

ОЦІНКА ВІНОСУ МАКРО- ТА МІКРОЕЛЕМЕНТІВ НАДЗЕМНОЮ МАСОЮ МІСКАНТУСУ, ВИРОЩЕНОГО НА ТЕХНОЗЕМАХ

Харитонов М.М.¹, Мартинова Н.В.², Бабенко М.Г.¹, Клімкіна І.І.¹

¹Дніпровський державний аграрно-економічний університет
вул. Сергія Єфремова, 25, 49009, м. Дніпро

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Гагаріна, 72, 49010, м. Дніпро
kharytonov.m.m@dsau.dp.ua, nadiamart.bg@gmail.com

Міскантус – одна з найбільш перспективних рослин для відновлюваної енергетики та інших галузей промисловості. Закладені в умовах навчально-дослідної станції рекультивації земель ДДАЕУ на півдні Дніпропетровської області модельні досліди включали чотири види техноземів: лесоподібний суглинок (ЛС), червоно-бура глина (ЧБГ), сіро-зелена глина (СЗГ), темно-сіра глина (ТСГ). Використані в експерименті техноземи бідні на органічну речовину, вміст гумусу в них не перевищує 1,25%. Темно-сіра сланцева та червоно-бура глини представлені в основному гідрослюдою, сіро-зелена глина – монтморилонітом, а в лесоподібному суглинку каолінит, гідрослюда та монтморилоніт знаходяться приблизно в однакових пропорціях. У двох субстратах (СЗГ та ТСГ) концентрація розчинних солей склала 0,2% та 0,28%. Техноземи відносяться до малопродуктивних земель та мають відносний дефіцит балансу елементів живлення. Особливо це стосується змісту фосфору. Незважаючи на досить низький рівень доступних рослин макроелементів, міскантус здатний рости на слабо- та середньозабруднених ґрунтах, давати стабільні врожаї надземної біомаси, починаючи з третього року вирощування. Хоча техноземи відносяться до маргінальних земель та мають відносний дефіцит балансу елементів живлення, вони придатні до вирощування міскантусу як енергокультури. Серед макроелементів, біомаса міскантусу найбільш інтенсивно накопичує сірку, калій та фосфор. Калій та фосфор в основному накопичується в стеблах, а кальцій та сірка – у листі. Серед есенціальних мікроелементів, марганець, молібден, залізо і, особливо цинк і бір, накопичуються у надземній біомасі міскантусу найактивніше. Щорічний винос біотичних елементів надземною масою міскантусу не перевищує 1,1 кг. Щорічний винос токсичних мікроелементів біомасою міскантусу варіює від 1,1 до 6,6 г/га. Найменший винос зафіксований для кадмію (0,1-0,6 г/га). *Ключові слова:* технозем, міскантус, винос елементів, паливна сировина.

Assessment of macro- and microelements uptake by above-ground miscanthus mass growing on technosols. Kharytonov M., Martynova N., Babenko M., Klimkina I.

Miscanthus is one of the most promising crops for renewable energy and other industries. Model experiments conducted in the conditions of the DSAEU Land Reclamation Research Station in the south of the Dnipropetrovsk region included four kinds of technosols: loess-like loam (LS), red-brown clay (RBC), gray-green clay (GGC), dark gray clay (DGC). The technosols used in the experiment are poor in organic matter, the humus content in them does not exceed 1.25%. Dark gray and red-brown clays are mainly represented by hydromica, gray-green clay – by montmorillonite, and in loess-like loam, kaolinite, hydromica and montmorillonite are represented in approximately the same proportions. In two substrates (GGC and DGC), the concentration of soluble salts was 0.2% and 0.28%. Technosols are low-productive lands and have a relative deficit in the balance of nutrients. This especially applies to the phosphorus content. Despite the rather low level of available macronutrients, miscanthus is able to grow on slightly and moderately polluted soils, to produce stable yields of aboveground biomass starting from the third year of cultivation. Although technosols are marginal lands and have a relative deficit in the balance of nutrients, they are suitable for growing miscanthus as an energy crop. Among macronutrients, miscanthus biomass accumulates sulfur, potassium and phosphorus most intensively. Potassium and phosphorus are mainly accumulated in the stems, and calcium and sulfur in the leaves. Among essential micronutrients, manganese, molybdenum, iron and, especially zinc and boron, accumulate in the aboveground biomass of miscanthus most actively. The annual removal of biotic elements by the aboveground mass of miscanthus does not exceed 1.1 kg. The annual removal of toxic microelements by the biomass of miscanthus varies from 1.1 to 6.6 g/ha. The lowest removal was recorded for cadmium (0.1-0.6 g/ha). *Key words:* technosol, miscanthus, elements uptake, fuel raw materials.

