



Review Article

Phytoremediation Aspects of Energy Crops Use in Ukraine

M. I. Kulyk, M. A. Galytska, M. S. Samoylik, I. I. Zhornyk
Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine

Received: 30 October 2018
Revised: 09 November 2018
Accepted: 15 November 2018

Poltava State Agrarian Academy,
Skovorody str., 1/3, Poltava, 36003, Ukraine

Tel.: ++38-053-250-02-73
E-mail: pdaa@pdaa.edu.ua

Cite this article: Kulyk, M. I., Galytska, M. A., Samoylik, M. S., & Zhornyk, I. I. (2018). Phytoremediation aspects of energy crops use in Ukraine. *Agrology*, 1(4), 373–381. doi: 10.32819/2617-6106.2018.14020

Copyright © 2018 by the Dnipro State Agrarian and Economic University. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Abstract. Today clearing of contaminated soils from heavy metals, pesticide residues is very important problem for Ukraine. Soil pollution is considered to be the result of the functioning of metallurgical and chemical industrial enterprises, as well as the irrational application of chemical plant protection means in the agricultural sector. The range of such preparations as well as the areas of contaminated soils are increasing every year. Phytoremediation with the help of herbaceous plants is one of the most effective methods of decontamination. This list of plants should be supplemented by perennial energy crops, taking into account the absorbing powers of their root system. The basis for preparing the material was the multiple scientific literary sources of domestic and foreign scientists on an investigated theme, the working-out of relevant techniques and scientific and practical recommendations. We applied both general scientific methods (dialectics, analysis and synthesis) and special ones for conducting of analytical review of literature. The largest area of soil in Ukraine is contaminated with cobalt, molybdenum, and copper, whose content exceeds not only the background values but also the maximum permissible concentrations (MPC). It has been defined that the intensity of heavy metals transition in the system “soil-plant” of the energy crops has the following form $Cd \rightarrow Cu \rightarrow Zn \rightarrow Pb$. Perennial energy crops are capable to create quickly an above ground phytomass and to form an aggressive root system that enables them to accumulate heavy metals from the soil. They can be new and important plants for phytoremediation. At the same time, the energy crops are allocated in accordance with agroclimatic zoning taking into account plant responses to the growing conditions and also applying the scheme of soil remediation from heavy metals. It has been established that energy crops (Switchgrass and Silvergrass) are Hyperaccumulators. They actively absorb heavy metals and partially accumulate them in their underground and above ground parts. Silvergrass (*Miscanthus giganteus*) provides higher yield than switchgrass (*Panicum virgatum*), though switchgrass has less dry matter content, higher accumulation of heavy metals in plant phytomass but the maximum permissible concentration is lower than regulated standards. Silvergrass (*Miscanthus giganteus*) provides higher yield than switchgrass (*Panicum virgatum*), though switchgrass has less dry matter content, higher accumulation of heavy metals in plant phytomass and maximum permissible concentration is lower than regulated standards. On termination of the vegetation, the above-ground vegetative mass of these plants can undergo to proper processing that is an additional source of non-ferrous metals or biofuel production for energy purposes.

Keywords: ecology; soil clearing; heavy metals; energy crops; phytoremediation; phytomass; biofuel.

ФітореMediaційні аспекти використання енергетичних культур в умовах України

М. І. Кулик, М. А. Галицька, М. С. Самойлік, І. І. Жорник
Полтавська державна аграрна академія, м. Полтава, Україна

Анотація. Очищення забруднених ґрунтів від важких металів, залишків пестицидів є надзвичайно важливою проблемою для України. Забруднення ґрунту вважається результатом функціонування підприємств металургії та хімічної промисловості, а також нераціонального застосування хімічних засобів захисту рослин в аграрному секторі виробництва. Діапазон таких препаратів, а також площі забруднених ґрунтів зростають з кожним роком. ФітореMediaція за допомогою трав'янистих рослин – один із найефективніших методів дезактивації. Перелік таких рослин має бути доповнений багаторічними енергетичними культурами з урахуванням поглинальних можливостей їх кореневої системи. В основу матеріалу покладено результати багаторічних власних напрацювань щодо застосування енергетичних культур як фітореMediaційних агентів для очищення ґрунтів від важких металів та одночасного їх використання як сировини для виробництва біопалива. Використано множинні наукові літературні джерела вітчизняних і зарубіжних учених за досліджуваною тематикою, а також спеціальні й загальнонаукові методи

дослідження (діалектики, аналізу і синтезу), науково-практичні рекомендації. Найбільша площа ґрунтів в Україні забруднена кобальтом, молибденом та міддю, показники вмісту яких перевищують не лише фонові значення, а й ГДК. Визначено, що інтенсивність переходу важких металів в системі “ґрунт–рослина” енергетичних культур має вигляд: $Cd \rightarrow Cu \rightarrow Zn \rightarrow Pb$. Багаторічні енергетичні культури здатні швидко утворювати надземну фітомасу та формувати потужну кореневу систему, що дозволяє їм акумулювати важкі метали з ґрунту, бути новими й важливими рослинами для фітореMediaції. При цьому розміщують енергетичні культури відповідно до агрокліматичного районування, беручи до уваги реакцію рослин на умови вирощування та використовуючи схему очищення ґрунтів від важких металів. Встановлено, що енергетичні культури (світчґрас і міскантус) є гіперакумуляторами (*Hyperaccumulators*), активно поглинають важкі метали і частково акумулюють їх у своїй підземній та надземній частинах. Міскантус гігантський (*Miscanthus giganteus*) забезпечує більш високу врожайність, ніж просо прутоподібне (*Panicum virgatum*), хоча останній вид забезпечує менший вміст сухої речовини, має більше накопичення важких металів у рослинній фітомасі, але гранично допустима концентрація їх нижча, ніж регламентована нормами. По завершенні вегетації надземна вегетативна маса цих рослин може підлягати відповідній переробці, що є додатковим джерелом кольорових металів, або виробленню біопалива для енергетичних цілей.

Ключові слова: екологія; очищення ґрунтів; важкі метали; ГДК; енергетичні культури; фітореMediaція; фітомаса; біопаливо.

Вступ

Зростання цін на енергоносії, очищення земель від важких металів, зниження рівня використання непоновлюваних джерел енергії та залучення альтернативи до паливно-енергетичного комплексу України нині є нагальними питаннями, які потребують невідкладного вирішення. Тому виникає потреба у всебічному вивченні найбільш поширених на території нашої країни таких енергетичних культур, як верба (*Salix*), міскантус (*Miscanthus Giganteus*), світчґрас (*Panicum virgatum*) та ін. – фітореMediaнтів та рослинної енергетичної сировини. Після відповідної обробки з надземної вегетативної маси цих культур виготовляють рідкі, тверді та газоподібні види біопалива, що можуть бути перетворені в теплову, механічну та електричну енергію, а в перспективі зменшать використання в різних сферах виробництва вугілля, нафти та природного газу (Kurilo & Kulik, 2017).

В Україні є всі необхідні можливості, передусім ґрунтово-кліматичні, які сприяють отриманню високоврожайної енергоємної біомаси енергетичних культур, та наявність значних площ, непридатних для вирощування сільськогосподарських культур (маргінальні землі). Сьогодні науковці інтенсивно вивчають і вдосконалюють технологію вирощування енергетичних культур. Серед дослідників вітчизняні вчені: М. В. Роїк, В. Л. Курило, Д. Б. Рахметов, В. А. Доронін, М. Я. Гументик, О. М. Ганженко та ін. Поряд з агрономічно-обґрунтованим менеджментом вирощування енергетичних культур, актуальним та недостатньо вивченим питанням залишаються екологічні аспекти вирощування цих рослин на маргінальних землях.

