

Вісник Дніпропетровського університету. Біологія, екологія.  
 Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Seriâ Biologiâ, ekologiâ  
 Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, ecology.

Visn. Dnipropetr. Univ. Ser. Biol. Ekol. 2016. 24(2), 437–443.

doi:10.15421/011659

ISSN 2310-0842 print  
 ISSN 2312-301X online

[www.ecology.dp.ua](http://www.ecology.dp.ua)

УДК 574.58:661.718.1 (477.84)

## Накопичення фосфору рослинами *Myosotis palustris*, *Glyceria maxima* та *Nasturtium officinale* в лабораторному експерименті

О.І. Прокопчук, В.В. Грубінко

*Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, Тернопіль, Україна*

Проблема доступної якісної води нині надзвичайно актуальна, тому важливі технології попередження та профілактики її забруднення та очищення. Останніми десятиліттями все більше застосовують біологічні методи, зокрема очищення водоюм так званним методом біосорбції. Суть останнього зводиться до вилучення небезпечних речовин і поліпшення стану водоюм за допомогою водних організмів, зокрема, рослин. Зважаючи на багатий досвід проведених досліджень щодо біосорбції, ми вирішили спрогнозувати ефективність даного методу за допомогою акумулятивної здатності поглинання фосфорних сполук вищими водними рослинами. Для цього відібрано зразки води та рослин: лепешняк великий (*Glyceria maxima* (C. Hartm.) Holmb.), настурція лікарська (*Nasturtium officinale* R. Br.) та незабудка болотяна (*Myosotis palustris* (L.) L.) із р. Серет в околицях м. Тернопіль. Рослини помістили у простерилізовані скляні банки ємністю 3 л із водою з р. Серет (контрольні проби) та відстояною водопровідною водою із додаванням натрію фосфату (концентрацією фосфору 3,5 мг/дм<sup>3</sup>). Дослідні проби культивували протягом чотирьох місяців (жовтень – січень). У воді визначали вміст фосфатів, перманганатну та біхроматну окиснюваність, а в рослинах – вміст загального фосфору. Просліджено динаміку органічних речовин та вміст фосфатів у воді, накопичення фосфору в рослинах із води. Для виявлення залежності між показниками фосфору у вищих водних рослин і концентрацією фосфат-іонів у воді розраховано коефіцієнти кореляції. *M. palustris* володіє найбільшою акумулювальною здатністю щодо фосфору, що дозволяє вважати вид ефективною водоюм рослиною щодо поглинання елементів та зменшення забруднення водоюм. Для вилучення фосфатів із ґрунту та намулу водоюм найефективніша водна рослина – *G. maxima*, а для зменшення евтрофікації водоюм – *M. palustris* і *N. officinale*.

*Ключові слова:* фосфати; річкова вода; вищі водні рослини; акумуляція

## Experiments on accumulation of phosphorus in the plants *Myosotis palustris*, *Glyceria maxima* and *Nasturtium officinale*

O. Prokopchuk, V. Hrubinko

*Volodymyr Gnatyuk Ternopil National Pedagogical University, Ternopil, Ukraine*

The problem of availability of quality water is highly relevant today, so the technologies of prediction and prevention of water pollution and purification are very important. Biological methods of cleaning, in particular cleaning water by the so-called method of biosorption, have been increasingly used in the last decade. This method means the removal of dangerous substances and improvement of water condition by using aquatic organisms, in particular plants. Therefore, in view of the rich experience of research conducted in the biosorption sphere, we decided to predict the effectiveness of this method by using the cumulative ability of higher water plants to absorb phosphorus compounds. For this purpose, we selected water and plant samples (*Glyceria maxima* (C. Hartm.) Holmb., *Nasturtium officinale* R. Br., *Myosotis palustris* (L.) L.) from the river Seret (Ternopil, Ukraine). The plants were placed into sterilized glass jars filled with 3 liters of water from the river Seret (control samples) and still tap water with addition of sodium phosphate with phosphorus concentration of 3.5 mg/dm<sup>3</sup> (research sample), which were cultured in laboratory conditions for four months. We determined the content of phosphates, permanganate and dichromate oxidation in the water and the total content of phosphorus in the plants. We traced the dynamic of organic substances and the content of phosphates in the water, the accumulation of phosphorus in plants and the rate of accumulation of phosphorus in the plants and in the water. We calculated correlation coefficients to detect the dependence between phosphorus indicators in the aquatic plants and the concentration of phosphate ions in the water. We found that *M. palustris* had the greatest capacity to accumulate phosphorus and the highest rate of phosphorus accumulation from water, which allows us to consider it the most effective aquatic plant for absorption of elements and

*Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027, Україна*  
 Volodymyr Hnatyuk Ternopil National Pedagogical University, Kryvonosa Str., 2, Ternopil, 46027, Ukraine  
 Tel. +38-035-43-59-01. E-mail: olenka13pro@mail.ru, v.grubinko@gmail.com

decreasing water pollution. We also established that *G. maxima* is the most effective aquatic plant for removal of phosphates from the soil and silt ponds for cultivation, while *M. palustris* and *N. officinale* are the most effective in reducing eutrophication of water bodies.