Постановка проблеми. Висока продуктивність і невибагливість до умов вирощування, а також його здатність рости на слабо та середньозабруднених ґрунтах, дозволяють закладати плантації міскантусу на малопродуктивних та рекультивованих землях, не займаючи цінних сільськогосподарських угідь. Кількісні та якісні показники біомаси цієї рослини залежать не лише від генетичної складової виду, але й від великої кількості різних зовнішніх факторів: географічного розташування району вирощування,

кліматичних умов, типу ґрунту, водного режиму, технології обробітку, забезпеченості мінеральними елементами.

Метою роботи було вивчення вносу макро- та мікроелементів надземною масою міскантусу, вирощеного на малопродуктивних гірничих породах.

Актуальність дослідження. Відомо, що міскантус розмножується ризомами, які з часом значно збільшують свою біомасу, що, однак, не призводить до прояву інвазивності, тобто захоплення

довколишніх територій. Винесені на поверхню рекультивованого відвалу гірничі породи зазнають процесів геологічного вивітрювання. Це часто призводить до зміни їх реакції рН. Міскантус відрізняється здатністю рости в широкому діапазоні рН – від слабокислої до слаболужної. В ході експерименту було виявлено, що рН трьох з чотирьох досліджених гірничих порід, коливалась від слабколужної (лесоподібний суглинок) до лужної (червоно-бура та сірозелена глини), а темно-сірої сланцевої глини – від слабокислої до слаболужної. Оскільки лесоподібний суглинок є основною підстилаючою породою в умовах степової зони, особливий інтерес представляє консервація еродованих ґрунтів схилів земель. Вивчення виносу макро- та мікроелементів з біомасою міскантусу важливе також і з точки зору оцінки реалізації його фіторе mediaційного потенціалу при вирощуванні на різних за гранулометричним та мінеральним складом гірничих породах.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Знання хімічного складу біомаси міскантусу є дуже важливим з різних точок зору. Якщо говорити про його використання для виробництва пелет, то тут на перше місце виходить вміст сірки через ризик негативного внеску цього елемента у формування «кислотних дощів». Знання співвідношення калію до натрію характеризує рівень окиснювально-відновних процесів у рослині, а також про здатність міскантусу рости на засолених ґрунтах.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Не достатньо дослідженою є міграція есенціальних та токсичних елементів з різних техноземів до надземної маси міскантусу. Зокрема це стосується коефіцієнтів біологічного поглинання та біогеохімічної рухомості мікроелементів.

Новизна. Вирощування міскантусу в Україні переважним чином досліджувалося в умовах більш забезпечених опадами природно-кліматичних зон на дерново-опідзолених та темно-сірих лісових ґрунтах. У роботі вперше визначено рівні виносу макро- та мікроелементів з біомасою міскантусу відповідно до різних за фізико-хімічними властивостями розкритих гірничих порід.

Методологічне або загальнонаукове значення. Закладені в умовах навчально-дослідної станції рекультивації земель ДДАЕУ на півдні Дніпропетровської області модельні досліді передбачають їх тривале дослідження. Були використані наступні чотири моделі техноземів, що утворилися в результаті видобутку марганцевої руди Нікопольського марганцево-рудного басейну: лесоподібний суглинок (ЛС), червоно-бура глина (ЧБГ), сіро-зелена глина (СЗГ), темно-сіра глина (ТСГ). Шар субстратів у посудинах складав 150 см. Рослини вирощувалися протягом 4 років.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вміст макро- та мікроелементів величина відносно варіабельна і залежить від багатьох факторів: тип ґрунту, кліматичні умови, агротехніка, добрива [1, 2]. У свою чергу, хімічний склад біомаси значно впливає на якість кінцевого продукту, що отримується з неї [3, 4]. Наприклад, високий вміст калію в біомасі може посилити корозію в опалювальних котлах та знизити температуру плавлення золи. Сірка також відіграє у процесі горіння. З'єднання сірки, що утворюються при цьому, призводять до корозії і викидаються в атмосферу. У свою чергу, кальцій може перешкоджати виникненню шлакоутворення [5-7]. Збалансований хімічний склад, і особливо, низький вміст забруднюючих речовин особливо важливий для біомаси, що використовується для термічного спалювання, оскільки це сприяє мінімізації їх викидів [8, 9]. Згідно з різними дослідженнями [10, 11], міскантус має високу здатність видаляти важкі метали із забруднених ґрунтів, фіксуючи їх у ризомах і не накопичуючи в надземній біомасі. Так, біомаса ризом міскантусу здатна поглинути 65-75% свинцю, 83-86% міді, 43-88% цинку до 56% кадмію [10, 12].