У контексті тенденцій, що панують у сфері світової і державної енергетичної політики та безпеки використання енергетичних культур, міскантус (*Miscanthus Giganteus*), просо прутоподібне (*Panicum virgatum*), енергетична верба (*Salix*) та ін., пропагуються як сировина для виробництва екологічно чистого, вуглецево-нейтрального та дешевого біопалива. Тому місце вирощування цих рослин та вид землекористування стають важливими критеріями для виробництва альтернативних видів палива.

Згідно з вимогами IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), під час закладання плантацій енергетичних культур використовують землі несільськогосподарського призначення (маргінальні землі), оскільки зворотна тенденція спровокує конкуренцію з виробництвом харчових продуктів. Вирощування енергетичних культур на землях з високим вмістом вуглецю, наприклад ліси, торф’яники та луки, призведе до непрямої зміни землекористування (Indirect Land Use Change – ILUC), що суперечить європейській концепції Сталого розвитку. І в Україні, і у світі для створення енергетичних плантацій намічена тенденція використання земель несільськогосподарського

призначення (малопродуктивні ґрунти, деградовані, забруднені землі).

Світове техногенне забруднення навколишнього середовища, що почалося в середині минулого століття, набуло глобального характеру. Ситуація продовжує погіршуватися, оскільки збільшуються темпи зростання світового виробництва й споживання продукції нафтохімічного комплексу. 3-по-між основних джерел забруднення навколишнього середовища поліциклічними вуглеводнями (коксохімічне виробництво, установки спалювання викопного палива – ТЕС, ГЕС, котельні, чорна й кольорова металургія, виробництво будівельних матеріалів, целюлозно-паперова, хімічна, нафтохімічна, паливна промисловості, а також транспорт, комунальне й сільське господарство) головна роль належить підприємствам нафтової галузі. Щорічно в результаті “природного витoku” і аварійних розливів на нафтопроводах та родовищах у навколишнє середовище надходить 5–10% від добутої нафти, що становить 1,7–8,8 млн т. Серед нафтових вуглеводнів особливу загрозу являють поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), що є персистентними полютантами, які володіють високою токсичністю й стійкістю до розкладання. Ці речовини характеризуються біоаккумуляцією, є об’єктом трансграничного переносу в повітрі й воді, мають здатність осідати на великій відстані від джерел викидів, накопичуються у воді й наземних екосистемах.

У глобальному екологічному масштабі існують дві основні проблеми: постійне збільшення площ забруднених земель та посилення вимог до біоенергетики. Тому зв’язок фітореMediaції з енергетичними культурами для подальшого сталого розвитку – це вимога не тільки сучасності, але і майбутнього. Ряд країн систематично працюють над пошуком нових потенційних енергетичних культур для виробництва як рідкого, так і твердого біопалива, а також розглядають можливості фітореMediaції на забруднених землях. У цьому напрямі проведені численні дослідження щодо фітотерапії ґрунту з використанням енергетичних культур (Meers et al., 2007; Meers et al., 2010; de Abreu et al., 2012; Pandey et al., 2015). Обрані культури повинні відновлювати забруднені території, підвищувати якість ґрунту, створювати естетично приємний ландшафт та депонування вуглецю. У такий спосіб відбувається потенційний зв’язок між вирощуванням енергетичних культур та фітореMediaцією забруднених земель (Witters et al., 2012).

Використання деградованих або забруднених земель може сприяти частковому вирішенню проблеми використання сільськогосподарських угідь для отримання рослинної сировини на енергетичні цілі (Quinn et al., 2010). Території з відсутнім або недостатнім рослинним покривом є регулярним додатковим джерелом забруднення через процеси вилугування або ерозії ґрунту, що завдає шкоди природним ресурсам. Повторне використання таких територій для виробництва біоенергетич-

них культур може бути корисним рішенням з екологічної точки зору (Nsanganwimana et al., 2014). Максимальний фіторе mediaційний ефект на забруднених землях спостерігається у швидкорослих видів деревних рослин, при цьому дуже мало уваги приділяється використанню трав'яних енергетичних культур (Técher et al., 2011), і лише у кількох джерелах описано використання багаторічних культур другого покоління біопалива для фіторе mediaції забруднених земель (Hromádsko et al., 2010). Наявне різноманіття енергетичних культур сприяє виробництву біопалива та очищенню забруднених ділянок. Для успішного впровадження та використання багаторічних енергокультур необхідно зрозуміти і проаналізувати поточний стан проблеми та розробити ефективні стратегії використання багаторічних трав як фіторе mediaційний засіб, уникаючи негативних наслідків для суспільства й навколишнього середовища (Bellamy et al., 2009; Voehmel et al., 2008). Не в повній мірі вивчено особливості використання енергетичних культур для фіторе mediaції різних типів забруднених земель на фоні різних забруднювачів.

Ґрунти в Україні постійно забруднюються полутантами, зокрема залишками пестицидів, важкими металами, і площі таких земель зростають. Це є наслідком не лише діяльності підприємств важкої металургії та хімічної промисловості, а й нерационального використання хімічних засобів захисту рослин в аграрному секторі виробництва. Щороку асортимент шкідливих препаратів збільшується. Додають неприємностей і відходи двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів, відходів і переробки корисних копалин, міські стоки мегаполісів тощо. Території практично всіх бензозаправних станцій, паливних баз, промислових підприємств нафтопереробного комплексу, автомобільних і залізничних магістралей в тій чи іншій мірі забруднені ПАР. Маргінальні землі можуть простиратися на великі відстані, що ускладнює проведення традиційних рекультивационних робіт, та загрожувати здоров'ю людини (Ridej et al., 2009).

Так, важкі метали й хімічні забруднювачі середовища, накопичуючись і просуваючись по харчовому ланцюгу (ґрунт–рослина–тварина–людина), уражають різні органи тварин і людини, викликаючи захворювання (Golets et al., 2009). Тому виникає потреба у вивченні інноваційних способів очищення ґрунтів від важких металів та їх сполук. Одним з ефективних способів позбавлення ґрунту від забруднювачів є фіторе mediaція.

Відновлення функціональних та екосистемних властивостей забруднених земель дозволить повернути їх до сільськогосподарського використання. Варіанти фізико-хімічної реабілітації забруднених ґрунтів зазнають критики через їх дороговизну та недостатню ефективність. Використання рослин і супутніх з ними мікроорганізмів може бути стійким та економічно вигідним засобом зменшення впливу забруднюючих речовин на ґрунтовий комплекс. Фітоменеджмент має бути спрямований на використання непродуктивних культур для пом'якшення екологічних і санітарних ризиків, спричинених забруднювачами, та відновлення властивостей екосистеми. Культури, що використовуються для відновлення ґрунтів, повинні бути толерантними до забруднюючих речовин, унеможлилювати їх перенесення в харчовий ланцюг і ефективно виробляти товарну біомасу.

Виходячи зі здатності енергетичних культур накопичувати неорганічні забруднювачі в кореневій системі та розкласти стійкі органічні забруднювачі в ґрунті, ці види рослин є оптимальними для фітостабілізації та фітодеструкції. Вирощування енергетичних культур на забруднених та деградованих ґрунтах вважаємо перспективним варіантом з метою уникнення використання орних земель сільськогосподарського призначення та зменшення конкуренції між продовольчим та біоенергетичним землекористуванням (Nsanganwimana et al., 2014).

