною водою, в які додатково вносили Cd(II): $C_0 = 1$ мг/л (100 ГДК), 20 мг/л (2000 ГДК), 100 мг/л (10 000 ГДК). Контролем слугував варіант без кадмію. Довжини коренів, стебел і біомасу вимірювали на 7-му, 15-ту і 21-шу доби інкубації біоплато на розчині.

На 21-шу добу інкубації біоплато з рослинами жита посівного (30-добові проростки) на розчині з кадмієм вимірювали залишковий об'єм водного розчину (V_2) та обчислювали об'єм розчину, що випарувався (ΔV), за формулою

$$\Delta V = V_2 - V_1,$$

де V_1 , V_2 — відповідно вихідний об'єм розчину та його об'єм на 21-шу добу інкубації біоплато.

Результати та обговорення

Результати дослідження впливу іонів кадмію(II) на ростові характеристики рослин ячменю звичайного наведені на рис. 1.

З аналізу рис. 1, *а* видно, що на всіх етапах інкубації біоплато на розчині з іонами кадмію(II) ріст кореневої частини рослин ячменю

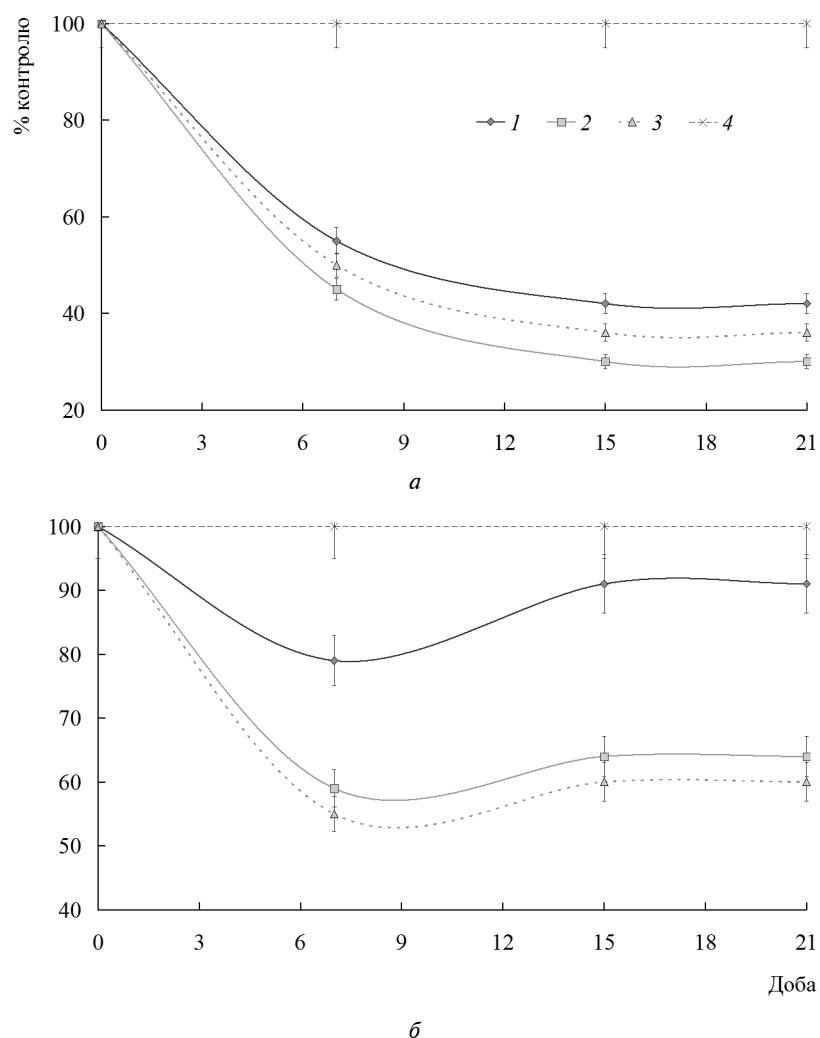


Рис. 1. Залежність довжини коренів (*а*) і пагонів (*б*) рослин ячменю звичайного від концентрації іонів Cd(II) (% контролю). Тут і на рис. 2—4:

1 — 1 мг/л; 2 — 20 мг/л; 3 — 100 мг/л; 4 — контроль

інгібувався. На 7-му добу інкубації довжина коренів ячменю відрізнялась від рослин контрольного варіанта більш як на 40 %, у подальшому ця різниця зросла до 60 %. Слід зазначити, що рівень токсичного впливу на рослини прямо залежав від концентрації іонів кадмію в інкубаційному розчині.