Методи дослідження. Методика досліджень передбачала визначення наступних параметрів: врожайність міскантусу, вміст макро- та мікроелементів у техноземах та біомасі рослин, винос елементів з щорічним врожаєм надземної біомаси. Врожайність міскантусу була визначена щорічно восени ваговим методом з подальшим розрахунком у т/га. Елементний склад визначали на маспектрометрі ICP MS. Також було визначено коефіцієнти біологічного поглинання (КБП) та біогеохімічної рухомості (БГП), розраховано щорічне винесення елементів 3-4-річними рослинами (кг/га).

Виклад основного матеріалу. Використані в експерименті техноземи бідні на органічну речовину, вміст гумусу в них не перевищує 1,25%. Основною складовою техноземів є глинисті мінерали. При цьому темно-сіра сланцева та червоно-бура глини представлені в основному гідролітою, сіро-зелена глина – монтморилонітом, а в лесоподібному суглинку каолінит, гідролітою та монтморилоніт представлені приблизно в однакових пропорціях [13]. У двох субстратах спостерігається невелике сульфатно-хлоридне засолення. У сіро-зеленій глині концентрація розчинних солей складала 0,2%, у темно-сірій сланцевій глині 0,28%. Техноземи відносяться до малопродуктивних земель та мають відносний дефіцит балансу елементів живлення. Особливо це стосується змісту фосфору [14]. Незважаючи на досить низький рівень доступних рослин макроелементів, міскантус здатний давати стабільні врожаї надземної біомаси, починаючи з третього року вирощування (рис. 1).

Найменша продуктивність відзначається при вирощуванні на темно-сірій сланцевій глині, а найбільша – на червоно-бурій глині та лесоподібному

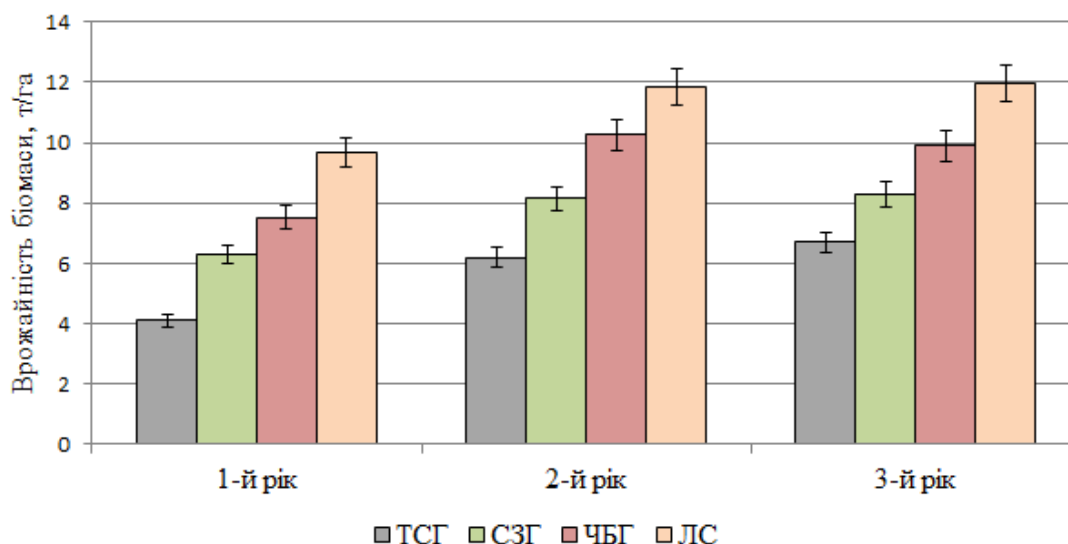


Рис. 1. Урожайність сухої біомаси міскантусу на різних техноземах

суглинку. Таким чином, середній щорічний урожай сухої біомаси міскантусу зрілої плантації становить від 6,5 т/га на темно-сірій сланцевій глині до 11,9 т/га на лесоподібному суглинку. Незважаючи на те, що врожайність на техноземах менша, ніж на родючих ґрунтах [15], вирощування міскантусу на подібних субстратах економічно доцільне.