Згадані енергетичні культури характеризуються високим потенціалом виробництва біомаси та низькими затратами для

вирощування, тому вони можуть зайняти лідируючі позиції з-поміж рослин, що використовують для очищення ґрунтів. Оскільки за існуючої глобальної тенденції обмеження земель сільськогосподарського використання, розвиток біоенергетичної промисловості, що заснована на вирощуванні енергетичних культур, має базуватися на використанні маргінальних земель. Тому в даній публікації увага зосереджена на оцінці екологічності енергетичних культур в умовах маргінальних земель, які в цьому контексті визначаються як землі, що не використовуються в сільськогосподарському виробництві.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Перші наукові дослідження з очищення ґрунтів і води проведени в 50-х роках минулого століття в Ізраїлі, однак активний розвиток очищення ґрунтового комплексу з використанням рослин відбувся тільки у 80-х роках. У зв'язку з впровадженням ефективної й малозатратної технології з'явився новий термін "фіторе mediaція навколишнього середовища", що припускає відновлення антропогенно порушених екосистем за участі рослин. Цей термін фактично відноситься до технологій у рослинництві, де використовуються природні або генетично модифіковані культури для очищення забруднених екосистем (Flathman & Lanza, 1998). Термін "фіторе mediaція" був розроблений професором Центру біотехнологій сільського господарства та природокористування Рутгерського університету (США) Іллею Раскіним у 1989 році (Kumar et al., 1995). У світі існують органічні та неорганічні забруднювачі, але забруднення ґрунтів важкими металами є великою проблемою. В Україні на забруднення ґрунтів важкими металами припадає понад 37% випадків, 33,7% випадків забруднення мінеральними маслами, 13,3% випадків – поліциклічними ароматичними вуглеводнями і т. д. (Pandey et al., 2016).

Фіторе mediaційна технологія заснована на здатності рослин видаляти токсичні речовини з навколишнього середовища або перетворювати їх у безпечні сполуки – метаболіти. У такий спосіб рослини здатні виключити третю і четверту ланки даного ланцюжка, запобігаючи потраплянню важких металів і хімічних забруднювачів в організм людини. Отже, фіторе mediaція – це ефективна й економічно вигідна технологія, заснована на використанні рослин і асоційованих з ними мікроорганізмів-деструкторів. У силу свого взаємовигідного співіснування рослинно-мікробні асоціації (симбіози) мають більші переваги при виживанні в несприятливих умовах навколишнього середовища. Важливим етапом у розробці технології фіторе mediaції є вибір найбільш придатної рослини; дотепер загальноприйнятого підходу в цьому контексті не існує. Використання тих або інших рослин часто ґрунтується на їхній здатності зростати та розвиватися на забруднених територіях або просто за наявності насінного матеріалу (Gyrla, 2011).

З-поміж відомих видів фіторе mediaції одним з ефективних є фітоекстракція, яку використовують для очищення ґрунтів і водойм, забруднених важкими металами й радіонуклідами. Особливість фітоекстракції – поглинання забруднювачів кореневою системою рослин разом з поживними речовинами й транслокація їх у надземні органи. По завершенні вегетації й транслокаційних процесів надземні органи рослин скошуюють і піддають відповідній переробці (Gomes, 2012). Наприклад, після озолення зібраної біомаси зола стає джерелом кольорових металів. Якщо одержання металів із золи обходиться дорожче їхньої собівартості, то біомасу рослин компостують. Ефективність фітоекстракції визначається коефіцієнтом біоаккумуляції, що дорівнює відношенню концентрації металів у рослинах до концентрації їх у ґрунті або в забрудненій воді (Cao et al., 2008).

Фітостабілізація являє собою ефективний захід використання рослинності для очищення ґрунту від забруднюючих речовин шляхом модифікації хімічних речовин, використання біологічних та фізичних процесів у ґрунті. Переміщення за-

бруднювача у ґрунти може бути зменшено внаслідок всмоктування та накопичення його коренями; адсорбції кореневою системою; опадів; комплексування або зменшення валентності металів у ґрунті в межах кореневої зони; зв'язування з гуміновими (органічними) речовинами через процес гуміфікації. Крім того, рослинність може зменшувати вітрову та водну ерозію ґрунту, запобігаючи розповсюдженню забруднювача в стоки, перешкоджати викидам пилу, утворенню вихлопних газів (Cheraghi et al., 2011).

Літературних даних та наукових досліджень про ремедіаційну здатність енергетичних культур сьогодні бракує, але низка дослідників відмічає, що очищення ґрунтів від політантів ефективніше відбувається шляхом фітостабілізації. Над питанням фітоочищення працюють науковці Польщі та Румунії (Nsanganwimana et al., 2014), Франції, США (Bourgeois et al., 2015; Nurzhanova et al., 2015; Pidlisnyuk et al., 2018). Відзначимо, що експерименти здебільшого проводяться в лабораторних умовах, а не в польових. Це, ймовірно, пов'язано з тим, що вказані культури є новими, інтродукованими до інших кліматичних умов, тому основні дослідження спрямовані на вивчення їх генетичних, адаптивних, агрономічних та фізіологічних властивостей на незабруднених землях (Nurzhanova et al., 2015). Посилаючись на проведені переважно за кордоном окремі дослідження, констатуємо, що за високих концентрацій іонів важких металів пригнічується ріст і накопичення вегетативної біомаси в рослинах (Liu et al., 2017).

Дослідження європейських наукових інститутів (Kayama, 2001; Al Souki et al., 2017; Fernando et al., 2018) свідчать про те, що високі концентрації важких металів пригнічувально впливають на ріст та розвиток деяких видів енергетичних культур через пошкодження коренів та зниження мінерального живлення, особливо азоту і фосфору. На противагу цьому, в польових умовах (протягом двох сезонів) інших досліджень енергетичні культури формували потужну фітомасу та високу врожайність на промислово забруднених землях (Zub & Brancourt-Hulmel, 2009; Evangelou et al., 2015). Енергетичні рослини неоднаково взаємодіють з поживним середовищем, а рівні опору до стресових факторів залежать від умов вирощування і можуть відрізнятися в різних видів і популяції (Kayama, 2001; Korzeniewska & Stanisławska-Głubiak, 2015; Prelac et al., 2016).

Деякі дослідники відзначають, що вирощена енергетична культура в межах забруднених сільськогосподарських районів може призвести до надмірної концентрації металів у тканинах рослин і повторних викидів забруднюючих речовин в атмосферу під час спалювання біомаси (Tripathi et al., 2016). Вибір культур для біоенергетичних цілей повинен урахувати ґрунтові та кліматичні умови регіону, а також технічні можливості фермерів. Адже встановлено, що накопичення іонів важких металів у межах різних тканин рослинного організму розподіляється в такому порядку: корені > стебла > листки (Nurzhanova et al., 2015; Jha et al., 2017).

Лабораторні дослідження румунських учених за порівняльного аналізу двох біоенергетичних культур показали, що іони важких металів накопичуються не тільки в кореневій системі, а й у надземній. Експеримент проводили на штучно забрудненому свинцем суглинковому і піщаному ґрунтах. Отриману сировину як біопаливо використовували у вигляді січки, брикетів, паливних гранул (Pidlisnyuk et al., 2014; Antonkiewicz et al., 2016).

Поряд з цим у сучасних наукових публікаціях неповною мірою висвітлені особливості накопичення важких металів енергетичними культурами, механізм переходу забруднювачів із ґрунту в рослини; потребує уточнення й використання моделі очищення ґрунтів від політантів, що і обумовило актуальність наших досліджень в обраному напрямку.

Нами здійснена спроба на основі власних напрацювань, наукової інформації вітчизняних і зарубіжних учених з'ясувати

роль енергетичних культур як фіторемедіаційних агентів для одночасного очищення ґрунтів від важких металів та використання як сировини для виробництва біопалива.

Теоретичні дослідження та їх обговорення

До земель несільськогосподарського призначення належать забруднені ґрунти поблизу гірничодобувних і металургійних виробництв; кар'єри, полігони твердих побутових відходів та інші маргінальні території, особливістю яких є перевищуючий ГДК вміст як неорганічних (важкі метали: Pb, Cr, Al, Zn, Ni та ін.), так і органічних (поліциклічні ароматичні вуглеводні, пірен, фенатрен, поліфенольні сполуки та ін.) сполук. Тому актуальним питанням є вивчення непродовольчих багаторічних культур, які можуть слугувати фіторемедіантами, зокрема енергетичні культури: верба, міскантус гігантський, світчграс, сорго багаторічне, біг-блустем. Такі рослини швидко формують потужну кореневу систему та надземну вегетативну масу, мають багаторічний цикл життя, високий коефіцієнт біоаккумуляції, спрощену технологію вирощування та збирання фітомаси.