**Keywords:** phosphates; river water; higher aquatic plants; accumulation

## Вступ

Одна з найважливіших екологічних проблем сьогодення – забруднена вода. Тому надзвичайно важливим стало своєчасне попередження накопичення забруднювальних речовин у природних водах (Conley et al., 2009; Gerard et al., 2014). Фосфор – один із найважливіших біогенних елементів у водних екосистемах, який істотно впливає на різноманіття та продуктивність організмів, насамперед, водоростей і вищих водних рослин (Ruttenberg, 2003; Paytan, 2011). Останні зв'язують його з різною інтенсивністю, відіграючи при цьому роль біологічних фільтраторів і очищувачів водних екосистем від забруднення (Nouri et al., 2009; Xing et al., 2010; Chao et al., 2014). Таким чином, фітобіота, споживаючи фосфати з води та твердих субстратів, впливає на їх вміст у гідроекосистемі та бере участь у підтриманні балансу фосфорних сполук, разом із тим забезпечуючи біомасу та продуктивність водойми (Shaibur et al., 2013; Pasichnaja et al., 2015; Costa et al., 2016).

В останнє десятиліття значно зріс інтерес до можливого використання деяких водних рослин для очищення стічних вод і використання добутої біомаси для виробництва енергії, їжі, волокон та інших продуктів (Marion and Paillisson, 2003; Foroughi, 2011; Yu et al., 2013). Зокрема, у багатьох наукових працях висвітлюється питання про накопичувальну здатність біогенних речовин водними рослинами (DeBusk et al., 1995; Lorenzena et al., 2001; Kao et al., 2003; Rooney et al., 2003; Jaiswal, 2011; Henares and Camargo, 2014).

Мета цього дослідження – з'ясувати накопичувальну здатність стосовно фосфору у вищих водних рослин із річкової екосистеми в модельному експерименті за фіксованих умов зростання.

## Матеріали і методи досліджень

Для проведення дослідження відібрано зразки води та вищих водних рослин із р. Серет в околицях м. Тернопіль. Річка Серет – найдовша із приток Дністра у межах Тернопільської області. Ширина русла – 10–20 м, швидкість течії – 0,6 м/с. Каламутність води в середньому – 100–200 г/м<sup>3</sup>. Вода ріки має порівняно значну мінералізацію – 350–550 мг/дм<sup>3</sup>. Середній показник розчиненого кисню – 9,78 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, рН води – 6,95 моль/л, концентрація фосфатів – 2,1–4,6 мг/дм<sup>3</sup> залежно від пори року (Prokorchuk, 2015; Prokorchuk and Kurta, 2015).

Проби води відбирали у пластикові пробовідбірники об'ємом 1 дм<sup>3</sup> у верхній третині загальної глибини (30–40 см під поверхнею). Вміст фосфатів (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) у воді визначали за методикою з утворенням фосфорномолібденової сині з використанням як відновника аскорбінової кислоти (Lure, 1973).

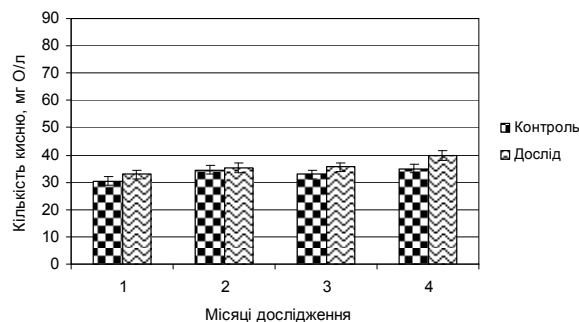
Досліджували фосфоракумулювальну здатність таких рослин: лепешняк великий (*Glyceria maxima* (C. Hartm.) Holmb), настурція лікарська (*Nasturtium officinale* R. Br.) та незабудка болотяна (*Myosotis palustris*

(L.) L.). Ці види поширені від Європи до Центральної Азії. Всі вони – типові гідрофіти, однак перший вид має довге повзуче кореневище закріплене переважно у прибережному ґрунті, а решта – слабозвинені підземні пагони, які кріпляться до прибережного мулу. *G. maxima* цвіте у травні – липні, *N. officinale* і *M. palustris* – у травні – вересні. Лепешняк великий відібраний після періоду вегетації, а настурція лікарська та незабудка болотяна – під час вегетації.

Частину відібраних зразків рослин поміщено у простерилізовані скляні банки ємністю 3 л із водою з р. Серет, що прийняли за контроль (К). Для модельного досліду (Д) у річкову воду додавали розчин дигідрофосфату натрію (NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>), в якому фосфор (P) взятий у кількості 3,5 мг/дм<sup>3</sup> – концентрація, за якої елемент активно поглинається рослинами з води та рівномірно розподіляється у листі, стеблах та коренях (Pasichnaja et al., 2015). Експозиція рослин на розчинах і у природній воді тривала чотири місяці (із жовтня по січень). Температура повітря у приміщенні становила 18–20 °С, температура води – 14–16 °С, освітленість – 10 000 Лк за допомогою люмінесцентних ламп (світлова/темнова фази – 16/8 год). Вміст фосфору в рослинах визначали за допомогою методики Godonij (1972). Визначення перманганатної та біхроматної окиснюваності води проводили за методиками Leite and Lure (1975) та Lure (1973).

## Результати та їх обговорення

Перманганатна та біхроматна окиснюваність води зросла з першого по четвертий місяці, що пов'язано з незначним збільшенням у воді кількості органічних речовин (рис. 1, 2).



