



Original researches

**Potential for the Utilization of Biofuel Plant
of the Second Generation of *Miscanthus Giganteus*
for Phytoremediation of Oil-Contaminated Lands**Received: 29 May 2020
Revised: 08 June 2020
Accepted: 09 June 2020**P. V. Pysarenko, V. O. Bezsonova**
Poltava State Agrarian Academy, Poltava, UkrainePoltava State Agrarian Academy, Scovorodny
Str., 1/3, Poltava, 36003, UkraineTel.: +38-053-250-02-73
E-mail: pdaa@pdaa.edu.ua**Cite this article:** Pysarenko, P. V.,
& Bezsonova, V. O. (2020). Potential
for the utilization of biofuel plant
of the second generation of *Miscanthus*
giganteus for phytoremediation
of oil-contaminated lands. *Agrology*, 3(3),
127–132. doi: 10.32819/020015

Abstract. Reproduction and conservation of soil fertility, protection against degradation and pollution is traditionally one of the priority tasks of the state agricultural policy. The presence of petroleum products in soils causes violation of ecological balance in the soil system, changes in morphological and physicochemical characteristics of soil horizons, in the ratio between the individual fractions of soil organic matter. Therefore, today more and more attention is paid to the development and implementation of innovative technologies for purification of oil-contaminated soils. Phytoremediation is currently considered to be the most promising method for cleaning of polluting in industrialized countries. The material elucidates the results of the study of changes in agrochemical parameters of soil in consequence of oil pollution and carrying out of phytoremediation, determined the dynamics of the degree of purification of oil-contaminated soils, reducing their phytotoxicity by growing bioenergy culture *Miscanthus giganteus*. The model experiment was conducted in natural conditions of the scientific-research plot of Poltava State Agrarian Academy. Oil was applied to the soil in the following concentrations: 10, 20 and 40 g/kg. Three weeks after the application of oil into the soil, vegetative shoots of *Miscanthus giganteus* were planted out in the first year of life. The period of oil degradation in the soil lasted 177 days, of which 156 days – the reclamation period with using the bioenergy plant *Miscanthus giganteus*. It was found that growing *Miscanthus giganteus* on oil-contaminated soil with the application of 40 g/kg reduced the content of petroleum products by 13% compared to the control variant – without plants. With increasing concentration of oil pollution after phytoremediation of *Miscanthus giganteus*, the pH of the soil solution and metabolic acidity increases, the amount of absorbed bases decreases, the intensity of respiration increases significantly. The content of organic carbon in the soil was characterized by the following indices: at contamination of 10 g/kg the content of organic carbon reached 4.4%, at pollution of 20 g/kg – 6.1%, and at 40 g/kg – 7.0%, respectively, the content of organic matter was 8.3%, 11.5% and 13.2%, the content of humus – 7.59%, 10.52% and 12.07%. *Miscanthus giganteus* plants create favorable conditions for the development of microorganisms and increase their activity in consequence of the secretion of nutrients by the roots, improving soil properties. Thus, second-regeneration biofuel plants *Miscanthus giganteus* can be recommended for phytoremediation of oil-contaminated soils and thus, on the one hand, clean large areas of land, and on the other – to obtain biomass for further energy production, which will be environmentally friendly and economically feasible.

Keywords: oil-contaminated soils; biodegradation of oil; petroleum products; agrochemical indices of soil; soil cleaning; bioenergy crops.

**Потенціал використання біопаливної рослини другої генерації
міскантусу гігантського для фіторемедіації нафтозабруднених земель****П. В. Писаренко, В. О. Безсонова**
Полтавська державна аграрна академія, м. Полтава, Україна

Анотація. Відтворення та охорона родючості ґрунтів, захист їх від деградації та забруднення традиційно є одним з першочергових завдань аграрної політики держави. Наявність нафтопродуктів у ґрунтах спричиняє порушення екологічної рівноваги в ґрунтовій системі, зміни морфологічних та фізико-хімічних характеристик ґрунтових горизонтів, у співвідношенні між окремими фракціями органічної речовини ґрунту. Тому сьогодні все більше уваги приділяється розробці та впровадженню інноваційних технологій для очищення нафтозабруднених ґрунтів. Найбільш перспективним методом для очищення забруднень у промислово розвинених країнах на тепер вважається фіторемедіація. У матеріалі висвітлено результати проведеного дослідження зміни агрохімічних показників ґрунту внаслідок нафтового забруднення та проведення фіторемедіації, визначено динаміку ступеня очищення нафтозабруднених ґрунтів, зниження їх фітотоксичності за рахунок вирощування біоенергетичної культури *Miscanthus giganteus*. Модельний дослід проводили в природних умовах науково-дослідної ділянки Полтавської дер-