Натепер розроблені вітчизняні та зарубіжні методики проведення досліджень з енергетичними культурами, науково-практичні рекомендації, спеціальні методики вирощування (Stewart et al., 2009) та використання енергетичних культур (Parrish & Fike, 2009; Kurilo et al., 2018).

Енергетичні культури з короткою ротацією можуть бути використані для відновлення забруднених земель як альтернативний спосіб фіторемедіації. Широкий спектр видів рослин має потенціал для використання в біоенергетичних та фіторемедіаційних областях на основі їх екосистемних властивостей для встановлення кращого зв'язку між фітотерапією ґрунту – відновлення та виробництво біопалива (Pandey et al., 2016). Ми зосереджуємо увагу на обґрунтуванні ефективності використання п'яти потенційних культур для великомасштабного виробництва біопалива: *Salix*, *Miscantus* × *giganteus*, *Panicum virgatum* L., *Sorghum almum* Parodi, *Andropogon gerardi*, враховуючи їх ботаніко-біологічні, адаптивні особливості, поширеність, фіторемедіаційний ефект та потенціал поглинання вуглецю.

Верба кошикова (*Salix*) – рід дерев, кущів або напівкущів родини вербових (Salicaceae). Це невибаглива морозостійка культура, річна висота кущів якої сягає 2,5 м. Верба має добре розвинену кореневу систему, може зростати на ґрунтах з відносно легким гранулометричним складом, вирізняються швидким приростом біомаси, невибагливістю до родючості ґрунту та вологоти. Рослина багаторічна, розмножується лише вегетативно (Pandey et al., 2016; Salam et al., 2016). Урожайність – до 30 т/га сухої маси енергоємністю 18–20 МДж/кг.

Міскантус гігантський (*Miscantus* × *giganteus*) – це теплолюбна, багаторічна рослина з родини злакових (Gramineae), яка формує потужну мичкувату кореневу систему, має прямостоячі стебла, що досягають 5 м у висоту, шорсткі листки до 50 см довжиною. Розмножується лише вегетативно (ризомами). Урожайність міскантусу – 20–30 т/га сухої маси за енергоємності 18–19 МДж/кг.

Міскантус може формувати врожай два рази на рік (Chou, 2009; Acikel, 2011; Brosse et al., 2012), має додатковий потенціал для виробництва целюлози (Marín et al., 2009) та панельних дощок, декоративних будівельних матеріалів (Velásquez et al., 2002; Park et al., 2012). Солома міскантусу використовується як підстилка для тварин. Завдяки здатності поглинати вуглець з атмосфери міскантус накопичує ґрунтовий органічний вуглець та сприяє розвитку різноманітності ґрунтової мікробіоти (Tcher et al., 2012). Деякі дослідження свідчать про випадки фіксування азоту рослинами в присутності азотфіксуючих бактерій (Davis et al., 2010). Міскантус використовують і для фітообробки стічних вод та шлаків (Nsanganwimana et al., 2014). Вирощування цієї рослини на збіднених ґрунтах запобігає їх ерозії (Pidlisnyuk et al., 2014).

Зниження рівня продуктивності вегетативної маси міскантусу спостерігається за надто високих концентрацій забруднюючих речовин (Kayama, 2001; Pidlisnyuk et al., 2014). У різних дослідженнях (Ezaki et al., 2008; Técher et al., 2011; Nsanganwimana et al., 2014; Pidlisnyuk et al., 2014) також було відмічено депонування міскантусом деяких важких металів (As, Sn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn та Al), які зазвичай максимально накопичувалися в нижній частині рослин, а в низькорослих видів – у стеблах та листках (Nsanganwimana et al., 2015). Крім накопичувального ефекту, міскантус сприяє біодеградації органічних забруднювачів кореневими ексудатами рослин (Murphy & Coats, 2010; Técher et al., 2011; Nsanganwimana et al., 2014; Murphy, 2015), таких як поліциклічні ароматичні вуглеводні, нафта та пестициди. Платанції міскантусу можуть використовуватися для фітоменеджменту міських стоків.

Просо прутноподібне (*Panicum virgatum* L.), або світчграс – це посухо- та морозостійка багаторічна рослина з родини злакових (*Gramineae*), яка формує потужну мичкувату кореневу систему, порожнисті стебла висотою до 3 м, з листками до 60 см (Chen et al., 2012). Рослина формує суцвіття – волоть, розмножується насінням і поділом кореневищ.

Урожайність сухої біомаси – до 25 т/га, насіння – 0,34–0,76 т/га.

Сорго багаторічне (*Sorghum alnum Parodi.*) належить до родини тонконогих. Рослина заввишки 230–300 см. Коренева система добре розвинена і проникає в ґрунт на глибину 2,0–2,5 м. Особливість культури – наявність первинної та вторинної кореневих систем. Польова схожість насіння становить 75–80%. Оптимальна температура для розвитку – плюс 18–25 °С.

Урожайність зеленої маси на початку формування волоті забезпечує 30–35 т/га, у період цвітіння – 45–50 т/га і плодоношення – 65–75 т/га, насіння становить 1,5–1,7 т/га. Вихід сухої фітосировини – 11–14 т/га. Енергетична цінність становить 3750–3810 ккал/кг.

Біг-блуестем (*Andropogon gerardi*), бородач Жерара – це багаторічна злакова культура. Використовується як кормова трава, а з урахуванням високого вмісту целюлози та низьких затрат на вирощування – як перспективна сировина для виробництва етанолу та біомаси (Zhang et al., 2015). Рослина – багаторічний куштовий злак, що формує добре обліштовані стебла висотою 1–3 м, суцвіття та волоть, в якій визріває насіння – дрібна зернівка. Коренева система проникає глибоко в ґрунт, розростається, створює добру дернину.

Рослина невибаглива до родючості ґрунтів, має стійкість до засолення (Zhang et al., 2015).

В Україні проведено агрокліматичне районування й визначено зональні особливості підбору сортименту сільськогосподарських і енергетичних культур та технології їх вирощування (Kurilo et al., 2018). Ми спробували виділити зони вирощування енергетичних культур з урахуванням їх особливостей та реакцій на ґрунтово-кліматичні умови (таблиця).

З огляду на морфолого-біологічні особливості, відношення рослин до температурного режиму та кількості опадів за вегетаційний період енергетичні культури в Україні доцільно розміщувати по зонах: верба кошикова міскантус гігантський та просо прутноподібне – Полісся (П); міскантус гігантський, просо прутноподібне, біг-блуестем, сорго багаторічне – Поліс-

ся і Лісостеп (Л); просо прутноподібне, біг-блуестем, сорго багаторічне – Лісостеп і Степ України (Ст). Підкреслимо, що за дотримання відповідних умов зрошення в степовій зоні можна вирощувати різні види міскантусу та генотипи верби (рис. 1).

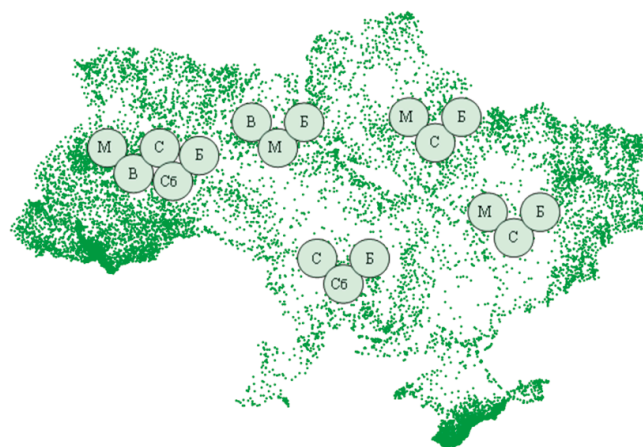


Рис. 1. Розподіл енергетичних культур на території України:

М – міскантус гігантський; С – світчграс; Б – біг-блуестем; Сб – сорго багаторічне; В – верба кошикова (власна розробка)

Дослідження зарубіжних авторів підтверджують нашу гіпотезу про поєднання рекультиватії ґрунту з використанням швидкокорослих деревних енергетичних культур і подальшою їх енергетичною утилізацією як реальний, економічно вигідний захід. Поруч з такими дерев'яними енергетичними рослинами, як верба і тополя доцільно вирощувати і трав'яністі види: сорго, міскантус та світчграс (Pandey et al., 2016).