Аналіз результатів, наведених на рис. 1, б дає підстави стверджувати, що на всіх етапах інкубації біоплато на розчині з іонами кадмію(II) ріст надземної частини рослин ячменю інгібувався. За концентрації Cd(II) 1 мг/л довжина пагонів ячменю відрізнялась від рослин контрольного варіанта на ~20 %, за інших концентрацій цей показник становив 40 %. Рівень токсичного впливу на рослини також прямо залежав від концентрації іонів кадмію.

Далі ми дослідили дію іонів Cd(II) на ростові процеси рослин вівса посівного (рис. 2).

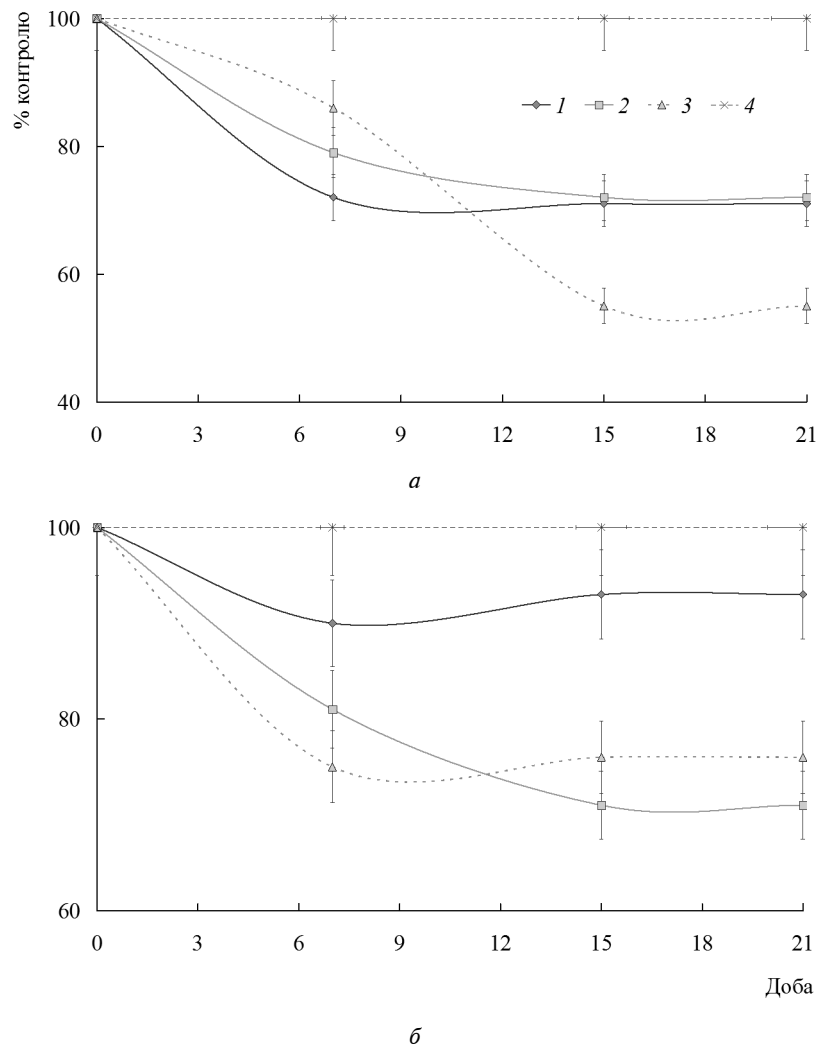


Рис. 2. Динаміка довжини коренів (а) і пагонів (б) рослин вівса посівного залежно від концентрації іонів Cd(II) (% контролю)