жавної аграрної академії. Нафту вносили в ґрунт у таких концентраціях: 10, 20 та 40 г/кг. Через три тижні після внесення нафти в ґрунт висаджували вегетативні пагони *Miscanthus giganteus* першого року життя. Період деградації нафти у ґрунті тривав 177 діб, з яких 156 діб – рекультиваційний період з використанням біоенергетичної рослини *Miscanthus giganteus*. Встановлено, що вирощування *Miscanthus giganteus* на забрудненому нафтою ґрунті з внесенням 40 г/кг знизило вміст нафтопродуктів на 13% порівняно з контрольним варіантом – без рослин. Зі збільшенням концентрації забруднення нафтою після проведеної фітореMediaції *Miscanthus giganteus* показники рН ґрунтового розчину та обмінної кислотності збільшуються, сума поглинених основ зменшується, інтенсивність дихання значно зростає. Вміст органічного карбону в ґрунті характеризувався такими показниками: при забрудненні 10 г/кг вміст органічного карбону сягав 4,4%, при забрудненні 20 г/кг – 6,1%, а при 40 г/кг – 7,0%, відповідно, вміст органічних речовин становив 8,3%, 11,5% та 13,2%, вміст гумусу – 7,59%, 10,52% та 12,07%. Рослини *Miscanthus giganteus* створюють сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів і підвищення їхньої активності завдяки секретії поживних речовин коренями, покращення властивостей ґрунту. Отже, біопаливні рослини другої регенерації *Miscanthus giganteus* можна рекомендувати для фітореMediaції нафтозабруднених ґрунтів і в такий спосіб, з одного боку, очищати значні масиви земель, а з іншого – отримувати біомасу для подальшого виробництва енергії, що буде екологічно-безпечним та економічно доцільним.

Ключові слова: нафтозабруднені ґрунти; біодеградація нафти; нафтопродукти; агрохімічні показники ґрунту; очищення ґрунтів; біоенергетичні культури.

Вступ

Сучасний стан навколишнього середовища та подальше його погіршення викликає обґрунтовану тривогу, оскільки цим спричинені численні агроекологічні проблеми. Забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами завдає серйозної шкоди в аграрному та в екологічному секторах економіки. Перший техногенний “удар” при забрудненні нафтою наземних екосистем поряд з рослинним покривом приймають на себе верхні, найцінніші, збагачені органічною речовиною горизонти ґрунту. Нафтове забруднення пригнічує мікробіологічні й біохімічні процеси, викликає зміну структури біоценозів, активність та направленість ґрунтоутворюючих процесів. Забруднення ґрунтів нафтою спричиняє як деградацію земель, так і створює небезпеку проникнення поллютантів у харчові ланцюги, однією з ланок яких є людина.

Сучасні методи очищення ґрунтів включають екстракцію розчинником, біореMediaцію, фітореMediaцію, хімічне окиснення, електрокінетичну рекультивацію, теплові технології, ультразвукову, флотаційну та інтегровані технології відновлювальних робіт (Lim, Von Lau & Poh, 2016). Сучасні фітореMediaційні технології можуть ґрунтуватися на різних методологічних підходах – це фітостабілізація, фітодеградація, фітовипар, ризодеградація та ін. (Susarla et al., 2002; Abdel Ghany et al., 2015).

ФітореMediaція полягає у використанні здатності деяких видів рослин поглинати поллютанти та акумулювати їх у біомасі. Подальша утилізація біомаси елімінує накопичені забруднювачі зі середовища (Telysheva et al., 2011; Evangelou et al., 2015).

Перевагами фітореMediaції, порівняно з традиційними реMediaційними технологіями, є відсутність або невелика кількість виникаючих вторинних відходів, мінімальні порушення природних екосистем; можливість застосування, як на малих, так і на великих територіях; естетичність, відносна простота реалізації, економічність (Flathman & Lanza, 1998; Banks et al., 2003; Kamath et al., 2004; Brandt et al., 2006; Wang et al., 2008; Gerhardt et al., 2009; Shevchyk & Romaniuk, 2017).