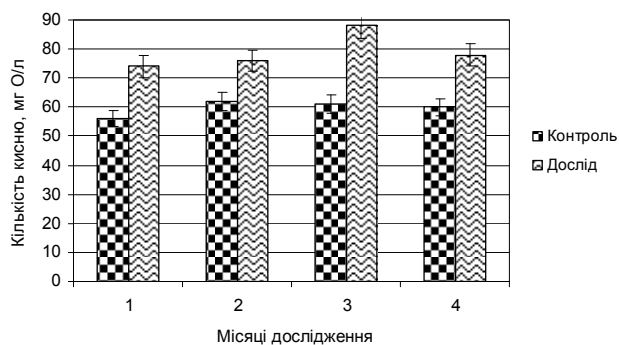
**Рис. 1.** Динаміка перманганатної окиснюваності у контрольних і дослідних пробах води:

місяці дослідження: 1 – жовтень, 2 – листопад, 3 – грудень, 4 – січень;  $M \pm m$ ,  $n = 5$

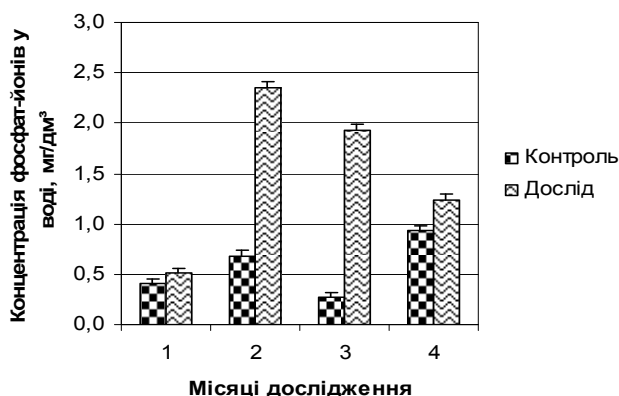
Незначне зростання показників окиснюваності у дослідних пробах, порівняно з контрольними, вказує на те, що сполуки фосфору не лімітують окиснюваність води р. Серет. Органічна речовина у водному середовищі постійно розкладається на прості низькомолекулярні сполуки, які, у свою чергу, внаслідок життєдіяльності мікроорганізмів та у процесі хімічного

окиснення розкладаються до низькомолекулярних неорганічних сполук (Kokin, 1982; Romanenko, 2001). Для росту та розвитку рослин потрібне поживне середовище, передусім азот і фосфор (Pasichnaja et al., 2015), тому наявність значної кількості органіки у воді – сприятливий фактор для культивування рослин.

Концентрація фосфатів у воді дослідних проб, порівняно з контрольними, збільшилася упродовж першого місяця у 1,31 раза, другого – у 3,40, третього – у 7,37, а четвертого – у 1,31 раза (рис. 3).



**Рис. 2.** Динаміка біхроматної окиснюваності у контрольних і дослідних пробах води: позначення див. рис. 1



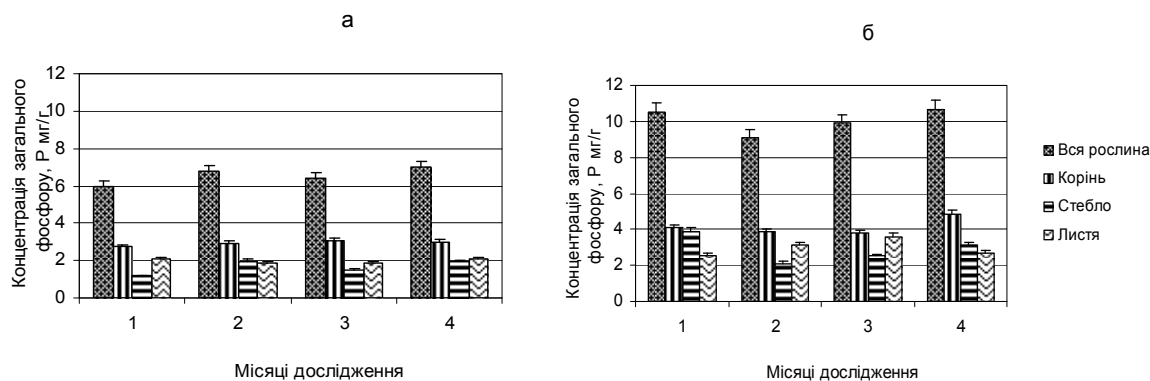
**Рис. 3.** Концентрація фосфатів у контрольних і дослідних пробах води: позначення див. рис. 1

Максимальний вміст фосфатів у дослідних пробах на другий місяць – наслідок внесення фосфат-іонів на перший місяць експерименту. Загальновідомо (Prokorchuk

and Grubinko, 2013), що зміни вмісту фосфору у водних екосистемах визначаються режимом його надходження та умовами трансформації в самій водоймі. Кожна водойма характеризується властивими їй гідрологічними та гідрохімічними умовами, розвитком фітопланктону, вищих водних рослин та рівнем антропогенного навантаження, що визначають рівень концентрації фосфатів у воді. Тому для вивчення сезонної динаміки вмісту фосфору у воді варто мати уявлення про кількісне накопичення цього елемента водними рослинами.