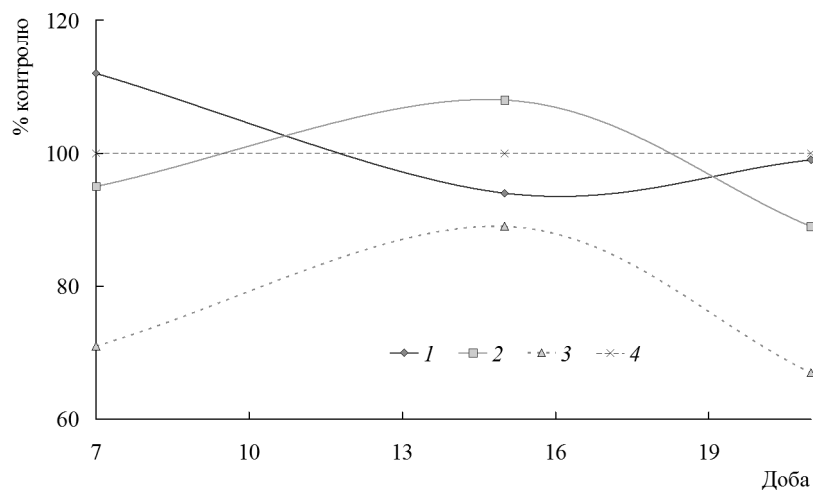


Рис. 3. Динаміка біомаси рослин жита посівного залежно від концентрації іонів Cd(II) (% контролю)

Встановлено, що на всіх етапах інкубації біоплато на розчині з іонами кадмію(II) ріст кореневої частини рослин вівса інгібувався (див. рис. 2, а). На 7-му добу спостереження довжина стебел вівса відрізнялась від рослин контрольного варіанта на 28 % за концентрації Cd(II) 1 мг/л, за інших концентрацій рослини проростали з дещо ліпшими показниками. В подальшому рівень токсичного впливу кадмію(II) досягнув 45 % у варіанті розчину з концентрацією 100 мг/л, для інших варіантів він варіював на рівні близько 30 %.

Згідно з результатами, наведеними на рис. 2, б, на всіх етапах спостереження ріст пагонів рослин вівса інгібувався. Найкоротшими були рослини, що зростали за концентрації кадмію(II) 20 і 100 мг/л.

Відомо, що переважна кількість поглинутих рослинами іонів кадмію інактивується й акумулюється в коренях рослин, що призводить до зменшення розмірів і біомаси кореневої системи, кількості бічних коренів, відмирання корневих волосків.

Результати дослідження впливу іонів кадмію(II) на біомасу рослин жита посівного ілюструє рис. 3.

Встановлено, що на 7-му добу спостереження біомаса рослин жита була дещо більшою, ніж у рослин контрольного варіанта за концентрації Cd(II) 1 мг/л, в усіх інших варіантах розвиток рослин інгібувався. На 14-ту добу подібну ситуацію спостерігали за концентрації Cd(II) 20 мг/л — було зафіксовано незначну стимуляцію приросту біомаси. В подальшому іони Cd(II) чинили інгібувальний ефект на рослини жита.

Останнім завданням нашої роботи було дослідження впливу іонів кадмію(II) на ступінь транспірації у рослинах жита посівного (30-добові проростки). Результати дослідження наведено на рис. 4.

З рис. 4 видно, що іони кадмію(II) знижують ступінь транспірації. Встановлено також, що ступінь транспірації обернено пропорційно залежить від концентрації іонів Cd(II). Причинами цього можуть бути зменшення числа продохів і їхніх розмірів, закриття продохової щілини, пов'язане зі зростанням кількості АБК у зами-