Біомаса міскантуса досить активно накопичує макроелементи, особливо сірку, коефіцієнти біогіохімічної рухомості якої становили 160-575. КБГП інших елементів значно нижче (табл. 1). Найменші

значення КБГП спостерігалися щодо таких елементів як натрій та магній.

З урахуванням врожайності сухої надземної біомаси міскантусу, було розраховано щорічне винесення макроелементів (рис. 2). Загальне винесення елементів живлення залежить не тільки від продуктивності, але також від вмісту елементів у біомасі. Незважаючи на те, що найбільша врожайність спостерігалася у рослин, вирощених на червоно-бурій глині та лесоподібному суглинку, значний винос майже всіх макроелементів спостерігався також на

Таблиця 1

**Коефіцієнти біологічного поглинання та біогіохімічної рухомості макроелементів
(у чисельнику стебла, у знаменнику листя)**

Субстрат	Коефіцієнт біологічного поглинання (КБП)					
	K	Ca	S	Na	Mg	P
Темно-сіра сланцева глина ТСГ	<u>0,46</u> 0,17	<u>0,03</u> 0,17	<u>0,24</u> 0,25	<u>0,006</u> 0,005	<u>0,06</u> 0,05	<u>0,23</u> 0,14
Сіро-зелена глина СЗГ	<u>0,42</u> 0,22	<u>0,06</u> 0,28	<u>0,45</u> 0,92	<u>0,005</u> 0,005	<u>0,07</u> 0,11	<u>0,47</u> 0,28
Червоно-бура глина ЧБГ	<u>0,37</u> 0,19	<u>0,04</u> 0,20	<u>0,42</u> 0,93	<u>0,005</u> 0,004	<u>0,08</u> 0,09	<u>0,48</u> 0,31
Лесоподібний суглинок ЛС	<u>0,42</u> 0,21	<u>0,03</u> 0,14	<u>0,34</u> 0,92	<u>0,005</u> 0,004	<u>0,08</u> 0,10	<u>0,47</u> 0,34
Субстрат	Коефіцієнт біогіохімічної рухомості (КБГП)					
	K	Ca	S	Na	Mg	P
Темно-сіра сланцева глина ТСГ	<u>35,8</u> 13,5	<u>2,7</u> 16,3	<u>159,7</u> 169,7	<u>1,2</u> 1,0	<u>1,5</u> 1,2	<u>16,6</u> 9,9
Сіро-зелена глина СЗГ	<u>9,5</u> 4,8	<u>3,5</u> 16,7	<u>227,8</u> 458,0	<u>1,3</u> 1,2	<u>2,7</u> 3,3	<u>14,1</u> 8,6
Червоно-бура глина ЧБГ	<u>10,0</u> 5,2	<u>2,8</u> 14,9	<u>219,8</u> 482,8	<u>2,4</u> 2,0	<u>2,6</u> 2,9	<u>14,1</u> 9,2
Лесоподібний суглинок ЛС	<u>10,2</u> 5,1	<u>1,8</u> 9,0	<u>215,9</u> 575,4	<u>2,3</u> 2,0	<u>2,8</u> 3,5	<u>13,7</u> 10,0

темно-сірій сланцевій глині через більший вміст у біомасі. Таким чином, винос калію залежно від субстрату становив від 20 до 34 кг/га, кальцію 19-30 кг/га, сірки 8-11 кг/га, магнію 4-6 кг/га. Винос фосфору і натрію дуже незначний і становив 0,6-1,8 кг/га та 0,2-0,3 кг/га відповідно.

Щорічний винос есенціальних мікроелементів біомасою міскантусу не перевищує 1,1 кг. Найбільше виноситься марганцю та заліза (рис. 3а). Винос цинку та бору становить від 0,08 кг/га до 0,19 кг/га. Відмінності у значеннях між субстратами незначні. Найменше з біомасою міскантусу виносяться мідь, молібден та бор (рис. 3б).

