# ЕКОЛОГІЯ

УДК (574.64:546.56)+581.526.3
http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Biologiya/editor/submission/13083

# ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ЙОНІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА ЗАНУРЕНІ ВИЩІ ВОДЯНІ РОСЛИНИ ТА ЗЕЛЕНІ НИТЧАСТІ ВОДОРОСТІ

***О. О. ПАСІЧНА,*** *кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідробіології НАН України*
*E-mail: ecopasichna@gmail.com*
***О. М. АРСАН,*** *доктор біологічних наук, професор, провідний науковий співробітник, Інститут гідробіології НАН України*
*E-mail : ecotoxhydrobiol@gmail.com*
***О. О. ГОДЛЕВСЬКА,*** *кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики, Національний університет біоресурсів і природокористування України*
*E-mail: godlevok@ukr.net*
***Л. О. ГОРБАТЮК,*** *кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідробіології НАН України*
*E-mail: ludmila.horbatiuk@gmal.com*
***Т. В. ВІТОВЕЦЬКА,*** *кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії, Київський національний університет будівництва і архітектури*
*E-mail: vitovetskaya@ukr.net*

***Анотація.*** *Проведено дослідження короткочасного (тривалістю 1 доба) і хронічного (14 діб) впливу йонів купруму (II) і мангану (II) на фотосинтез, дихання, вміст хлорофілів a, b та каротиноїдів у зануреній вищій водяній рослині Ceratophyllum demersum L. і зелених нитчастих водоростях Cladophora glomerata (L.) Kütz. Встановлено закономірності накопичення металів макрофітами за зростання концентрацій $Cu^{2+}$ і $Mn^{2+}$ у водному середовищі та часу експозиції. Виявлено зв'язок між чутливістю газообмінних функцій та пігментної системи макрофітів до впливу йонів металів та рівнем їх накопичення у рослинних організмах. Проведено оцінку адаптивної здатності досліджуваних макрофітів до підвищеної концентрації $Cu^{2+}$ і $Mn^{2+}$ у водному середовищі.*

***Ключові слова:*** *купрум, манган, занурені вищі водяні рослини, зелені нитчасті водорості, фотосинтез, дихання, пігменти, адаптація*

## *Актуальність.*

Основними джерелами забруднення прісноводних екосистем важкими металами є промислові підприємства (в т.ч. металургійної та електротехнічної промисловості), транспорт, сільське господарство (внаслідок застосування металовмісних пестицидів і добрив), спалювання нафти і вугілля. Всі важкі метали мають загальну властивість: вони можуть бути біологічно активними. Внаслідок цього метали, потрапивши у водні екосистеми, так чи інакше включаються в біологічний колообіг і за певних біогеохімічних умов і концентраціях здатні виявляти токсичну дію на живі організми [5]. Продукційною основою водних екосистем є фотосинтезуючі організми, серед яких значна роль належить зануреним макрофітам (вищим водяним рослинам і макроводоростям), які накопичують значну кількість металів (Cu, Zn, Mn, Fe, Co, Pb, Cd, Cr, Ni та ін.), що в подальшому мігрують по харчових ланцюгах. В основі участі водяних макрофітів у формуванні первинної продукції і якості води лежать такі фізіологічні функції як фотосинтез, дихання, поглинання біогенних елементів, а також їх виділення в процесі відмирання і розкладу рослинних організмів.

## *Аналіз останніх досліджень та публікацій.*

Як відомо, деякі важкі метали, в тому числі купрум і манган, є життєво необхідними для рослин елементами („біометалами"), оскільки у мікрокількостях беруть участь у функціонуванні багатьох ферментних систем і відіграють важливу роль у життєвих процесах [9]. У той самий час надлишок цих металів у навколишньому середовищі може призвести до порушень процесів життєдіяльності рослинних організмів. Результати експериментального дослідження залежності накопичення металів у гідрофітах від їх концентрації у водному середовищі, механізмів акумуляції та детоксикації йонів металів в рослинних клітинах, умов виникнення токсичного ефекту висвітлено низкою робіт [1, 2, 6–8, 10–13, 15].