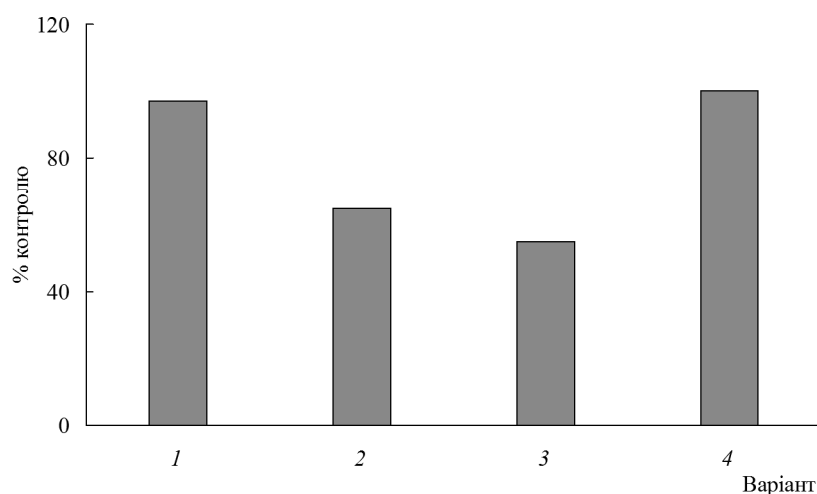


Рис. 4. Ступінь транспірації рослин жита посівного за різних концентрацій іонів Cd(II) (% контролю)

кальних клітинах або зі зміною регуляції K^+ -каналів у них. Відомо також, що підвищення концентрації іонів кадмію(II) у водному середовищі призводить до значного зменшення площі листкової пластинки, що є однією з причин зниження інтенсивності фотосинтезу та транспірації.

Отже, в результаті проведених досліджень відомо залежність концентрація–ефект було підтверджено. Цей інгібувальний ефект в основному посилювався в міру зростання концентрації іонів кадмію(II).

Найвищий рівень гальмування росту пагонів спостерігали за концентрації іонів кадмію(II) 100 мг/л. У результаті зменшувались довжина пагонів, розміри листкових пластинок та біомаса надземних органів.

Встановлено сильніший інгібувальний вплив кадмію(II) на ріст коренів рослин порівняно з пагонами.

Отримані дані вказують на те, що запропоновану технологію фіторемедіації можна застосовувати в діапазоні концентрацій іонів кадмію(II), яка щонайменше у 100 разів перевищує ГДК.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Акімова О.Р., Кураєва І.В., Злобіна К.С. Літологічна характеристика і геохімічний розподіл важких металів у поверхневих водах і донних відкладах Київського мегаполісу. *Екологія і природокористування*. 2013. Вип. 17. С. 98–104.
2. Глазунова И.В., Ромашенко А.К., Тишина К.А. Биоинженерные сооружения и накопители местного стока водосборов для наиболее эффективного использования водных ресурсов речных бассейнов. *Природообустройство*. 2018. № 2. С. 46–54.
3. Нефедьева Е.Э., Сиволобова Н.О., Кравцов М.В., Шайхiev И.Г. Доочистка сточных вод с помощью фиторемедиации. *Вестник Казанского технологического ун-та*. 2017. 20, № 10. С. 145–148.
4. Ульрих Д.В., Тимофеева С.С. Фиторемедиация загрязненных почв и техногенных грунтов хвостохранилищ на территории меднорудных предприятий Южного Урала. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016. 3. С. 341–349.