По результатах наших досліджень, вегетативна фітомаса, формуючи продуктивність за допомогою потужної кореневої системи, акумулювала значну кількість важких металів з ґрунтового комплексу. Агрохімічний аналіз ґрунту та надземної вегетативної маси енергетичних культур показав чітку динаміку поглинання важких металів кореневою системою рослин. Визначено, що вміст важких металів у ґрунті з роками дослідження знижується. Доведено також ефективність енергетичних культур за багаторічного циклу вирощування в накопиченні на поверхні ґрунту мульчуючого шару та збагаченні його на вміст органічної речовини (Meers et al., 2010; Lai et al., 2018).

Залежно від складу хімічних елементів ми розраховували коефіцієнти переходу важких металів у вегетативну та генеративну частини рослин енергетичних культур (загальну фітомасу). Оскільки відсоток важких металів у фітомасі в межах одного вегетаційного періоду становить 5–20% від загальної кількості забруднювача, то в перші роки життя рослин акумулювання важких металів було незначним, а коефіцієнт переходу з кореневої системи до рослини (Кп) – низьким. У подальші роки він

Таблиця. Урожайний потенціал енергетичних культур з урахуванням ґрунтово-кліматичних зон вирощування

Енергетична культура	Температура, °С	Кількість опадів, мм	Агрокліматична зона	Урожайність надземної маси, т/га
Верба кошикова	20–30	>500	П	25–50
Міскантус гігантський	20–30	>500	П, Л	20–30
Просо прутноподібне	20–30	400–500	П, Л, С	15–25
Біг-блуестем	20–30	400–500	П, Л, С	10–15
Сорго багаторічне	20–30	400–500	Л, С	15–28

значно збільшився, що пов'язуємо з інтенсивним розвитком вегетативної маси енергетичних культур.

У середньому за три роки наших досліджень найвищим коефіцієнтом переходу з ґрунту в рослини енергетичних культур характеризувався кадмій. У загальній фітомасі його Кп становив понад 0,5. Низький коефіцієнт переходу в рослини мав кобальт (менше 0,1). Коефіцієнт міді був на рівні 0,5; для цинку і свинцю – менше 0,5. До того ж було визначено, що міскантус гігантський є більш урожайним, ніж світчграсс, хоча вміст сухої речовини в нього менший, накопичення важких металів у фітомасі рослин – більше, а вміст ГДК нижче регламентованих норм.

Встановлено, що незалежно від виду енергетичної культури інтенсивність переходу важких металів у системі “ґрунт–рослина” має такий вигляд:

$Cd \rightarrow Cu \rightarrow Zn \rightarrow Pb \rightarrow Co$ (Kulik, 2016).

Дослідження, проведені за кордоном, дають підставу стверджувати, що фітомаса енергетичних культур може бути використана і як сировина для виробництва екологічно чистого біопалива (Tripathi et al., 2016).

Аналогічний дослід показав, що продукція, отримана при вирощуванні енергетичних культур на забрудненому ґрунті, є джерелом його вторинного забруднення (Pogrzeba et al., 2013).

Отже, досліджувані енергетичні культури мають значний потенціал до фітостабілізації важких металів на забруднених землях, запобігаючи подальшій міграції поліутантів у ґрунтові води або повітря (Fijalkowski et al., 2018). Ураховуючи такі властивості енергокультур, доречно вирощувати їх на забруднених землях за розробленою моделлю, відповідно до агрокліматичного районування (рис. 2). Це забезпечить умови, близькі до сприятливих для росту і розвитку рослин, дозволить отримувати енергоємну фітомасу з мінімальним умістом забруднювачів (Abhilash & Yunus, 2011).

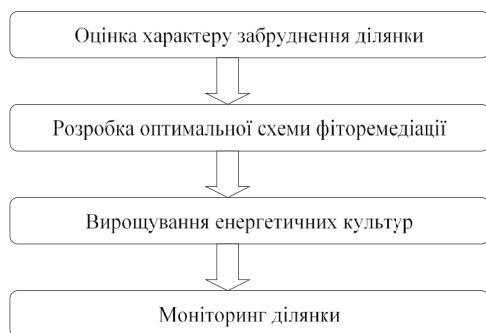


Рис. 2. Модель очищення ґрунтів від важких металів енергетичними культурами (власна розробка)

Оцінка характеру забруднення ділянки передбачає проведення агрохімічного аналізу вмісту важких металів у ґрунті, визначення ступеня їх поширення в ґрунтовому комплексі, складання карт забруднення. Розробка оптимальної схеми фітореMediaції поєднує підбір видового складу енергетичних культур, що якнайкраще підходять для усунення типу забруднення, а їхні ботаніко-біологічні особливості відповідають даним ґрунтово-кліматичним умовам, і вибір необхідних агротехнічних заходів для вирощування й збирання біомаси. Етап безпосереднього вирощування рослин включає проведення комплексу агротехнічних заходів, у тому числі підготовку насінного матеріалу, визначення схеми сівби / висаджування, підготовку ґрунту, внесення мінеральних добрив, використання засобів захисту та ін. Постійний моніторинг ділянки має на меті періодичне визначення концентрації й поширення хіміч-

них компонентів, проведення інформаційного аналізу та прогнозування за допомогою математичних моделей та графіків.

Якщо концентрація забруднюючих речовин в отриманій енергетичній сировині перевищує допустимі рівні, то пропонується змішувати її та матеріал з незабруднених територій або біомасу деревини, щоб знизити рівень металів у біопаливі. Необхідно звернути увагу на те, що спалювання біомаси зі забруднених земель, які можуть містити оксиди металів, відбувається на електростанціях (Martyaniychev, 2013).

З метою сталого виробництва енергетичної біомаси необхідно отримати дані про динаміку росту і продуктивність культур на маргінальних, забруднених землях, про здатність рослин адаптуватися до місцевих умов довкілля; провести моніторинг якості біомаси відповідно до вимог біопаливної промисловості; оцінити вартість виробництва біопалива (Nsanganwimana et al., 2014).

Поряд зі здатністю енергетичних рослин до фітореMediaції забруднених важкими металами ґрунтів встановлено, що вони мають потенціал до розкладання органічних забруднювачів, зокрема поліциклічних ароматичних вуглеводнів. Доведено, що кореневі екsudати культур мають деструкційну здатність – вони розкладають пірен і фенатрен (Gawronski et al., 2017; Wanat et al., 2013). Виявлено, що поліфенольні сполуки, флавоноїди, присутні в ризосфері, наприклад *M. Giganteus*, стимулюють зростання мікроорганізмів, які утилізують поліциклічні ароматичні вуглеводні (Wanat et al., 2013; Barbosa et al., 2015).

Ці дані свідчать про необхідність більш глибокого вивчення фізіологічних і біохімічних особливостей енергетичних культур в умовах забруднення ґрунтів не тільки неорганічними, але й органічними ксенобіотиками. Досліджувані рослини можуть бути не тільки показовим об'єктом для вивчення механізму поглинання, акумуляції та детоксикації ксенобіотиків у ґрунті, але й вирішити проблему відновлення ґрунтів, забруднених токсикантами техногенного походження. У зв'язку з цим виникає питання про раціональне використання маргінальних і деградованих земель, що мають антропогенне забруднення, особливо неорганічних та органічних сполук.