Так, винесення міді становило від 4,3 г/га на темно-сірій сланцевій глині до 13,6 г/га на червоно-бурій глині. Винос молібдену суттєво не відрізнявся на різних субстратах та варіював від 4,8 до 5,9 г/га. Винос

кобальту не перевищував 0,25-0,28 г/га на темно-сірій сланцевій та сіро-зеленій глинах та 0,51 г/га на червоно-бурій глині та лесоподібному суглинку.

Винос хрому, літію, миш'яку та свинцю біомасою міскантусу невеликий і становить від 1,1 до 6,6 г/га (рис. 4).

Кадмій є елементом, який накопичується найменше, його винос становив 0,1-0,6 г/га.

Головні висновки. Міскантус здатний давати стабільні врожаї надземної біомаси, починаючи з третього року вирощування. Найменша продуктивність відзначається при вирощуванні на темно-сірій сланцевій глині, а найбільша – на червоно-бурій глині та лесоподібному суглинку.

Біомаса міскантуса досить активно накопичує макроелементи, особливо сірку. Акумуляція есенціальних мікроелементів відбувається переважно

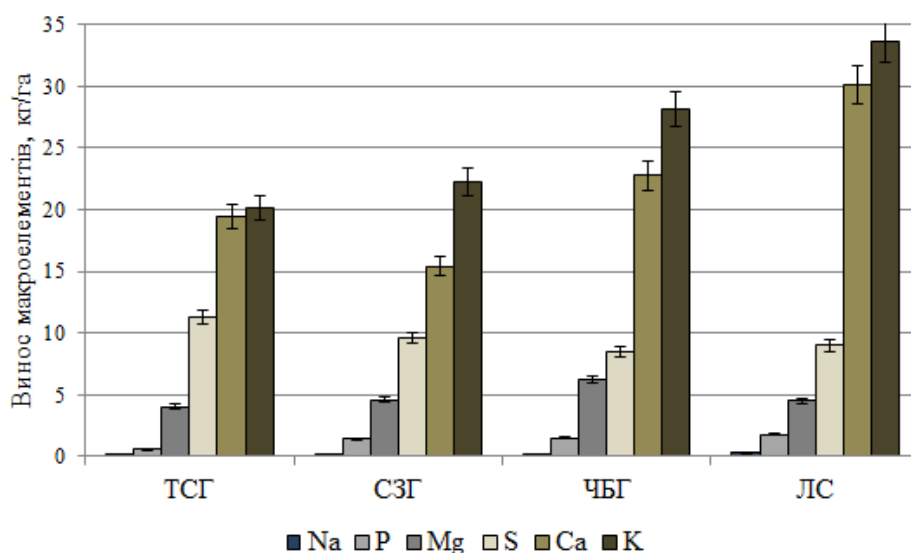
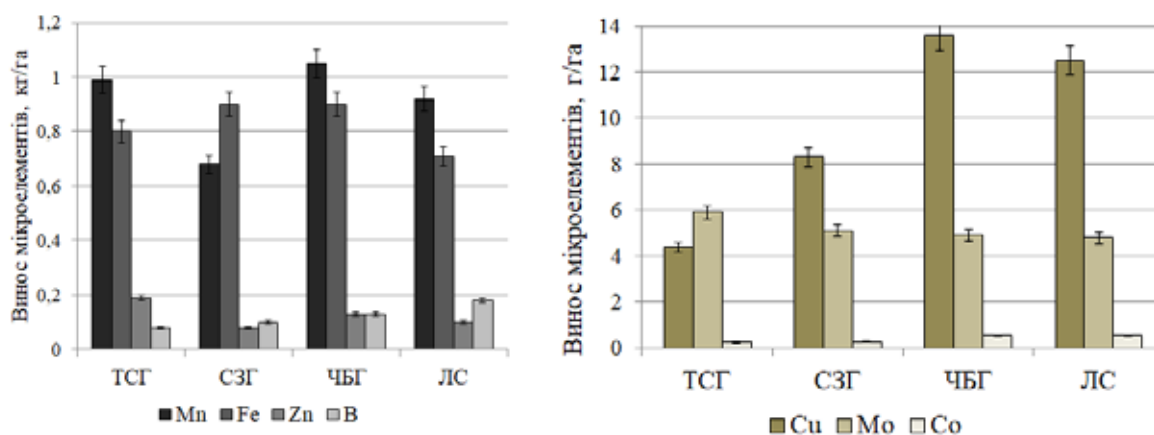