5. Сорочинський Б.В., Міхеєв О.М., Гродзинський Д.М. Застосування рослинних технологій для деконтамінації ґрунтів і водних об'єктів, що забруднені радіонуклідами після Чорнобильської аварії. *Фізіологія рослин в Україні на межі тисячоліть*. 2002. 2. С. 107—110.
6. Jan Vymazal. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*. 2010. 2 (3). P. 530—549.
7. Ульрих Д.В., Брюхов М.Н. Возможность использования фиторемедиационных сооружений в очистке сточных вод. Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции. 2014. С. 1050—1054.
8. Маджд С.М. Досвід експлуатації гідрофітних споруд в Україні та світі. *Наукоємні технології*. 2016. № 2. С. 228—231.
9. Тимофеева С.С., Ульрих Д.В., Тимофеев С.С. Фитофильтры для очистки сточных вод. *Вестник Казанского технологического ун-та*. 2016. 19, № 16. С. 162—165.
10. Соколов Ю.Н., Плотницький Л.А., Стрюк Т.Ю., Дьяков О.А. Використання біоплато для зменшення біогенного забруднення водойм та водотоків. *Вісник Одеського держ. екол. ун-ту*. 2009. Вип. 7. С. 20—25.
11. Evdokimova G.A., Ivanova L.P., Mozgova N.P., Myazin V.A., Fokina N.V. Floating bioplato for purification of waste quarry waters from mineral nitrogen compounds in the Arctic. *Journal of Environmental Science and Health*. 2016. Part A. N 51. P. 1—6.
12. Маджд С. М., Панченко А. О., Бондар А. М. Роль вищих водних рослин у деструкції забруднювачів в біоінженерних гідрофітних спорудах. *Наукоємні технології*. 2017. № 1. С. 89—93.
13. Gu L., Zhenbin W., Shuiping C. Application of constructed wetlands on wastewater treatment for aquaculture ponds. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*. 2007. 12, N 6. P. 1131—1135.
14. Mikheev A.N., Lapan O.V., Madzhd S.M. Experimental foundations of a new method for rhizofiltration treatment of aqueous ecosystems from ¹³⁷Cs. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2017. N 4. P. 1—5.
15. Казнина Н.М., Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Батова Ю.В. Влияние кадмия на водный обмен растений ячменя. *Труды Карельского научного центра РАН*. 2011. N 3. С. 57—61.

Отримано 19.02.2019

REFERENCES

1. Akimova, O.R., Kuraieva, I.V. & Zlobina, K.S. (2013). Lithological characteristics and geochemical distribution of heavy metals in surface waters and bottom sediments of the Kiev Megapolis. *Ekologiya i pryrodokorystuvannya*, Is. 17, pp. 98-104 [in Ukrainian].
2. Glazunova, I.V., Romashchenko, A.K. & Tishina, K.A. (2018). Bioengineering structures and storage of local drainage of watersheds for the most effective use of water resources of river basins. *Prirodoobustroystvo*, No. 2, pp. 46-54 [in Russian].
3. Nefedeva, E.E., Sivolobova, N.O., Kravtsov, M.V. & Shayhiev, I.G. (2017). Purification of sewage with the help of phytoremediation. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo unta*, 20, No. 10, pp. 145-148 [in Russian].
4. Ul'rih, D.V. & Timofeeva, S.S. (2016). Phytoremedia of contaminated soils and man-made soils of tailings in the territory of the Southern Ural Mining Companies. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*, 15, pp. 341-349 [in Russian].
5. Sorochinskii, B.V., Mikhyeyev, O.M. & Grodzinskii, D.M. (2002). Application of plant technologies for decontamination of soils and water objects contaminated with radionuclides after the Chernobyl accident. *Fiziologiya roslyn v Ukraini na mezhi tisiacholit'*, 2, pp. 107-110 [in Ukrainian].
6. Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2, No. 3, pp. 530-549.
7. Ul'rih, D.V. & Bryuhov, M.N. (2014). The ability to use phytoremediation facilities for wastewater treatment. *Nauka YuUrGU: materialy 66 nauchnoj konferentsii*, pp. 1050-1054 [in Russian].