***Мета дослідження*** – виявити зв'язок між чутливістю занурених вищих водяних рослин і зелених нитчастих водоростей до впливу йонів важких металів (на прикладі йонів купруму (II) і мангану (II)) та рівнем їх накопичення у рослинних організмах, а також провести оцінку адаптивної здатності макрофітів. Для цього було проведено дослідження короткочасного (тривалістю 1 доба) і хронічного (протягом 14 діб) впливу $Cu^{2+}$ і $Mn^{2+}$ на газообмінні функції та пігментну систему представників занурених вищих водяних рослин і зелених нитчастих водоростей, а також встановлено закономірності накопичення металів макрофітами при зростанні концентрації їх йонів у водному середовищі.

## *Матеріали і методи дослідження.*

Об'єктами досліджень слугували занурена вища водяна рослина кушир занурений *Ceratophyllum demersum* L. і зелені нитчасті водорості *Cladophora glomerata* (L.) Kütz., поширені у водоймах України.

Макрофіти вирощували на розведеному у 20 разів середовищі Успенського № 1 [4] за температури

20 ± 2 °С і комбінованому освітленні лампами розжарювання і денного світла протягом 14 год/добу; pH середовища вимірювали за допомогою іономіра ЭВ-74.

Для дослідження впливу йонів металів (на прикладі $Cu^{2+}$ і $Mn^{2+}$) на макрофіти їх поміщали у скляні акваріуми з водним середовищем (без додавання фосфатів і карбонатів, з якими йони металів утворюють нерозчинні солі, та мікроелементів), приготовленим на основі відстояної водопровідної води з розрахунку: 2 г сирої маси : 3 дм$^3$ води. У водне середовище додавали купрум ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) у концентрації 0,5, 2, 5, 10 і 20 мкг/дм$^3$ (за йонами $Cu^{2+}$) і манган ($MnSO_4 \cdot 5H_2O$) – 5, 20, 50, 100 і 200 мкг/дм$^3$ (за йонами $Mn^{2+}$). Фоновий уміст $Cu^{2+}$ у воді становив 0,14 ± 0,05 мкг/дм$^3$, $Mn^{2+}$ – 0,24 ± 0,02 мкг/дм$^3$.

Експериментальні дослідження тривали 1 та 14 діб (зі зміною розчину на 7 добу). Контрольними були макрофіти, витримані в ідентичних умовах, проте, без додавання йонів металів.

Хлорофіли і каротиноїди екстрагували 80 % розчином ацетону; їх концентрацію у рослинах визначали за максимумами поглинання світла спектрофотометричним методом і розраховували за формулами, наведеними у роботі [14].

Інтенсивність фотосинтезу і темнового дихання макрофітів визначали полярографічним (амперометричним) методом [3].

Для визначення накопичення металів макрофітами рослинний матеріал промивали дистильованою водою і 0,02 М розчином ЕДТА (для видалення адсорбованих на поверхні металів), потім озоляли сумішшю концентрованої азотної й сірчаної кислот під час нагрівання [5]. Уміст металів у рослинному матеріалі визначали методом атомно-адсорбційної спектрофотометрії та розраховували в мікрограмах на 1 г сухої маси.

Всі досліди проводили у 4-5 повторностях. Статистичну обробку одержаних даних проводили в MS Excel 2016.

## *Результати дослідження та їх обговорення.*

Результати проведених досліджень показали, що вплив купруму і мангану на *C. demersum* і *Cl. glomerata* залежить від концентрації $Cu^{2+}$ і $Mn^{2+}$ у водному середовищі, експозиції, а також від накопичення металів у рослинному організмі та від функціонування його адаптивних механізмів. У більшості випадків зі збільшенням концентрації йонів металів у воді, часу їх дії та накопичення у рослинах токсичний ефект зростає.

Одержані дані свідчать про те, що вплив $Cu^{2+}$ і $Mn^{2+}$ на функціональні показники макрофітів має двофазний характер як за часом, так і за концентрацією. Так, у разі внесення у водне середовище йонів металу в концентраціях, що викликають пригнічення процесів газообміну та зменшення вмісту пігментів вже за короткотермінових досліджень (за дії 5–20 мкг/дм$^3$ $Cu^{2+}$ на *C. demersum*), через два тижні токсичний ефект посилюється, що супроводжується кількісною кумуляцією купруму в рослинних організмах. Це свідчить про те, що відгук фізіолого-біохімічних процесів макрофітів на зростання концентрації йонів металів у водному середовищі слід оцінювати за результатами тривалих (14-добових) досліджень, після проходження організмом усіх фаз інтоксикації та адаптації.