Останній часом проводяться масштабні дослідження різних видів рослин, в тому числі біоенергетичних культур, які можна було б використати в рекультивації забруднених нафтою ґрунтів (Schroder et al., 2002; Brandt et al., 2006; Kaimi et al., 2007; Gerhardt et al., 2009; Cook et al., 2010; Hromádsko et al., 2010; Gyrlya 2011; Pidlisnyuk et al., 2014; Bourgeois et al., 2015; Nurzhanova et al., 2015; Shevchyk & Romaniuk, 2016; Pandey et al., 2016; Pidlisnyuk et al., 2018).

Позитивний вплив застосування багаторічних трав у процесі фітореMediaції пояснюється тим, що своєю розвинутою кореневою системою вони сприяють поліпшенню газоповітряного режиму забрудненого ґрунту, збагачують його біологічно активними сполуками, які виділяються кореневою системою протягом їх життєдіяльності. Корені слугують мікрооргані-

мам поверхню прикріплення і збільшують концентрацію органічних речовин у ризосфері (Kuiper et al., 2004). Завдяки кореневим виділенням рослин у ґрунт потрапляє складна суміш органічних аніонів, цукрів, вітамінів, амінокислот, пуринів, нуклеозидів та ферментів (Dakora & Philips, 2002).

Доведено ефективність обліпихи крушиновидної (*Hippophae rhamnoides* L.) для відновлення нафтозабруднених ґрунтів (Shevchyk & Romaniuk, 2016).

Численні дослідження свідчать про стійкість бобових (*Fabaceae*) до нафтового забруднення внаслідок здатності фіксувати атмосферний азот і в такий спосіб забезпечувати себе джерелом мінерального живлення в нафтозабрудненому ґрунті (Yateem et al., 2000; Dzhura 2011).

Оскільки рослини часто не володіють достатньою толерантністю до високої концентрації нафтових вуглеводнів, то існує проблема утилізації самих рослин після очищення ґрунту. У зв'язку із цим актуальним напрямом наших наукових досліджень є використання біопаливних рослин як фітореMediaційних агентів (Witters et al., 2012). У випадку використання біопаливних рослин як фітореMediaційних агентів ми можемо робити дві надзвичайно важливі справи для агроекології та біоенергетики: з одного боку, очищати нафтозабруднені ґрунти, а з іншого – отримувати біомасу для подальшого виробництва енергії, що буде екологічно безпечним та економічно доцільним.

Miscanthus є енергетичною культурою, яка привернула до себе увагу вчених через низку причин, передусім високою врожайністю біомаси, невисокими вимогами до умов вирощування, енергетичною віддачею, елементарним складом, вмістом вуглеводнів та лігніну (Chou, 2009; Acikel, 2011). Культура являє непересічний інтерес для обговорення щодо подальшого виробництва та використання як біопалива. Низькі концентрації вологи та золи дають підстави вважати міскантус також ключовою культурою для використання в процесах перетворення біомаси в рідку під час отримання рідкого палива та хімікатів шляхом термохімічної конверсії – табл.1 (Brosse et al., 2012).

Міскантус гігантський (*Miscanthus giganteus*) – це тетраплоїдний гібрид міскантусу китайського (*Miscanthus sinensis*) і міскантусу цукровіткового (*Miscanthus sacchariflorus*). Багаторічна трав'яниста рослина зі C4-схемою фотосинтезу. Врожайність зеленої фітомаси *Miscanthus giganteus* становить від 60 до 150 т/га, потенціал сухої маси досить високий – 10–15 (до 32) т/га. Енергетична продуктивність рослин сягає 67–84 (до 130) Гкал/га (Kurilo et al., 2018). При цьому *Miscanthus giganteus* не вимогливий до якості ґрунту.

Серед основних речовин, які входять до складу міскантусу, відзначимо целюлозу, геміцелюлозу та лігнін.

Хімічний вміст є різним для різновидів і генотипів міскантусу (табл.1), але целюлоза є головним складовим компонентом 40–60% і формує каркас, геміцелюлоза (20–40%) – матрична ре-

Таблиця 1. Хімічний склад різновидів міскантусу, %

Вид міскантусу	Генотип	Час урожаю	Целюлоза	Геміцелюлоза	Лігнін	Зольність
<i>M. giganteus</i>	ЕМІ01	Листопад	50.34	24.83	12.02	2.67
		Лютий	52.13	25.76	12.58	2.74
<i>M. sacchariflorus</i>	ЕМІ05	Листопад	49.06	27.41	12.10	2.29
		Лютий	50.18	28.11	12.13	2.16
<i>M. sinensis</i> (г)	ЕМІ08	Листопад	43.06	33.41	9.27	3.47
		Лютий	45.36	32.99	9.70	2.71
<i>M. sinensis</i>	ЕМІ011	Листопад	43.18	33.98	9.69	3.19
		Лютий	45.52	33.83	10.32	3.04
<i>M. sinensis</i>	ЕМІ015	Листопад	47.59	33.00	9.23	2.44
		Лютий	52.20	30.56	9.34	2.22

човина, що складається з різних полісахаридів, лігнін (10–15%) забезпечує жорсткість структури (Somerville et al., 2010; Brosse et al., 2012). Закордонні дослідження свідчать про азотфіксуючу здатність рослин *Miscanthus giganteus* (Davis et al., 2010).