Рис. 2. Щорічний винос макроелементів біомасою міскантусу



а

б

Рис. 3. Щорічний винос есенціальних мікроелементів біомасою міскантусу

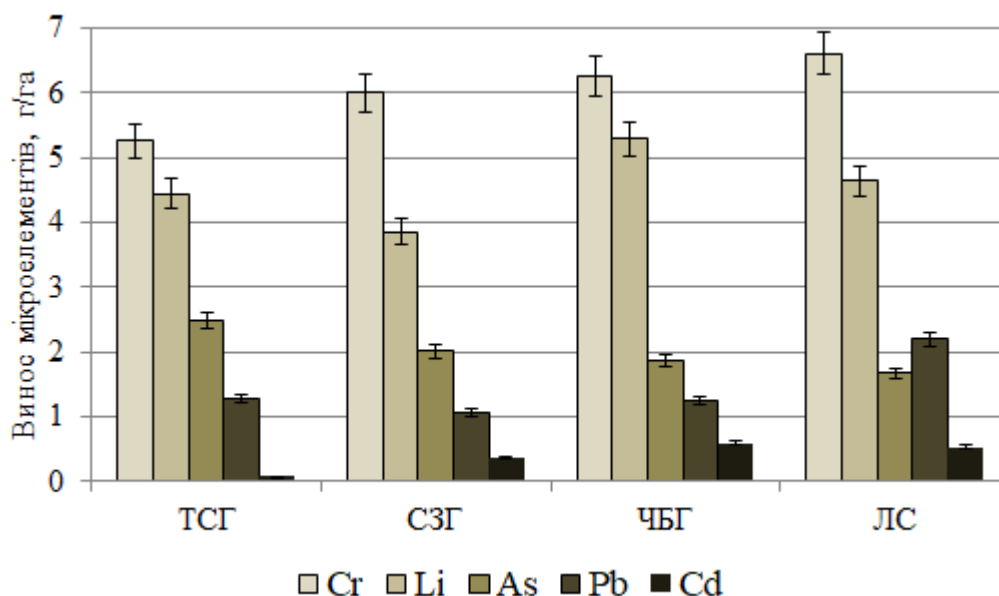


Рис. 4. Щорічний винос токсичних мікроелементів біомасою міскантусу

у листі, і лише цинк переважно накопичується у стеблах. Загальний вміст цинку і бору в біомасі міскантусу значно поступається вмісту заліза і марганцю, проте обидва ці елементи найбільш інтенсивно накопичуються в рослинах. Коефіцієнти біогеохімічного поглинання становлять 5,5-11,2 для цинку та 7,8-31,0 для бору. Найбільше виноситься марганцю та заліза. Найменше з біомасою міскантусу виносяться мідь, молібден та бор. Вміст літію та хрому в листі міскантуса лише трохи перевищує вміст цих елементів у стеблах. Накопичення інших токсичних мікроелементів відбувається переважно у листі. Щорічний винос мікроелементів біомасою міскантусу варіює від кількох грамів до 1 кг на гектар.

Перспективи використання результатів досліджень. У подальшому матеріали досліджень можуть бути ураховані при виборі технозему для вирощу-

вання міскантусу для виробництва паливних гранул з мінімальним ризиком розвитку корозії в котлах та викидом шкідливих речовин в атмосферу.

Disclaimer / Дисклеймер. Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them. Фінансується Європейським Союзом. Однак висловлені погляди та думки належать лише авторам і не обов'язково відображають погляди Європейського Союзу чи Європейського виконавчого агентства з освіти та культури (EACEA). Ні Європейський Союз, ні орган, що надає гранти, не можуть нести за них відповідальності.