Наслідки двотижневого впливу $Cu^{2+}$ і $Mn^{2+}$ на занурену вищу водяну рослину *C. demersum* і зелені нитчасті водорості *Cl. glomerata* показані у таблиці. 1. У хронічних дослідах було виявлено, що за 0,5 мкг/дм$^3$ $Cu^{2+}$ або 5–20 мкг/дм$^3$ $Mn^{2+}$ у водному середовищі відбувається зростання інтенсивності фотосинтезу, темнового дихання, а також збільшення вмісту хлорофілів а і *b* та каротиноїдів у *C. demersum*, а за 0,5–5 мкг/дм$^3$ $Cu^{2+}$ або 5–50 мкг/дм$^3$ $Mn^{2+}$ – у *Cl. glomerata*, що спричиняє зростання продуктивності макрофітів. Це підтверджується і результатами робіт [6, 7]. Перевищення таких концентрацій металів у воді призводить до пригнічення процесів газообміну та зменшення вмісту пігментів у досліджуваних водяних макрофітах.

У таблиці 1 показано, що у разі підвищення концентрації $Cu^{2+}$ і $Mn^{2+}$ у водному середовищі пригнічення деяких із досліджуваних процесів може супроводжуватися стимуляцією інших. Так, за дії 2–5 мкг/дм$^3$ $Cu^{2+}$ або 50 мкг/дм$^3$ $Mn^{2+}$ на *C. demersum*, а також 10 мкг/дм$^3$ $Cu^{2+}$ або 100 мкг/дм$^3$ $Mn^{2+}$ на *Cl. glomerata* поряд зі зниженням інтенсивності фотосинтезу і концентрації хлорофілу а відбувається збільшення інтенсивності темнового дихання і зростання відносного вмісту хлорофілу *b* та каротиноїдів. Це свідчить про напруження адаптивних механізмів рослинних організмів, що протидіють інтоксикації йонами металів, оскільки активація поглинання $O_2$ є захисною реакцією на нестачу енергетичних запасів, що виникає в результаті пригнічення фотосинтезу [8], а підвищення вмісту каротиноїдів спрямоване проти фотодеструкції і пероксидного окиснення хлорофілів [2].

**1. Результати впливу $Cu^2$+ і $Mn^{2+}$ (протягом 14 діб) на газообмінні функції й пігментну систему водяних макрофітів**

| Йон металу | Концентрація йонів у водному середовищі, мкг/дм$^3$ | Макрофіти | Наслідки впливу |
|---|---|---|---|
| $Cu^{2+}$ | 0,5 | Занурена вища водяна рослина *C. demersum* | Зростання інтенсивності фотосинезу і темнового дихання, збільшення вмісту хлорофілів а і *b* та каротиноїдів |
| $Mn^{2+}$ | 5–20 | | |
| $Cu^{2+}$ | 0,5–5 | Зелені нитчасті водорості *Cl. glomerata* | |
| $Mn^{2+}$ | 5–50 | | |
| $Cu^{2+}$ | 2–5 | Занурена вища водяна рослина *C. demersum* | Зменшення інтенсивності фотосивності, збільшення інтенсивності темнового дихання; зменшення вмісту хлорофілу а, збільшення вмісту хлорофілу *b* та каротиноїдів |
| $Mn^{2+}$ | 50 | | |
| $Cu^{2+}$ | 10 | Зелені нитчасті водорості *Cl. glomerata* | |
| $Mn^{2+}$ | 100 | | |
| $Cu^{2+}$ | 10–20 | Занурена вища водяна рослина *C. demersum* | Пригнічення інтенсивності фотосинезу, темнового дихання; зменшення вмісту хлорофілів а і *b* та каротиноїдів |
| $Mn^{2+}$ | 100–200 | | |
| $Cu^{2+}$ | 20 | Зелені нитчасті водорості *Cl. glomerata* | |
| $Mn^{2+}$ | 200 | | |