У кореневій системі контрольної групи рослин *G. maxima* вміст фосфору збільшився з першого по третій місяці, а з третього по четвертий – зменшився (рис. 4). У дослідній групі з першого по третій місяці вміст фосфору знизився, а з третього по четвертий – збільшився. Найбільша різниця між вмістом фосфору в контрольних і дослідних пробах виявлена на четвертий місяць, коли дослідні рослини мали в 1,64 раза більший вміст фосфору, ніж контрольні. У стебловій частині контрольної групи рослин вміст фосфору коливався. У дослідній групі з першого по другий місяці вміст фосфору зменшився у 1,87 раза, а з другого по четвертий місяці – збільшився у 1,55 раза. Найбільша різниця між вмістом фосфору у контрольних і дослідних пробах спостерігалась на перший місяць, коли дослідні рослини мали в 3,33 раза більший вміст фосфору, ніж контрольні. У листі контрольної групи рослин вміст фосфору зменшився з першого по третій місяці, а з третього по четвертий – незначно збільшився. У дослідній групі, навпаки, з першого по третій місяці вміст фосфору збільшився, а з третього по четвертий – зменшився в 1,40 раза. Найбільша різниця між вмістом фосфору у контрольних і дослідних пробах зареєстрована на третій місяць, коли дослідні рослини мали в 1,94 раза більший вміст фосфору, ніж контрольні.

Вміст фосфору з контрольної групи в усій рослині загалом коливався. Натомість, у дослідній групі з першого по другий місяці вміст фосфору зменшився, а з другого по четвертий – збільшився. Найбільша різниця між вмістом фосфору у контрольних і дослідних пробах спостерігалась на перший місяць, коли дослідні рослини мали в 1,71 раза більший вміст фосфору, ніж контрольні. Отже, найбільше фосфор акумулює коренева система *G. maxima* з максимальними показниками на четвертий місяць досліджень.



**Рис. 4.** Динаміка вмісту фосфору в рослинах *G. maxima*:

*a* – контрольні, *б* – дослідні проби; місяці дослідження: 1 – жовтень, 2 – листопад, 3 – грудень, 4 – січень;  $M \pm m$ ,  $n = 3$

Вміст фосфору у корені *N. officinale* контрольної групи рослин збільшився з першого по другий місяць в 1,61 раза, а з другого по четвертий зменшився (рис. 5). У дослідній групі з першого по четвертий місяць спостерігали зростання вмісту фосфору у 2,97 раза. Найбільша різниця між вмістом фосфору в контрольних і дослідних пробах зареєстрована на четвертий місяць експерименту, коли дослідні рослини мали в 3,63 раза більший вміст фосфору, ніж контрольні.

У стеблах рослин контрольної групи вміст фосфору збільшився з першого по другий місяць в 1,95 раза, а з другого по четвертий зменшився у 2,32 раза. У рослин дослідної групи з першого по третій місяць вміст фосфору незначно зменшився, а з третього по четвертий – збільшився у 1,50 раза. Найбільша різниця між вмістом фосфору у контрольних і дослідних пробах зареєстрована на четвертий місяць, коли дослідні рослини мали в 3,54 раза більший вміст фосфору, ніж контрольні.

У листі контрольної групи рослин, подібно до кореневої та стебловій частин, вміст фосфору збільшився з першого по другий місяць, а з другого по четвертий зменшився. У дослідній групі з першого по четвертий місяць спостерігали зростання вмісту фосфору (у 2,04 раза щодо першого місяця). Найбільша різниця між вмістом фосфору зареєстрована в контрольних і дослідних пробах на третій місяць експерименту, коли дослідні рослини мали в 3,37 раза більший вміст фосфору, ніж контрольні.

В усій рослині загалом із контрольної групи вміст фосфору збільшився з першого по другий місяць в 1,76 раза, а з другого по четвертий зменшився. У дослідній групі з першого по четвертий місяць спостерігали зростання вмісту фосфору у 2,06 раза, щодо першого місяця. Найбільша різниця між вмістом фосфору у контрольних і дослідних пробах зареєстрована на перший місяць, коли дослідні рослини мали в 3,52 раза більший вміст фосфору, ніж контрольні.

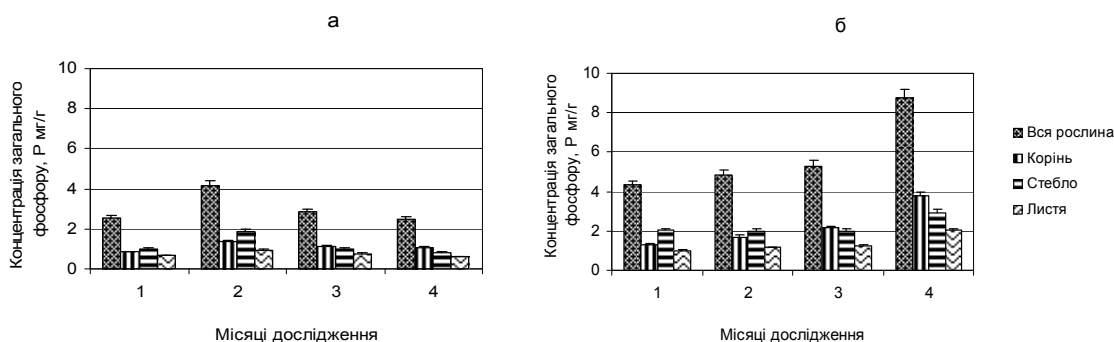


Рис. 5. Динаміка вмісту фосфору в рослинах *N. officinale*: позначення див. рис. 4