Висновки

Енергетичні культури здатні формувати високий потенціал урожайності в різних ґрунтово-кліматичних зонах України, є представниками рослин для фітореMediaції, що мають найвищу здатність поглинати важкі метали і частково акумулюють їх у своїх підземній та надземній частинах. По завершенні вегетації надземна вегетативна маса рослин може підлягати відповідній переробці, є додатковим джерелом кольорових металів, біопаливом для енергетичних цілей.

Найпоширенішими забруднювачами ґрунтів в Лісостепу України є кобальт, молібден, у західній частині Лісостепу – мідь, показники вмісту яких перевищують не лише фонові значення, а й ГДК. Уміст цинку на більшості території країни відповідає регламентованим нормам. Інтенсивність переходу важких металів у системі “ґрунт–рослина” енергетичних культур має вигляд: $Cd \rightarrow Cu \rightarrow Zn \rightarrow Pb$.

Запропонована модель очищення ґрунтів від важких металів за допомогою енергетичних культур включає оцінку характеру забруднення ґрунту, оптимальну схему фітореMediaції, моніторинг ділянки.

Вирощування енергетичних рослин як фітореMediaнтів на забруднених землях дозволить не лише знизити рівень деградації, а й підвищити агрономічну цінність цих ґрунтів. Висока продуктивність біомаси енергетичних культур (до 30 т/га) може перетворити технологію фітореMediaції в прибуткову галузь для біоенергетичної промисловості. Енергетичні культури накопичують органіку в ґрунті, збільшуючи вміст карбону в ньому, інтенсивно поглинають вуглекислий газ і зменшують наслідки глобального потепління.

References

- Abhilash, P. C., & Yunus, M. (2011). Can we use biomass produced from phytoremediation? *Biomass and Bioenergy*, 35(3), 1371–1372. doi: [10.1016/j.biombioe.2010.12.013](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.013)
- Acikel, H. (2011). The use of miscanthus (*Giganteus*) as a plant fiber in concrete production. *Scientific Research and Essays*, 6(13), 2660–2667. <https://doi.org/10.5897/sre10.1139>
- Al Souki, K. S., Louvel, B., Douay, F., & Pourrut, B. (2017). Assessment of *Miscanthus x giganteus* capacity to restore the functionality of metal-contaminated soils: Ex situ experiment. *Applied Soil Ecology*, 115, 44–52. doi: [10.1016/j.apsoil.2017.03.002](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.002)
- Antonkiewicz, J., Kołodziej, B., & Bielińska, E. J. (2016). The use of reed canary grass and giant miscanthus in the phytoremediation of municipal sewage sludge. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(10), 9505–9517. doi: [10.1007/s11356-016-6175-6](https://doi.org/10.1007/s11356-016-6175-6)
- Barbosa, B., Boléo, S., Sidella, S., Costa, J., Duarte, M. P., Mendes, B., Cosentino, S. L., & Fernando, A. L. (2015). Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils Using the Perennial Energy Crops *Miscanthus* spp. and *Arundo donax* L. *Bioenergy Research*, 8(4), 1500–1511. doi: [10.1007/s12155-015-9688-9](https://doi.org/10.1007/s12155-015-9688-9)
- Bellamy, P. E., Croxton, P. J., Heard, M. S., Hinsley, S. A., Hulmes, L., Hulmes, S., Nuttall, P., R.F. Pywell, & Rothery, P. (2009). The impact of growing miscanthus for biomass on farmland bird populations. *Biomass and Bioenergy*, 33(2), 191–199. doi: [10.1016/j.biombioe.2008.07.001](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.07.001)
- Boehmel, C., Lewandowski, I., & Claupein, W. (2008). Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. *Agricultural Systems*, 96(1–3), 224–236. doi: [10.1016/j.agsy.2007.08.004](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.08.004)
- Bourgeois, E., Dequiedt, S., Lelièvre, M., van Oort, F., Lamy, I., Ranjard, L., & Maron, P. A. (2015). *Miscanthus* bioenergy crop stimulates nutrient-cycler bacteria and fungi in wastewater-contaminated agricultural soil. *Environmental Chemistry Letters*, 13(4), 503–511. doi: [10.1007/s10311-015-0532-4](https://doi.org/10.1007/s10311-015-0532-4)
- Brosse, N., Dufour, A., Meng, X., Sun, Q., & Ragauskas, A. (2012). *Miscanthus*: a fast-growing crop for biofuels and chemicals production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(5), 580–598. doi: [10.1002/bbb.1353](https://doi.org/10.1002/bbb.1353)
- Cao, A., Cappai, G., Carucci, A., & Lai, T. (2008). Heavy metal bioavailability and chelate mobilization efficiency in an assisted phytoextraction process. *Environmental Geochemistry and Health*, 30(2), 115–119. doi: [10.1007/s10653-008-9136-2](https://doi.org/10.1007/s10653-008-9136-2)
- Chen, B.-C., Lai, H.-Y., & Juang, K.-W. (2012). Model evaluation of plant metal content and biomass yield for the phytoextraction of heavy metals by switchgrass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 80, 393–400. doi: [10.1016/j.ecoenv.2012.04.011](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.04.011)
- Cheraghi, M., Lorestani, B., Khorasani, N., Yousefi, N., & Karami, M. (2011). Findings on the Phytoextraction and Phytostabilization of Soils Contaminated with Heavy Metals. *Biological Trace Element Research*, 144(1), 1133–1141. doi: [10.1007/s12011-009-8359-0](https://doi.org/10.1007/s12011-009-8359-0)
- Chou, C.-H. (2009). *Miscanthus* plants used as an alternative biofuel material: The basic studies on ecology and molecular evolution. *Renewable Energy*, 34(8), 1908–1912. doi: [10.1016/j.renene.2008.12.027](https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.027)
- Davis, S. C., Parton, W. J., Dohleman, F. G., Smith, C. M., Grosso, S. Del, Kent, A. D., & DeLucia, E. H. (2010). Comparative Biogeochemical Cycles of Bioenergy Crops Reveal Nitrogen-Fixation and Low Greenhouse Gas Emissions in a *Miscanthus x giganteus* Agro-Ecosystem. *Ecosystems*, 13(1), 144–156. doi: [10.1007/s10021-009-9306-9](https://doi.org/10.1007/s10021-009-9306-9)
- de Abreu, C. A., Coscione, A. R., Pires, A. M., & Paz-Ferreiro, J. (2012). Phytoremediation of a soil contaminated by heavy metals and boron using castor oil plants and organic matter amendments. *Journal of Geochemical Exploration*, 123, 3–7. doi: [10.1016/j.gexplo.2012.04.013](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.013)
- Evangelou, M. W. H., Papazoglou, E. G., Robinson, B. H., & Schulin, R. (2015). Phytomanagement: Phytoremediation and the Production of Biomass for Economic Revenue on Contaminated Land. In *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants*, 1, 115–132. doi: [10.1007/978-3-319-10395-2_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10395-2_9)
- Ezaki, B., Nagao, E., Yamamoto, Y., Nakashima, S., & Enomoto, T. (2008). Wild plants, *Andropogon virginicus* L. and *Miscanthus sinensis* Anders, are tolerant to multiple stresses including aluminum, heavy metals and oxidative stresses. *Plant Cell Reports*, 27(5), 951–961. doi: [10.1007/s00299-007-0503-8](https://doi.org/10.1007/s00299-007-0503-8)
- Fernando, A., Rettenmaier, N., Soldatos, P., & Panoutsou, C. (2018). Sustainability of Perennial Crops Production for Bioenergy and Bioproducts. *Perennial Grasses for Bioenergy and Bioproducts*, 245–283. doi: [10.1016/B978-0-12-812900-5.00008-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812900-5.00008-4)
- Fijalkowski, K., Rosikon, K., Grobelak, A., Hutchison, D., & Kacprzak, M. J. (2018). Modification of properties of energy crops under Polish condition as an effect of sewage sludge application onto degraded soil. *Journal of Environmental Management*, 217, 509–519. doi: [10.1016/j.jenvman.2018.03.132](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.132)
- Flathman, P. E., & Lanza, G. R. (1998). Phytoremediation: Current Views on an Emerging Green Technology. *Journal of Soil Contamination*, 7(4), 415–432. doi: [10.1080/10588339891334438](https://doi.org/10.1080/10588339891334438)
- Gawronski, S. W., Gawronska, H., Lomnicki, S., & Sæbo, A. (2017). Plants in Air Phytoremediation. *Advances in Botanical Research*, 83, 319–346. doi: [10.1016/bs.abr.2016.12.008](https://doi.org/10.1016/bs.abr.2016.12.008)
- Golets, N. Y., Mal'ovanyy, M. S., & Malyk, Y. O. (2009). Doslidzhennya vlastyvostey pro fil'tratsiyonoho ekrana polihonu tverdikh vidkhodiv [Investigation of the properties of the filtration screen of solid waste landfill]. Kyiv: Bulletin of NAU (in Ukrainian).
- Gomes, H. (2012). Phytoremediation for bioenergy: challenges and opportunities. *Environmental Technology Reviews*, 1, 1–8. doi: [10.1080/09593330.2012.696715](https://doi.org/10.1080/09593330.2012.696715)
- Gyrlya, L. M. (2011). Fitoremediatsiya – efektyvnyy shlyakh znyzhennya vmistu vazhkykh metaliv u gruntakh [Phytothermization is an effective way to reduce the content of heavy metals in soils]. Proceedings [Petro Mohyla Black Sea State University Complex “Kyiv-Mohyla Academy”]. Series: Ecology, 152(140), 57–59 (in Ukrainian).
- Hromádsko, L., Vranová, V., Techer, D., Laval-Gilly, P., Rejšek, K., Formánek, P., & Falla, J. (2010). Composition of root exudates of *Miscanthus x Giganteus* Greef et Deu. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis Sbornik Mendelovy Univerzity v Brně*, 58(1), 71–76. doi: [10.11118/actaun201058010071](https://doi.org/10.11118/actaun201058010071)
- Jha, A. B., Misra, A. N., & Sharma, P. (2017). Phytoremediation of heavy metal-contaminated soil using bioenergy crops. In: K. Baudhdh, B. Singh, & J. Korstad (Eds.), *Phytoremediation Potential of Bioenergy Plants* (63–96). Springer, Singapore. doi: [10.1007/978-981-10-3084-0_3](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3084-0_3)
- Kayama, M. (2001). Comparison of the Aluminum Tolerance of *Miscanthus sinensis* Anderss. and *Miscanthus sacchariflorus* Benth in Hydroculture. *International Journal of Plant Sciences*, 162(5), 1025–1031. doi: [10.1086/322890](https://doi.org/10.1086/322890)
- Korzeniowska, J., & Stanisławska-Głubiak, E. (2015). Phytoremediation potential of *Miscanthus x giganteus* and *Spartina pectinata* in soil contaminated with heavy metals. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(15), 11648–11657. doi: [10.1007/s11356-015-4439-1](https://doi.org/10.1007/s11356-015-4439-1)
- Kulik, M. I. (2016). Energeticheskiye kul'tury dlya ochishcheniya pochv ot tyazhelykh metallov i polucheniya biotopliva [Energy crops for the purification of soils from heavy metals and the production of biofuels]. In N. V. Byshova (Ed.), *Modern energy and resource-saving environmentally sustainable technologies*