**2. Накопичення металів водяними макрофітами за зростання концентрації $Cu^{2+}$ і $Mn^{2+}$ у водному середовищі**

| Макрофіти | Купрум | | | Манган | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Концен-трація $Cu^{2+}$ у водному середо-ви-щі, мкг/дм$^3$ | Накопи-чення Cu через 1 добу, мкг/г сухої маси (M ± m, n = 4–5) | Накопи-чення Cu через ⁄4 діб, мкг/г сухої маси (M ± m, n = 4–5) | Концен-трація $Mn^{2+}$ у водному середо-вищі, мкг/дм$^3$ | Накопи-чення Mn через 1 добу, мкг/г сухої маси (M ± m, n = 4–5) | Накопи-чення Mn через ⁄4 діб, мкг/г сухої маси (M ± m, n = 4–5) |
| *Cerato-phyllum demersum* | Контроль | 8,1 ± 0,2 | 8,0 ± 0,3 | Контроль | 83,2 ± 1,6 | 81,5 ± 1,8 |
| | 0,5 | 8,8 ± 0,1 | 11,1 ± 0,6 | 5 | 90,0 ± 2,0 | 133,1 ± 11,0 |
| | 2 | 9,9 ± 0,2 | 12,9 ± 0,7 | 20 | 99,3 ± 2,5 | 211,7 ± 23,8 |
| | 5 | 19,2 ± 0,6 | 16,2 ± 1,07 | 50 | 103,4 ± 3,6 | 394,5 ± 49,3 |
| | 10 | 18,0 ± 0,3 | 25,2 ± 2,2 | 100 | 148,1 ± 7,1 | 542,1 ± 36,5 |
| | 20 | 23,9 ± 0,5 | 40,6 ± 4,4 | 200 | 201,9 ± 12,4 | 775,6 ± 72,6 |
| *Cladophora glomerata* | Контроль | 12,2 ± 0,9 | 12,1 ± 0,6 | Контроль | 73,2 ± 2,5 | 78,0 ± 3,1 |
| | 0,5 | 14,5 ± 0,3 | 16,4 ± 0,5 | 5 | 93,7 ± 5,1 | 144,8 ± 9,5 |
| | 2 | 19,9 ± 1,2 | 28,7 ± 2,3 | 20 | 147,2 ± 8,3 | 290,0 ± 13,8 |
| | 5 | 30,3 ± 2,5 | 49,8 ± 3,9 | 50 | 273,9 ± 8,9 | 623,5 ± 14,9 |
| | 10 | 49,0 ± 3,4 | 88,6 ± 3,7 | 100 | 407,8 ± 13,1 | 1043,2 ± 27,2 |
| | 20 | 75,6 ± 5,6 | 149,9 ± 7,0 | 200 | 737,0 ± 23,6 | 1874,2 ± 71,9 |

Результати визначення вмісту купруму і мангану у досліджуваних макрофітах за умов гострого і хронічного експериментів показали накопичення значної кількості металів як у зануреній вищій водяній рослині *C. demersum*, так і в зелених нитчастих водоростях *Cl. glomerata* (табл. 2). Одержані дані свідчать про те, що зменшення інтенсивності процесів газообміну та вмісту пігментів у *Cl. glomerata* виявляється при значно більшому накопиченні металів (> 50 мкг Cu/г сухої маси і > 1000 мкг Mn/г сухої маси), ніж у *C. demersum* (> 16 мкг Cu/г сухої маси та > 300 мкг Mn/г сухої маси). Таким чином, у зелених нитчастих водоростях *Cl. glomerata* накопичення значної кількості металів відбувається без порушення фізіологічних функцій.

## *Висновки і перспективи.*

Результати досліджень, які показали накопичення значної кількості металів в зелених нитчастих водоростях *Cl. glomerata* без порушення фізіологічних функцій свідчать про відносну стійкість цих водоростей до надлишку $Cu^{2+}$ і $Mn^{2+}$ у водному середовищі, що забезпечується механізмами адаптації. На основі аналізу шляхів адаптації гідрофітів до збільшення концентрації важких металів у воді можна зробити висновок, що у нитчастих водоростей вона здійснюється внаслідок інактивації $Cu^{2+}$ і $Mn^{2+}$ у клітинах шляхом утворення комплексів або ізоляції.