У кореневій системі контрольної групи рослин *M. palustris* вміст фосфору збільшився з першого по другий місяць, а з другого по четвертий – зменшився у 1,97 раза (рис. 6). У рослин дослідної групи з першого по четвертий місяць спостерігали зростання вмісту фосфору (у 7,53 раза щодо першого місяця). Найбільша різниця між вмістом фосфору у контрольних і дослідних пробах спостерігалася на четвертий місяць, коли дослідні рослини мали в 4,92 раза більший вміст фосфору, ніж контрольні. У стебловій частині контрольної групи рослин вміст фосфору збільшився з першого по другий місяць, а з другого по четвертий – зменшився в 1,71 раза. У рослин дослідної групи вміст фосфору коливався. Найбільша різниця між вмістом фосфору в контрольних і дослідних пробах зареєстрована на четвертий місяць досліджень, коли рослини мали в 4,57 раза більший вміст

фосфору, ніж контрольні. Вміст фосфору у листі *M. palustris* контрольної та дослідної груп коливався. Найбільша різниця між вмістом фосфору у контрольних і дослідних пробах зареєстрована на третій місяць спостережень, коли дослідні рослини мали в 3,11 раза більший вміст фосфору, ніж контрольні.

В усій рослині *M. palustris* загалом найбільшу різницю між вмістом фосфору в контрольних і дослідних пробах спостерігали на першому місяці спостережень, коли дослідні рослини мали в 4,13 раза більший вміст фосфору, ніж контрольні. Отже, найбільше акумулює фосфор у *M. palustris* стебло з максимальними показниками на четвертий місяць досліджень. *M. palustris*, подібно до *N. officinale* – напівприкріплені водні рослини зі слабо розвинутою кореневою системою, тому саме стебло в них найбільше акумулює фосфор.

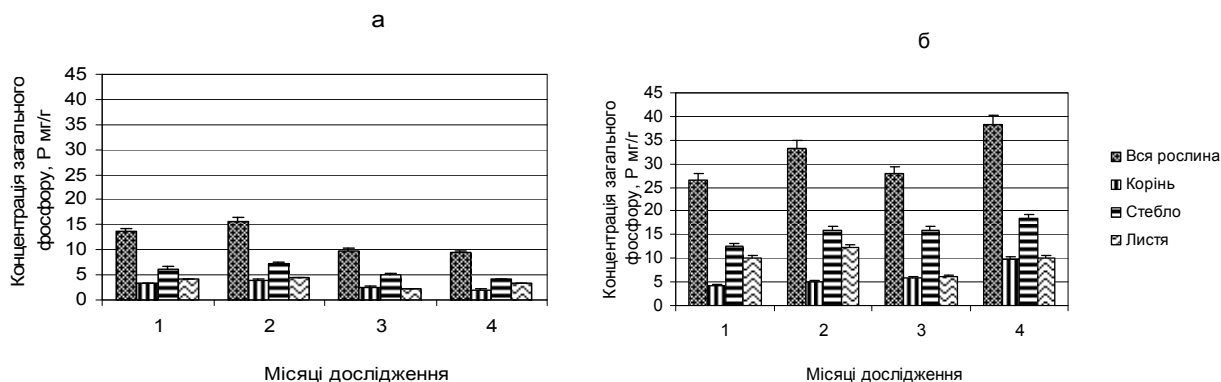


Рис. 6. Динаміка вмісту фосфору в *M. palustris*: позначення див. рис. 4

Порівняння дослідних рослин виявило, що найбільше акумулювала фосфор у *G. maxima* коренева система, у *N. officinale* та *M. palustris* – стебло. Поясненням цьому може бути зростання *G. maxima* на прибережному ґрунті без постійного прямого контакту з водою, а *N. officinale* та *M. palustris* – у водоймі зі значним зануренням у воді стеблової частини рослини.

Зменшення накопичувальної здатності у рослин відбувалося по-різному. У *G. maxima* 44,9% у контрольних і 41,1% фосфору у дослідних пробах акумульовано у корені, 31,0% і 35,0% – у листі та 23,6% і 24,3% – у стеблі, відповідно. У *N. officinale* 42,3% у контрольних і 44,2% у дослідних пробах акумульовано у стеблі, 32,9% і 32,4% – у корені та 25,2% і 23,2% – у листі, відповідно. У *M. palustris* 47,0% у контрольних і 50,1% у дослідних пробах акумульовано у стеблі, 31,0% і 30,5% – у листі, 23,6% і 19,4% – у корені, відповідно. Отже, у *M. palustris* найкраще розвинена стебलो-листова акумуляція фосфору, у *N. officinale* – коренево-стеблова, а у *G. maxima* – коренева.

Щодо рівня накопичення фосфору окремими видами рослин як у контрольних, так і дослідних пробах за чотири місяці досліджень у порядку зменшення накопичувальної здатності види можна розмістити в такій послідовності: *M. palustris* → *G. maxima* → *N. officinale*. При цьому вміст фосфору в *M. palustris* майже в 1,84 раза у контрольних та 3,12 раза у дослідних пробах вищий, ніж у *G. maxima*, та у 4,15 раза у контрольних і у 5,60 раза у дослідних пробах вищий, ніж у *N. officinale*. Виявлена

закономірність дозволяє стверджувати, що *M. palustris* серед досліджуваних рослин володіє найбільшою акумулятивною здатністю щодо сполук фосфору. Відмінності можуть бути пов'язані з особливостями будови кореневої системи, стебел і листків рослин, а також фізіологічними особливостями життєдіяльності та обміну речовин, еколого-фізіологічними вимогами рослин до середовища існування.