8. Madzhd, S.M. (2016). Experience in exploiting hydrophilic structures in Ukraine and in the world. Naukoiemni technologii, No. 2, pp. 228-231 [in Ukrainian].
9. Timofeeva, S.S., Ulrih, D.V. & Timofeev, S.S. (2016). Fitofilters for wastewater treatment. Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo un-ta, 19, No. 16, pp. 162-165 [in Russian].
10. Sokolov, Yu.N., Plotnitskiy, L.A., Stryuk, T.Yu. & Dyakov, O.A. (2009). Use of bioplato to reduce nutrient contamination of reservoirs and watercourses. Visnyk Odeskogo derzhavnogo ekologichnogo un-tu, Is. 7, pp. 20-25 [in Ukrainian].
11. Evdokimova, G.A., Ivanova, L.P., Mozgova, N.P., Myazin, V.A. & Fokina, N.V. (2016). Floating bioplato for purification of waste quarry waters from mineral nitrogen compounds in the Arctic. Journal of Environmental Science and Health, Part A, No. 51, pp. 1-6.
12. Madzhd, S. M., Panchenko, A. O. & Bondar, A. M. (2017). The role of higher aquatic plants in the degradation of pollutants in bioengineering hydrofit structures. Naukoiemni technologii, No. 1, pp. 89-93 [in Ukrainian].
13. Gu, L., Zhenbin, W. & Shuiping, C. (2007). Application of constructed wetlands on wastewater treatment for aquaculture ponds. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 12, No. 6, pp. 1131-1135.
14. Mikheev, A.N., Lapan, O.V. & Madzhd, S.M. (2017). Experimental foundations of a new method for rhizofiltration treatment of aqueous ecosystems from ¹³⁷Cs. Journal of water chemistry and technology, No. 4, pp. 1-5.
15. Kaznina, N.M., Titov, A.F., Laydinen, G.F. & Batova, Yu.V. (2011). Influence of cadmium on water exchange of barley plants. Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN, No. 3, pp. 57-61 [in Russian].

Received 19.02.2019

ДЕЙСТВИЕ ИОНОВ КАДМИЯ НА РОСТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ РАСТИТЕЛЬНОГО КОМПОНЕНТА БИОПЛАТО

А.Н. Михеев, О.В. Лапань

Институт клеточной биологии и генетической инженерии Национальной академии наук Украины, Киев

Показана возможность использования наземных растений в фиторемедиации водных объектов. Исследовано влияние различных концентраций ионов Cd(II) на рост растений ячменя обыкновенного (*Hordeum vulgare* L.) и овса посевного (*Avena sativa* L.), на биомассу и степень транспирации растений ржи посевной (*Secale cereale* L.). Для исследования влияния ионов кадмия(II) на ростовые характеристики растений конструировали биоплато. Длину корней, стеблей и биомассу измеряли на 7-, 15- и 21-е сутки инкубации биоплато на растворе, который содержал ионы кадмия 1, 20 и 100 мг/л. Выявлено более сильное ингибирующее влияние кадмия на рост корней растений. Установлена обратная зависимость между степенью транспирации растений и концентрацией кадмия. В результате проведенных исследований подтверждена зависимость концентрация—эффект: более высокие концентрации кадмия оказывали более сильное токсическое воздействие на растения. Предложенная технология фиторемедиации пригодна для использования в диапазоне концентраций ионов кадмия, как минимум в 100 раз превышающих ПДК.

Ключевые слова: *Secale cereale*, *Hordeum vulgare*, *Avena sativa*, фиторемедиация, биоплато, кадмий(II).

**THE EFFECT OF CADMIUM IONS ON THE GROWTH PROCESSES OF THE
BIOPLATO PLANT COMPONENT**

O.M. Mikhayev, O.V. Lapan

Institute of Cell Biology and Genetic Engineering, National Academy of Sciences of
Ukraine
148 Akademika Zabolotnogo St., Kyiv, 03143, Ukraine
e-mail: k.lapan@ukr.net

The paper shows the possibility of using terrestrial plants in phytoremediation of water bodies. The impact of the ions Cd(II) on the growth of plants of common barley (*Hordeum vulgare* L.) and oat (*Avena sativa* L.), and on biomass and transpiration of plants of rye (*Secale cereale* L.); was investigated. To study the influence of ions of cadmium(II) on the growth characteristics of plants bioplato was designed. Measurements of the length of roots, shoots and biomass were performed at 7th, 15th and 21st day of incubation a bioplato on the solution with cadmium ions 1, 2 and 100 mg/l. A stronger inhibitory effect of cadmium on plant root growth was found. The inverse relationship between the degree of transpiration of plants and concentration of cadmium was established. As a result of the studies, the dependence of concentration—effect was confirmed: higher concentrations of cadmium caused greater toxic effects on plants. The proposed technology of phytoremediation can be used in the range of cadmium ion concentrations, which is at least 100 times higher than maximum residue limit.

Key words: *Secale cereale*, *Hordeum vulgare*, *Avena sativa*, phytoremediation, bioplato, cadmium(II).