Менше накопичення купруму і мангану *C. demersum* можна пояс-

нити наявністю у вищих водяних рослин захисних гомеостатичних механізмів, які підтримують таку концентрацію металів у клітинах, що не призводить до порушення метаболізму, тобто контролюють рівновагу між процесами їх накопичення і виведення [11] та функціонують при невеликих концентраціях $Cu^{2+}$ і $Mn^{2+}$ у водному середовищі (в межах 0,5–2 ГДК). У разі перевищення таких концентрацій, очевидно, відбувається порушення цих механізмів, внаслідок чого в тканини занурених вищих водяних рослин проникає значна кількість металів. Одночасно високий ступінь накопичення купруму і мангану нитчастими водоростями свідчить про недостатній розвиток систем регуляції вмісту металів. Це, ймовірно, пов'язано з нижчим рівнем організації зелених нитчастих водоростей у порівнянні з вищими водяними рослинами.

Такі дослідження щодо виявлення більш та менш чутливих видів гідрофітів є важливими для оцінки стійкості водної екосистеми в цілому до забруднення важкими металами. Це пов'язано з тим, що стійкі види рослинних організмів можуть витримувати досить високі концентрації важких металів і сприяти формуванню стійкого угруповання. Чутливі ж гідрофіти гинуть, що призводить до зменшення видового різноманіття в екосистемі, зниження біопродуктивності водойми. Тому, базуючись на наших даних, можна стверджувати, що у разі потрапляння у водойми надлишкових кількостей йонів купруму та мангану, в першу чергу, пригнічуватиметься життєдіяльність занурених вищих водяних рослин і в угрупованнях будуть домінувати нитчасті водорості.

## References


1. Burdin K.S., Krupina M.V., Saveliev I.B. (1990). Fiziologicheskiye mekhanizmy regulirovaniya soderzhaniya tyazhelykh metallov v morskikh makrovodoroslyak [Physiological mechanisms of regulation of heavy metals content in marine macroalgae] // Vestnik Mosk. University. Ser. 16, 2, 35–42.
2. Zolotukhina, Ye.Yu, Gavrilenko, Ye.Ye., Burdin, K.S. (1987). Vliyaniye ionov tsinka i medi na fotosintez i dykhaniye morskikh vodorosley [Influence of zinc and copper ions on photosynthesis and respiration of marine algae] // Physiol. plants, 34 (2), 266–275.
3. Merezhko, A.I., Pasichnaya, Ye.A., Pasichnyy, A. P. (1996). Biotestirovaniye toksichnosti vodnoy sredy po funktsional'nym kharakteristikam makrofitov [Biotesting of aquatic toxicity by using functional characteristics of macrophytes ]. Hydrobiol. Jurn., 32 (1), 87–94.
4. Topachevskiy, A.V. ed. (1975). Metody fiziologo-biokhimicheskogo issledovaniya vodorosley v gidrobiologicheskoy praktike [Methods of physiological and biochemical study of algae in hydrobiological practice]. Kiev: Naukova dumka, 247.
5. Nikanorov A.M., Zhulidov A.V. (1991). Biomonitoring metallov v presnovodnykh ekosistemakh [Biomonitoring of metals in freshwater ecosystems]. Leningrad, Russia: Gidrometeoizdat, 312.
6. Pasichna, O.O. (2017). Content of pigments in Cladophora glomerata under the influence of copper (II) and manganese (II) ions in the aquatic environment. Hydrob. J., 53 (1), 60–68.
7. Pasichnaya, Ye.A., Arsan, O.M., Godlevskaya, O.A. (2009). Respiratory metabolism of the higher aquatic macrophytes under the effect of manganese ions (II) of the aquatic environment. Hydrob. J., 45 (6), 97–109.
8. Polishchuk R.A. (1973). Reaktsiya makrofitov obrastaniya na vozdeystviye ionov tyazhelykh metallov [The reaction of foul-