Література

1. Stypeczyńska Z., Jaworska H., Dziamski A., Majtkowski W. Content of selected macroelements in the aerial and underground biomass of plants from old stands of the genus *Miscanthus*. *Journal of Elementology*. 2012. 22(1). P. 115–125. DOI: 10.5601/jelem.2016.21.1.1088
2. Roncucci N., Di Nasso O., Nasso N., Tozzini C., Bonari E., Ragolini G. *Miscanthus × giganteus* nutrient concentrations and uptakes in autumn and winter harvests as influenced by soil texture, irrigation and nitrogen fertilization in the Mediterranean. *Glob. Chang. Biol. Bioenergy* 2015. 7, 1009–1018. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12209>
3. Van der Weijde, T., Kiesel, A., Iqbal, Y., Muylle, H., Dolstra, O., Visser, R.G.F., Lewandowski, I., Trindade, L.M. Evaluation of *Miscanthus sinensis* biomass quality as feedstock for conversion into different bioenergy products. *Glob. Chang. Biol. Bioenergy*. 2017. 9, 176–190. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12355>
4. Kalembasa D., Jeżowski S., Symanowicz B., Głowacka K., Kaczmarek Z., Kalembasa, S., Ceraży-Waliszewska J. Changes in the content, uptake and bioaccumulation of macronutrients in genotypes of *Miscanthus* grass. possibilities of using ash from *Miscanthus* biomass. *Fresenius Environ. Bull.* 2019. 28, 1933–1942.
5. Demirbas A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. *Energy exploration & exploitation*. 2002. 20(1), 105–111.
6. Atienza S. G., Satovic Z., Petersen K. K., Dolstra O., Martin A. Influencing combustion quality in *Miscanthus sinensis* Anders.: identification of QTLs for calcium, phosphorus and sulphur content. *Plant Breeding*. 2003. 122(2). P. 141–145.

7. Gołąb-Bogacz I., Helios W., Kotecki A., Kozak M., Jama-Rodzeńska, A. Content and Uptake of Ash and Selected Nutrients (K, Ca, S) with Biomass of *Miscanthus* × *giganteus* Depending on Nitrogen Fertilization. *Agriculture*. 2021. 11(1). P. 76. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010076>
8. Borkowska H., Lipinski W. Content of selected elements in biomass of several species of energy plants. *Acta Agrophys.* 2007. P. 287–292.
9. Spiak Z., Piszcz U., Zbroszczyk T. Modification of sulfur content in *Miscanthus* × *giganteus* under different nitrogen and potassium fertilization. *Ecol. Chem. Eng. A Chemia Inzynieria Ekologiczna A*. 2012. P. 213–221. DOI: 10.2428/ecea.2012.19(03)022
10. Barbosa B., Boléo S., Sidella S., Costa J., Duarte M. P., Mendes B., Cosentino S.L., Fernando A. L. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils using the perennial energy crops *Miscanthus* spp. and *Arundo donax* L. *BioEnergy Research*. 2015, 8(4). P. 1500–1511. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9688-9>
11. Bang J., Kamalakannan S., Lee K., Cho M., Kim C., Kim Y., Oh B. Phytoremediation of heavy metals in contaminated water and soil using *Miscanthus* sp. Goedae-Uksae 1. *International Journal of Phytoremediation*. 2015. 17(6). P. 515–520. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.86220>
12. Osman A. I., Ahmed A. T., Johnston C. R., Rooney D. W. Physicochemical characterization of miscanthus and its application in heavy metals removal from wastewaters. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2018). 37(3). P. 1058–1067. <https://doi.org/10.1002/ep.12783>
13. Фізико-хімічне та біологічне тестування фітомеліорованих гірничих порід Покровського стаціонару рекультивції земель/ Харитонов М. М., Бабенко М. Г., Мицик О. О., Гаврюшенко О. О., Пашова В. Т., Мартинова Н.В. *Agrology*. 2018. 1(3). P. 300–305. <https://doi.org/10.32819/2617-6106.2018.13010>
14. Kharytonov M. M., Resio J.M. Prospects of the Nikopol manganese basin rocks using for land reclamation. *Gruntoznavstvo journal*. 2013. V. 14, 1–2. P. 78–86. http://nbuv.gov.ua/UJRN/grunt_2013_14_1-2_10
15. Ouattara M. S., Laurent A., Barbu C., Berthou M., Borujerdi E., Butier A., Malvoisin P., Romelot D., Loyce C. Effects of several establishment modes of *Miscanthus* × *giganteus* and *Miscanthus sinensis* on yields and yield trends. *GCB Bioenergy*. 2020. 12(7). P. 524–538. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12692>