- and systems of agricultural production (364–367). FGBOU VGATU, Ryazan (in Ukrainian).
- Kumar, P. B. A. N., Dushenkov, V., Motto, H., & Raskin, I. (1995). Phytoextraction: The Use of Plants To Remove Heavy Metals from Soils. *Environmental Science & Technology*, 29(5), 1232–1238. doi: [10.1021/es00005a014](https://doi.org/10.1021/es00005a014)
- Kurilo, V. L., & Kulik, M. I. (2017). Enerhetychni kul'tury dlya vyrobnytstva biopalyva: dovidnyk. [Energy crops for biofuel production: a guide]. PSAA, Poltava (in Ukrainian).
- Kurilo, V. L., Raxmetov, D. B., & Kulyk, M. I. (2018). Biologichni osoblyvosti ta potentsial urozhaynosti enerhetychnykh kul'tur rodyny tonkonohovykh v umovakh Ukrainy. [Biological features and potential of crop yields of energy cultures in the conditions of Ukraine]. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, 1, 11–17 (in Ukrainian). doi: [10.31210/visnyk2018.01.01](https://doi.org/10.31210/visnyk2018.01.01)
- Lai, L., Kumar, S., Osborne, S., & Owens, V. N. (2018). Switchgrass impact on selected soil parameters, including soil organic carbon, within six years of establishment. *Catena*, 163, 288–296. doi: [10.1016/j.catena.2017.12.030](https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.030)
- Liu, Y.-N., Guo, Z.-H., Xiao, X.-Y., Wang, S., Jiang, Z.-C., & Zeng, P. (2017). Phytostabilisation potential of giant reed for metals contaminated soil modified with complex organic fertiliser and fly ash: A field experiment. *Science of The Total Environment*, 576, 292–302. doi: [10.1016/j.scitotenv.2016.10.065](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.065)
- Marin, F., Sánchez, J. L., Arauzo, J., Fuertes, R., & Gonzalo, A. (2009). Semichemical pulping of *Miscanthus giganteus*. Effect of pulping conditions on some pulp and paper properties. *Bioresource Technology*, 100(17), 3933–3940. doi: [10.1016/j.biortech.2009.03.011](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.011)
- Martyniychuk, A. V. (2013). Fitoekstraktsiya kak sposob fitoremediatsii pochv sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Phytoextraction as a method of phytoremediation of agricultural soils]. *Bulletin of Nizhny Novgorod State Engineering and Economic Institute*, 4(23), 87–94 (in Russian).
- Meers, E., Van Slycken, S., Adriaensen, K., Ruttens, A., Vangronsveld, J., Du Laing, G., Witters, N., Thewys, T., & Tack, F. M. G. (2010). The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for 'phytoattenuation' of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment. *Chemosphere*, 78(1), 35–41. doi: [10.1016/j.chemosphere.2009.08.015](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.015)
- Meers, E., Vandecasteele, B., Ruttens, A., Vangronsveld, J., & Tack, F. M. G. (2007). Potential of five willow species (*Salix* spp.) for phytoextraction of heavy metals. *Environmental and Experimental Botany*, 60(1), 57–68. doi: [10.1016/j.envexpbot.2006.06.008](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2006.06.008)
- Murphy, B. W. (2015). Impact of soil organic matter on soil properties – a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research*, 53(6), 605–635. doi: [10.1071/sr14246](https://doi.org/10.1071/sr14246)
- Murphy, I. J., & Coats, J. R. (2010). The capacity of switchgrass (*Panicum virgatum*) to degrade atrazine in a phytoremediation setting. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 30(3), 715–722. doi: [10.1002/etc.437](https://doi.org/10.1002/etc.437)
- Nsanganwimana, F., Pourrut, B., Mench, M., & Douay, F. (2014). Suitability of *Miscanthus* species for managing inorganic and organic contaminated land and restoring ecosystem services. A review. *Journal of Environmental Management*, 143, 123–134. doi: [10.1016/j.jenvman.2014.04.027](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.04.027)
- Nsanganwimana, F., Pourrut, B., Waterlot, C., Louvel, B., Bidar, G., Labidi, S., Fontaine, J., Muchembled, J., Lounès-Hadj Sahraoui, A., Fourier, H., & Douay, F. (2015). Metal accumulation and shoot yield of *Miscanthus × giganteus* growing in contaminated agricultural soils: Insights into agronomic practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 213, 61–71. doi: [10.1016/j.agee.2015.07.023](https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.023)
- Nurzhanova, A., Pidlisnyuk, V., Kalugin, S., Stefanovska, T., & Drimal, M. (2015). *Miscanthus X Giganteus* as a new highly efficient phytoremediation agent for improving soils contaminated by pesticides residues and supplemented contaminants. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 80(3), 361–366.
- Nurzhanova, A., Pidlisnyuk, V., Sailoukhanuli, E., Kalugin, S., Mursaliyeva, V. K., Stefanovskaya, T. R., & Erickson, L. (2015). *Miscanthus X Giganteus* – perspektivnyy bioenergeticheskiy fitoremediatsii [Miscanthus X Giganteus – bioenergy prospects of phytoremediation]. *Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 5(303), 128–138 (in Russian).
- Pandey, V. C., Bajpai, O., & Singh, N. (2016). Energy crops in sustainable phytoremediation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 58–73. doi: [10.1016/j.rser.2015.09.078](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.078)
- Pandey, V. C., Pandey, D. N., & Singh, N. (2015). Sustainable phytoremediation based on naturally colonizing and economically valuable plants. *Journal of Cleaner Production*, 86, 37–39. doi: [10.1016/j.jclepro.2014.08.030](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.030)
- Park, H.-J., Oh, S.-W., & Wen, M.-Y. (2012). Manufacture and properties of *Miscanthus*-wood particle composite boards. *Journal of Wood Science*, 58(5), 459–464. doi: [10.1007/s10086-012-1262-x](https://doi.org/10.1007/s10086-012-1262-x)
- Parrish, D. J., & Fike, J. H. (2009). Selecting, Establishing, and Managing Switchgrass (*Panicum virgatum*) for Biofuels. In J. R. Mielenz (Ed.), *Biofuels: Methods and Protocols* (27–40). Humana Press, Totowa, NJ. doi: [10.1007/978-1-60761-214-8_2](https://doi.org/10.1007/978-1-60761-214-8_2)
- Pidlisnyuk, V. V., Erickson, L. E., Trögl, J., Shapoval, P. Y., Popelka, J., Davis, L. C., Stefanovska, T. R., & Hettiarachchi, G. M. (2018). Metals uptake behaviour in *Miscanthus x giganteus* plant during growth at the contaminated soil from the military site in Sliac, Slovakia. *Polish Journal of Chemical Technology*, 20(2), 1–7. doi: [10.2478/pjct-2018-0016](https://doi.org/10.2478/pjct-2018-0016)
- Pidlisnyuk, V., Stefanovska, T., Lewis, E. E., Erickson, L. E., & Davis, L. C. (2014). *Miscanthus* as a Productive Biofuel Crop for Phytoremediation. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 33(1), 1–19. doi: [10.1080/07352689.2014.847616](https://doi.org/10.1080/07352689.2014.847616)
- Pogrzeba, M., Krzyzak, J., & Sas-Nowosielska, A. (2013). Environmental hazards related to *Miscanthus x giganteus* cultivation on heavy metal contaminated soil. In *E3S Web of Conferences*, 1, 29006. doi: [10.1051/e3sconf/20130129006](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20130129006)
- Prelac, M., Bilandžija, N., & Zgorelec, Ž. (2016). Potencijal fitoremedijacije teških metala iz tla pomoću Poaceae kultura za proizvodnju energije: Pregledni rad. *Journal of Central European Agriculture*, 17(3), 901–916. doi: [10.5513/jcea01/17.3.1789](https://doi.org/10.5513/jcea01/17.3.1789)
- Quinn, L., Allen, D., & Stewart, R. (2010). Invasiveness potential of *Miscanthus sinensis*: implications for bioenergy production in the United States. *GCB Bioenergy*, 2(6), 310–320. doi: [10.1111/j.1757-1707.2010.01062.x](https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01062.x)
- Ridej, N. M., Tonxa, O. L., & Shofolov, D. L. (2009). Ohorona zemel' ta stale zemlekorystuvannya [Land protection and sustainable land use]. TOV PROGTEXSNAB, Lugans'k (in Ukrainian).
- Salam, M. M. A., Kaipainen, E., Mohsin, M., Villa, A., Kuittinen, S., Pulkkinen, P., Pelkonen, P., Mehtälä, L., & Pappinen, A. (2016). Effects of contaminated soil on the growth performance of young *Salix* (*Salix schwerinii* E. L. Wolf) and the potential for phytoremediation of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 183, 467–477. doi: [10.1016/j.jenvman.2016.08.082](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.082)
- Stewart, J. R., Toma, Y., Fernández, F. G., Nishiwaki, A., Yamada, T., & Bollero, G. (2009). The ecology and agronomy of *Miscanthus sinensis*, a species important to bioenergy crop development, in its native range in Japan: a review. *GCB Bioenergy*, 1(2), 126–153. doi: [10.1111/j.1757-1707.2009.01010.x](https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2009.01010.x)
- Técher, D., Laval-Gilly, P., Henry, S., Bennasroune, A., Formanek, P., Martinez-Chois, C., D'Innocenzo, M., Muanda, F., Dicko, A., Rejšek, K., & Falla, J. (2011). Contribution of *Miscanthus x giganteus* root exudates to the biostimulation of PAH degradation: An in vitro study. *Science of The Total Environment*