ing macrophytes on the effect of heavy metal ions] // Biological basis of anti-fouling. – Kiev: Naukova dumka, 155–193.
9. Chernavina, I.A. (1970). Fiziologiya i biokhimiya mikroelementov [Physiology and biochemistry of microelements]. M., Vysshaya shkola, 310.
10. El-Khatib, A. A., Hegazy, A. K., Abo-El-Kassem, A. M. (2014). Bioaccumulation potential and physiological responses of aquatic macrophytes to Pb pollution. Int. J. Phytoremediation., 16 (1), 29– 45.
11. Fox, G.G., Loughman, B.C., McCallan, N.R. et al (1994). NMR studies of manganese uptake of manganese pretreated plants. Biol. Plant., 36 (Supple), 150.
12. Gcipta, M., Sinha, S., Chandra, P. (1995). Uptake and toxicity of metals in Scirpus lacustris L. and Bacopa monnieri L. J. Environ. Sci. and Health. A, 29 (10), 2185–2202.
13. Jarvis, T.A., Bielmyer-Fraser, G.K. (2015). Accumulation and effects of metal mixtures in two seaweed species. Comp. Biochem. Physiol. C. Toxicol. Pharmacol., 171, 28–33.
14. Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids. Pigments of photosynthetic biomembranes. Methods in Enzymology, 148, 350–382.
15. Singh, A., Kumar, C.S., Agarwal, A. (2013). Effect of lead and cadmium on aquatic plant Hydrilla verticillata. J. Environ Biol., 34 (6), 1027–1031.

***O. O. Pasichna, O. M. Arsan, O. O. Godlevska, L. O. Gorbatyuk, T. V. Vitovetska (2019). PECULIARITIES OF HEAVY METALS INFLUENCE ON SUBMERGED HIGHER AQUATIC PLANTS AND GREEN FILAMENTOUS ALGAE.*** *SYSTEMS: THEORY AND INNOVATION, 10(3): 84–91. http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Biologiya/editor/submission/13083*

***Abstract.*** *The study of short-term (during of 1 day) and chronic (14 days) influence of copper (II) and manganese (II) ions on photosynthesis, respiration, chlorophylls a, b and carotenoids of submerged higher water plant Ceratophyllum demersum L. and green filamentous algae Cladophora glomerata (L.) Kütz. was done. The peculiarities of metals accumulation by the macrophytes with increasing of concentration of $Cu^{2+}$ and $Mn^{2+}$ in the aquatic environment and exposure time were established. The connection between sensitivity of gas exchange functions and pigment system of the macrophytes to influence of the metals ions and their accumulation by plant organisms was revealed. The assessment of adaptive capacity of the investigated macrophytes to increasing $Cu^{2+}$ and $Mn^{2+}$ concentration in the aquatic environment was carried out.*

***Keywords:*** *copper, manganese, submerged higher aquatic plants, green filamentous algae, photosynthesis, respiration, pigments, adaptation*

***Е. А. Пасичная, О. М. Арсан, О. А. Годлевская, Л. О. Горбатюк, Т. В. Витовецкая (2019). ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПОГРУЖЕННЫЕ ВЫСШИЕ ВОДНЫЕ РАСТЕНИЯ И ЗЕЛЕНЫЕ НИТЧАТЫЕ ВОДОРОСЛИ.*** *SYSTEMS: THEORY AND INNOVATION, 10(3): 84–91. http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Biologiya/editor/submission/13083*

***Аннотация.*** *Проведено исследование кратковременного (продолжительностью 1 сутки) и хронического (14 суток) воздействия ионов меди (II) и марганца (II) на фотосинтез, дыхание, содержание хлорофиллов, a b и каротиноидов на погруженное высшее*

*водное растение Ceratophyllum demersum L. и зеленые нитчатые водоросли Cladophora glomerata (L.) Kütz. Установлены закономерности накопления металлов макрофитами при увеличении концентрации $Cu^{2+}$ и $Mn^{2+}$ в водной среде и времени экспозиции. Выявлена связь между чувствительностью газообменных функций и пигментной системы макрофитов к воздействию ионов металлов и уровнем их накопления в растительных организмах. Проведена оценка адаптивной способности исследуемых макрофитов к возрастанию концентрации $Cu^{2+}$ и $Mn^{2+}$ в водной среде.*

***Ключевые слова:*** *медь, марганец, погруженные высшие водные растения, зеленые нитчатые водоросли, фотосинтез, дыхание, пигменты, адаптация*