Отже, дослідження потенціалу використання біопаливної рослини другої генерації *Miscanthus giganteus* для фітореємедіації нафтозабруднених ґрунтів є надзвичайно перспективним.

Мета проведених нами дослідження полягала у визначенні основних агрохімічних показників нафтозабрудненого ґрунту, вивченні процесу фітореємедіації для очищення нафтозабруднених ґрунтів Полтавської області з використанням біоенергетичної рослини другої генерації *Miscanthus giganteus*.

Матеріал та методи

Модельний дослід проводили в природних умовах науково-дослідної ділянки Полтавської державної аграрної академії. Методика досліджень передбачала штучне забруднення ґрунту сировою нафтою, яка видобувається на території Новосанжарського району (село Соколова Балка) Полтавської області СП "Полтавською газонафтовою компанією" (СП ПГНК).

У поліетиленові мішки з ґрунтом (чорнозем типовий) об'ємом 100 кг у трьох повтореннях внесли сирову нафту густиною 0,93 г/мл у таких концентраціях: 10 г/кг, що відповідає 1%-вому забрудненню ґрунту; 20 г/кг – 2%-вому, 40 г/кг ґрунту – відповідають 4%-вому забрудненню ґрунту. Через три тижні після внесення нафти в ґрунт (необхідний термін для вивітрювання летких нафтопродуктів) висаджували вегетативні пагони *Miscanthus giganteus* першого року життя. Ґрунт без рослин з наведеними концентраціями нафти і ґрунт з рослинами без нафти були контрольними. Період деградації нафти в ґрунті тривав 177 діб, з яких 156 діб – рекультиваційний період з використанням рослин.

Вміст нафтопродуктів у ґрунті визначали гравіметричним методом (РД 52.18.647-2003), який полягав у вилученні нафтопродуктів з проб ґрунту шляхом їх екстракції хлороформом,

в очищенні екстракту колонічною хроматографією на оксиді алюмінію після заміни розчинника на гексан та зважуванні даної проби ґрунту після випарювання розчинника. Фізико-хімічні властивості ґрунтів, зокрема рН ґрунту, визначали за методом ЦІНАО шляхом приготування сольової витяжки (ГОСТ 26483-85), обмінну кислотність ґрунту (ГОСТ 26484-85), суму поглинених основ (ГОСТ 27821-88), вміст органічного карбону, органічних речовин та гумусу (ДСТУ 4289:2004), мікробне дихання ґрунту CO₂ (ДСТУ 16072:2005).

Результати

Біодеградація нафти в ґрунті, як показали дослідження відбувалася досить активно. При 1%-вому забрудненні (10 г/кг) нафтозабруднений ґрунт очистився на 90%, при 2%-вому (2 г/кг) – на 83,5%, а 4%-вому забрудненні – на 70%. Це пов'язано перш за все з випаровуванням летких фракцій нафти і біодеградацією легкодоступних вуглеводнів. У результаті проведеної фітореємедіації біоенергетичною рослиною *Miscanthus giganteus* процес очищення нафтозабруднених ґрунтів мав такі показники: при 1%-вому забрудненні ґрунт очистився на 100%, при 2%-вому – на 95%, а при 4%-вому забрудненні – на 83% (табл. 2). У ґрунті зі зростанням *Miscanthus giganteus* вміст нафтопродуктів знизився на 13%.

За результатами дослідження отримано значення рН чистого ґрунту – 7,73.

Під час нафтового забруднення показники рН становили: 1%-ве забруднення – 7,88; 2%-ве забруднення – 7,92; 4%-ве – 7,96. Зі збільшенням концентрації забруднення нафтою після проведеної фітореємедіації *Miscanthus giganteus* показник рН ґрунтового розчину дещо підвищувався (табл. 3). Показник обмінної кислотності нафтозабрудненого ґрунту зі збільшенням концентрації забруднення збільшується, сума поглинених основ зі збільшенням концентрації забруднення зменшується.