- vironment, 409(20), 4489–4495. doi: [10.1016/j.scitotenv.2011.06.049](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.049)
- Techer, D., Martinez-Chois, C., Laval-Gilly, P., Henry, S., Bennasroune, A., D’Innocenzo, M., & Falla, J. (2012). Assessment of *Miscanthus × giganteus* for rhizoremediation of long term PAH contaminated soils. *Applied Soil Ecology*, 62, 42–49. doi: [10.1016/j.apsoil.2012.07.009](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.07.009)
- Tripathi, V., Edrisi, S. A., & Abhilash, P. C. (2016). Towards the coupling of phytoremediation with bioenergy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1386–1389. doi: [10.1016/j.rser.2015.12.116](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.116)
- Velásquez, J., Ferrando, F., & Salvadó, J. (2002). Binderless fiberboard from steam exploded *Miscanthus sinensis*: The effect of a grinding process. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 60(4), 297–302. doi: [10.1007/s00107-002-0304-2](https://doi.org/10.1007/s00107-002-0304-2)
- Wanat, N., Austruy, A., Joussein, E., Soubrand, M., Hitmi, A., Gauthier-Moussard, C., Lenain, J.-F., Vernay, P., Munch, J. C., & Pichon, M. (2013). Potentials of *Miscanthus × giganteus* grown on highly contaminated Technosols. *Journal of Geochemical Exploration*, 126–127, 78–84. doi: [10.1016/j.gexplo.2013.01.001](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.01.001)
- Witters, N., Mendelsohn, R. O., Van Slycken, S., Weyens, N., Schreurs, E., Meers, E., Tack, F., Carleer, & R., Vangronsveld, J. (2012). Phytoremediation, a sustainable remediation technology? Conclusions from a case study. I: Energy production and carbon dioxide abatement. *Biomass and Bioenergy*, 39, 454–469. doi: [10.1016/j.biombioe.2011.08.016](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.08.016)
- Zhang, K., Johnson, L., Vara Prasad, P. V., Pei, Z., & Wang, D. (2015). Big bluestem as a bioenergy crop: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 740–756. doi: [10.1016/j.rser.2015.07.144](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.144)
- Zub, H. W., & Brancourt-Hulmel, M. (2009). Agronomic and physiological performances of different species of *Miscanthus*, a major energy crop. *Sustainable Agriculture*, 2, 469–486. doi: [10.1007/978-94-007-0394-0_21](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0394-0_21)