*M. palustris* має найвищий коефіцієнт акумуляції фосфору з води (25,9% у контрольних і 27,8% дослідних пробах), *G. maxima* – 14,1% та 9,5%, а *N. officinale* – 6,5% і 5,1%, відповідно. При цьому *G. maxima* має високу здатність акумулювати фосфати кореневою системою, *N. officinale* – кореневою та стебловою частинами, а *M. palustris* – стебловою. Тому для видалення фосфатів із ґрунту та намулу водойм можна запропонувати культивувати *G. maxima*, а для зменшення евтрофікації водойм – *M. palustris* і *N. officinale*.

У *G. maxima* максимальні показники вмісту фосфору в кореневій системі співвідносяться з мінімальними показниками концентрації фосфат-іонів у воді (максимальний  $r = -0,93$  у контрольних пробах на другий місяць). Максимальні показники вмісту фосфору у стеблі *N. officinale* співвідносяться із максимальними показниками вмісту фосфат-іонів у воді ( $r = 0,53$  у контрольних пробах). Упродовж чотирьох місяців дослідження у *G. maxima* максимальну частку фосфору накопичувала у корені, а мінімальну – у першому та четвертому місяці – у листі (рис. 7).

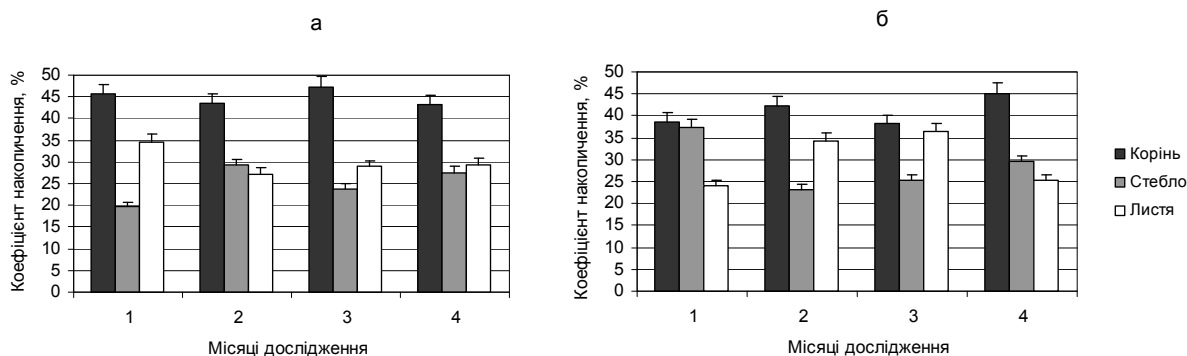


Рис. 7. Коефіцієнт накопичення фосфору в рослинах *G. maxima*: позначення див. рис. 4

Найвищий коефіцієнт накопичення фосфору та коефіцієнт акумуляції цього елемента з води у *G. maxima* у кореневій системі, особливо на перший та четвертий місяці експозиції. У *N. officinale* упродовж першого та другого місяців дослідження максимальна част-

ка накопичення фосфору зареєстрована у стеблі, на третій та четвертий місяці – у корені, а мінімальна – у листі (рис. 8). Коефіцієнт накопичення фосфору у *M. palustris* максимальний у стеблі, а мінімальний – у корені (рис. 9).

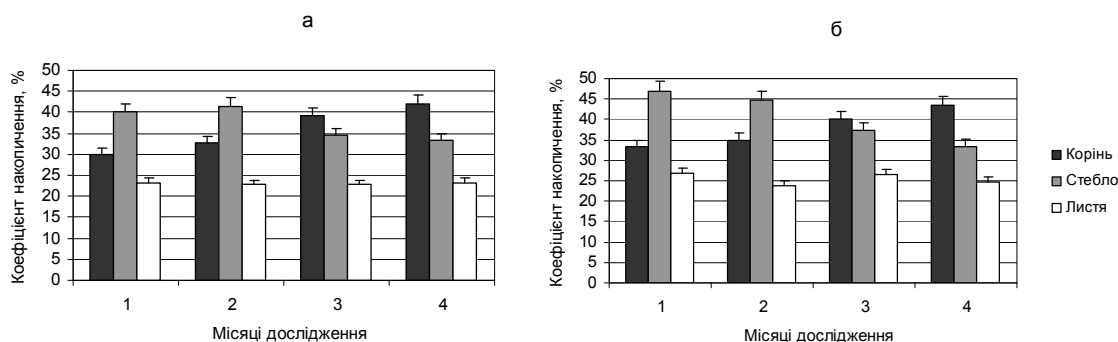


Рис. 8. Коефіцієнт накопичення фосфору в рослинах *N. officinale*: позначення див. рис. 4