Таблиця 2. Порівняльний аналіз очищення нафтозабрудненого ґрунту без рослин та з використанням *Miscanthus giganteus*

Концентрація забруднення нафтою, г/кг		Вміст нафтопродуктів у ґрунті після ремедіації, г/кг	Сумарне очищення ґрунту, %
Забруднений ґрунт: без рослин	10	1,0	90±0,2
	20	3,3	83,5±0,3
	40	12	70±0,4
з використанням <i>Miscanthus giganteus</i>	10	0	100±0,1
	20	0,9	95±0,4
	40	6,8	83±0,2

Таблиця 3. Вплив біоенергетичної рослини *Miscanthus giganteus* на pH, обмінну кислотність та суму поглинених основ нафтозабрудненого ґрунту

Концентрація забруднення нафтою, г/кг		pH ммоль/100 г ґрунту	Обмінна кислотність	Сума поглинених основ
Чистий ґрунт		7,73	0,03±0,02	76,3
Забруднений ґрунт, г/кг: без рослин	10	7,88	0,06±0,01	83,3
	20	7,92	0,09±0,03	81,0
	40	7,96	0,12±0,02	78,7
з використанням <i>Miscanthus giganteus</i>	10	8,25	0,06±0,03	92,9
	20	8,31	0,09±0,02	90,6
	40	8,37	0,12±0,01	88,4

Таблиця 4. Вплив біоенергетичної рослини *Miscanthus giganteus* на агрохімічні властивості нафтозабрудненого ґрунту

Концентрація забруднення нафтою, г/кг		Органічний карбон, %	Вміст, %		Дихання ґрунту, мг CO ₂ /кг
			органічних речовин	гумусу	
Чистий ґрунт		2,5	4,7	4,31	0,0053
Забруднений ґрунт, г/кг: без рослин	10	5,1	9,6±0,012	8,79	0,0049
	20	6,7	12,6±0,004	11,55	0,0085
	40	7,5	14,1	12,93	0,0108
з використанням <i>Miscanthus giganteus</i>	10	4,4	8,3±0,028	7,59±0,004	0,0097
	20	6,1	11,5±0,032	10,52±0,003	0,0153
	40	7,0	13,2±0,04	12,07±0,002	0,0214

Аналіз нафтозабрудненого ґрунту показав суттєве зростання вмісту органічного карбону порівняно з ґрунтом без нафти: при концентрації забруднення 40 г/кг вміст органічного карбону сягав 7,5%, тоді як у ґрунті без нафти – 2,5% (табл. 4). По закінченні рекультивацийного періоду з використанням *Miscanthus giganteus* вміст органічного карбону в ґрунті реєстрували таким: при забрудненні 10 г/кг вміст органічного карбону дорівнював 4,4%; при забрудненні 20 г/кг – 6,1%; 40 г/кг – 7,0%.

Виявлено, що в процесі нафтозабруднення ґрунту інтенсивність дихання суттєво зростала: при забрудненні 10 г/кг – 0,0049 мг CO₂/кг, при забрудненні 20 г/кг – 0,0085 мг CO₂/кг, а при 40 г/кг – 0,0108 мг CO₂/кг. Із використанням *Miscanthus giganteus* інтенсивність дихання набула таких показників: при забрудненні 10 г/кг – 0,0097 мг CO₂/кг, при забрудненні 20 г/кг – 0,0153 мг CO₂/кг, а при 40 г/кг – 0,0214 мг CO₂/кг (табл. 4).

Обговорення

Проведене дослідження констатує, що найбільш інтенсивне розкладання вуглеводнів нафти спостерігається в ґрунті, на якому зростала біоенергетична рослина *Miscanthus giganteus* за умов забруднення 40 г/кг. У такому варіанті нафтозабруднений ґрунт очистився на 83%, тоді як контрольний ґрунт без рослин – на 70%. У ґрунті зі зростанням *Miscanthus giganteus* вміст нафтопродуктів знизився на 13% порівняно зі забрудненим ґрунтом без рослин. Отже, *Miscanthus giganteus* досить добре фізіологічно адаптується до даного забруднення, включає свої внутрішні механізми захисту та бере безпосередньо участь у деградації нафтопродуктів у ґрунті. Закордонні дослідження показують, що, завдяки здатності утримувати неорганічні забруднювачі в кореневій системі і викликати розсіювання стійких органічних забруднювачів у ґрунті, міскантус є сприятливим видом рослини для фітостабілізації та фітодеградації (Técher et al.,

2011; Nsanganwimana et al., 2014; Nsanganwimana et al., 2015).