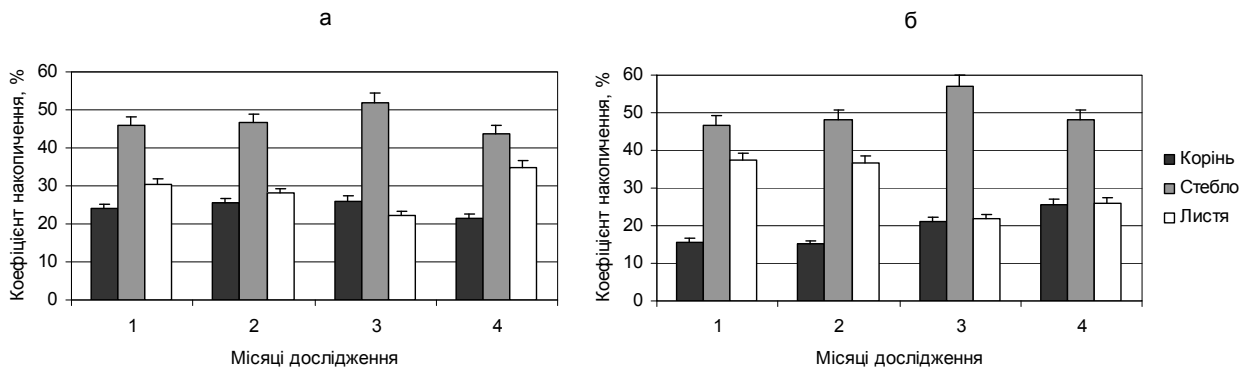


Рис. 9. Коефіцієнт накопичення фосфору в рослинах *M. palustris*: позначення див. рис. 4

У *G. maxima* максимальні показники характерні для кореневої системи рослини, а мінімальні – для листкової. У *N. officinale* максимальні показники зареєстровані для кореневої та стеблової частин, мінімальні – для листкової. У *M. palustris* максимальні показники – для стеблової частини, мінімальні – для кореневої. Поглинання фосфору з води водними рослинами у природних умовах відбувається стебловою частиною рослин, після чого фосфор, як і інші поживні для рослин речовини, спрямовується до зон інтеркалярного та апікального росту (листя, кореня), а потім – у плоди (Kursakov, 1976). Накопичення фосфору у стеблах рослин – одна з ознак достатньої забезпеченості рослин фосфором (Tueva, 1966). Виходячи з отриманих даних, констатуємо той факт, що найкраще забезпечена фосфором *M. palustris*, меншою мірою – *N. officinale*.

### Висновки

Усі досліджувані рослини можуть бути ефективними очищувачами водойм від фосфатів. Однак *M. palustris* володіє найбільшою акумулювальною здатністю щодо фосфору та має найвищий коефіцієнт його акумуляції з води. Це дозволяє вважати її наефективнішою рослиною для зменшення забруднення водойм сполуками фосфору. Для вилучення фосфатів із ґрунту та намулу водойм найефективніше культивувати *G. maxima*, а для зменшення евтрофікації водойм – *M. palustris* і *N. officinale*.

### Бібліографічні посилання

- Adhikari, B., Bag, M., Tripathi, R., 2011. Effect of arsenate on phosphorus accumulation in rice under simulated condition. *J. Crop Weed* 7(1), 8–11.
- Chao, W., Sha-Sha, Z., Pei-Fang, W., Jin, Q., 2014. Effects of vegetations on the removal of contaminants in aquatic environments: A review. *J. Hydrodynam.* 26(4), 497–511.
- Conley, D., Paerl, H., Howarth, R., Boesch, D., Seitzinger, S., Havens, K., Lancelot, C., Likens, G., 2009. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science* 323, 1014–1015.
- Costa, A., Rolim, M., Bonfim-Silva, E., Neto, D., Pedrosa, E., Silva, E., 2016. Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in sugarcane cultivated under different types of water management and doses of nitrogen. *Aust. J. Crop Sci.* 10(3), 362–369.
- DeBusk, T., Peterson, J., Reddy, K., 1995. Use of aquatic and terrestrial plants for removing phosphorus from dairy wastewaters. *Ecol. Eng.* 5, 371–390.
- Foroughi, M., 2011. Role of *Ceratophyllum demersum* in recycling macro elements from wastewater. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 15(2), 401–405.
- Gerard, J., Brion, N., Triest, L., 2014. Effect of water column phosphorus reduction on competitive outcome and traits of *Ludwigia grandiflora* and *L. peploides*, invasive species in Europe. *Aquatic Invasions* 9(2), 157–166.
- Gorodnij, M.M., 1972. *Agrohimičnyj analiz* [Agrochemical analysis]. Vyshcha Shkola, Kyiv (in Ukrainian).
- Henares, M., Camargo, A., 2014. Estimating nitrogen and phosphorus saturation point for *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms and *Salvinia molesta* Mitchell in mesocosms used to treating aquaculture effluent. *Acta Limnol. Bras.* 26(4), 420–428.
- Jaiswal, S., 2011. Growth and nutrient accumulation by *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms in Robertsnon lake, Jabalpur, India. *Ecoprint: An International Journal of Ecology* 18, 91–100.
- Jastrzebska, M., Kostrzevska, M., Wanic, M., Makowski, P., Treder, K., 2015. Phosphorus content in spring Barley and red clover plants in pure and mixed sowing. *Acta Scientiarum Polonorum seria Agricultura* 14(1), 21–32.
- Kao, J., Titus, J., Zhu, W., 2003. N and P retention by five wetland plant species. *Wetland* 23(4), 979–987.
- Kokin, K.A., 1982. *Ekologija vysshyh vodnyh rastenij* [Ecology of higher aquatic plants]. Izd-vo Moskovskogo Univ., Moscow (in Russian).
- Kröger, R., Holland, M., Moore, M., Cooper, C., 2007. Plant senescence: A mechanism for nutrient release in temperate agricultural wetlands. *Environ. Pollut.* 146, 114–119.
- Kursakov, A.L., 1976. Transport asimiljator v rastenii [Transport assimilates in the plant]. Nauka, Moscow (in Russian).
- Leite, V., Lure, Y., 1975. *Opredelenie orhanicheskikh zahriaznenij pitevykh, prirodnykh i stochnykh vod* [Definition of organic pollution of fresh, natural and flowing waters]. Khimiia, Moscow (in Russian).
- Lorenzena, B., Brixa, H., Mendelssohn, I., McKee, K., Miao, S., 2001. Growth, biomass allocation and nutrient use efficiency in *Cladium jamaicense* and *Typha domingensis* as affected by phosphorus and oxygen availability. *Aquat. Bot.* 70, 117–133.
- Lure, Y., 1973. *Unifitsyrovanye metody analiza vod* [Unify methods of water analysis]. Khimiia, Moscow (in Russian).
- Marbaniang, D., Chaturvedi, S., 2014. Cadmium uptake and phytoremediation potential of three aquatic macrophytes of Meghalaya, India. *International Research Journal of Environmental Sciences* 3(6), 25–32.
- Marion, L., Paillisson, J., 2003. A mass balance assessment of the contribution of floating-leaved macrophytes in nutrient

- stocks in an eutrophic macrophyte-dominated lake. *Aquat. Bot.* 75, 249–260.
- Nouri, J., Khorasani, N., Lorestani, B., Karami, M., Hassani, A., Yousef, N., 2009. Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential. *Environ. Earth Sci.* 59, 315–323.
- Ostertag, R., 2010. Foliar nitrogen and phosphorus accumulation responses after fertilization: An example from nutrient-limited Hawaiian forests. *Plant Soil* 334, 85–98.
- Padmanabhan, P., Starnes, D., Sahi, S., 2013. Differential responses of Duo grass (*Lolium* × *Festuca*), a phosphorus hyperaccumulator to high phosphorus and poultry manure treatments. *Afr. J. Biotechnol.* 12(21), 3191–3195.
- Pasichnaja, E.A., Gorbatjuk, L.O., Arsan, O.M., Savluchinskaja, M.A., Kuklja, I.G., Platonov, N.A., Burmistrenko, S.P., 2015. Vlijanie soedinenij fosfora na vodnye rastenija (obzor) [Effect of phosphorus on the aquatic plants (review)]. *Gi-drobiologicheskij Zhurnal* 51(1), 93–108 (in Russian).
- Paytan, A., 2011. Tracing the sources and biogeochemical cycling of phosphorus in aquatic systems using isotopes of oxygen in phosphate. *Handbook of environmental isotope geochemistry, advances in isotope geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin.
- Prokopchuk, E.I., 2015. Korreljacionnyj analiz zavisimosti urovnja fosfatov v rekah ot fiziko-himicheskikh pokazatelej vody (na primere Ternopol'skoj oblasti) [Correlation analysis depending on the level of phosphates in rivers from the physico-chemical parameters of water (by the example of Ternopil region)]. *Biologija: Vid molekuly do biosfery*. P. 221–222 (in Russian).
- Prokopchuk, O., Kurta, J., 2015. Vodnyj pokaznyk (pH) jak faktor reguljaciji rivnja spoluk fosforu u vodi malyh richok [pH as a factor in the regulation of phosphorus in the water of small rivers]. *Molod' i Postup Biologii*, 224–225 (in Ukrainian).
- Prokopchuk, O.I., Grubinko, V.V., 2013. Fosfaty u vodnyh ekosystemah [Phosphates in aquatic ecosystems]. *Naukovi Zapysky TNPU im. V. Hnatiuka. Seria Biologia* 56, 78–85 (in Ukrainian).
- Richardson, A., Lynch, J., Ryan, P., Delhaize, E., Smith, F., Smith, S., Harvey, P., Ryan, M., Veneklaas, E., Lambers, H., Oberson, A., Culvenor, R., Simpson, R., 2011. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant Soil* 349, 21–156.
- Romanenko, V., 2001. Osnovy hidroekologii [Basics of hydroecology]. Oberehu, Kyiv (in Ukrainian).
- Rooney, N., Kalff, J., Habel, C., 2003. The role of submerged macrophyte beds in phosphorus and sediment accumulation in Lake Memphremagog, Quebec, Canada. *Limnol. Oceanogr.* 48(5), 1927–1937.
- Ruttenberg, K., 2003. The global phosphorus cycle. *Treatise on Geochemistry* 8, 585–633.
- Shaibur, M., Adjadeh, T., Kawai, S., 2013. Effect of phosphorus on the concentrations of arsenic, iron and some other elements in barley grown hydroponically. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 13(1), 87–98.
- Siddiqui, S., Umar, S., Husen, A., Iqbal, M., 2015. Effect of phosphorus on plant growth and nutrient accumulation in a high and a low zinc accumulating chickpea genotypes. *Annals of Phytomedicine* 4(2), 102–105.
- Sytnik, K.M., 1972. Fiziologija kornja [Root physiology]. Naukova Dumka, Kyiv (in Russian).
- Tueva, O.F., 1966. Fosfor v pitanii rastenij [Phosphorus in plant nutrition]. Nauka, Moscow (in Russian).
- Xing, W., Huang, W., Liu, G., 2010. Effect of excess iron and copper on physiology of aquatic plant *Spirodela polyrrhiza* (L.) Schleid. *Environ. Toxicol.* 25, 103–112.
- Yu, X., Li, Z., Zhao, S., Li, K., 2013. Biomass accumulation and water purification of water spinach planted on water surface by floating beds for treating biogas slurry. *J. Environ. Prot.* 4, 1230–1235.

Надійшла до редколегії 06.10.2016