Дослідженнями визначено, що в процесі нафтозабруднення pH ґрунтового середовища дещо підвищується, тобто відбувається підлужнення.

Обмінна здатність ґрунтів обумовлює направленість ґрунтових процесів та відіграє велику роль у кореновому живленні рослин, тому вміст обмінних катіонів у ґрунті, а також їх склад та загальна ємність поглинання вважаються важливими показниками хімічних та фізичних властивостей ґрунтів. У результаті аналізу з'ясовано, що показник обмінної кислотності нафтозабрудненого ґрунту з підвищенням концентрації забруднення збільшується, відповідно сума поглинених основ з підвищенням концентрації забруднення зменшується. Подібні результати зустрічаються і в дослідженнях інших науковців (Dzhura et al., 2006).

Суттєве зростання вмісту органічного карбону в нафтозабрудненому ґрунті пов'язане в першу чергу зі значним вмістом карбону в складі самої нафти (83–87%). Наприкінці рекультивацийного періоду з використанням рослин *Miscanthus giganteus* відбулося незначне зменшення вмісту органічного карбону в ґрунті. Це пов'язано зі зниженням запасів гумусу в ґрунті внаслідок процесів дегуміфікації та деструкції вуглеводнів нафти. Відомо, що, володіючи своєю особливістю поглинати вуглець з атмосфери, міскантус має здатність накопичувати ґрунтовий органічний вуглець та сприяти розвитку різноманітності ґрунтової мікробіоти (Techer et al., 2012).

З'ясовано, що інтенсивність дихання входить до групи чутливих індикаторів якості ґрунту, його біологічної активності, залежить від кількості та якості легкодоступного джерела карбону, метаболічної активності рослин і мікроорганізмів (Bloem et al., 2005; Ryan & Law 2005).

Нами встановлено, що інтенсивність дихання нафтозабрудненого ґрунту 40 г/кг без рослин була вдвічі більша, порівнюючи з контролем, що пов'язано з надходженням додаткового джерела карбону – вуглеводнів. Підкреслимо, що інтенсивність дихання нафтозабрудненого ґрунту 40 г/кг з *Miscanthus*

giganteus зросла у 4 рази відносно контролю. Отже, *Miscanthus giganteus* мав стимулювальний вплив на інтенсивність дихання ґрунту. Це пояснюється тим, що в прикореневій зоні рослин інтенсивність ґрунтового “дихання” тісно пов’язана з ростом і розвитком рослин і залежить від фаз їхньої вегетації.

Закордонні дослідження свідчать про те, що поліфенольні сполуки, флавоноїди, присутні в ризосфері *Miscanthus giganteus*, стимулюють зростання мікроорганізмів, які утилізують поліциклічні ароматичні вуглеводні (Wanat et al., 2013; Barbosa et al., 2015), що збігається з нашими результатами.

Висновки

Фіторе mediaція нафтозабрудненого ґрунту біоенергетичною рослиною *Miscanthus giganteus* значно прискорює процес очищення нафтозабруднених ґрунтів – лише за один вегетаційний період після посадки, без додаткового внесення мікробіологічних препаратів, органічних чи мінеральних добрив, що є економічно вигіднішим у процесі фіторе mediaції нафтозабруднених ґрунтів.

Вирощування *Miscanthus giganteus* на забрудненому нафтою ґрунті (40 г/кг) вміст нафтопродуктів знижує на 13% порівняно зі забрудненим ґрунтом без рослин. Відповідно біоенергетична рослина *Miscanthus giganteus* знижує і фітотоксичність ґрунтів, що дає підстави рекомендувати цей вид для фіторе mediaції нафтозабруднених земель.

Біоенергетична культура *Miscanthus giganteus*, зростаючи в нафтозабрудненому ґрунті, сприяє покращенню його агрохімічних властивостей, позитивно впливає на сорбційні властивості ґрунту, збільшує інтенсивність дихання, доступність елементів мінерального живлення. Створюються сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів і збільшення їхньої активності внаслідок секреції поживних речовин коренями, що зменшує кількість нафти в забрудненому ґрунті.

Отже, розроблений екологічно безпечний та економічно вигідний спосіб фітоочищення нафтозабруднених ґрунтів дозволяє одночасно вирощувати біопаливну рослину другої генерації *Miscanthus giganteus* для виробництва альтернативних джерел енергії. У подальшому досліджуватиметься вирощування *Miscanthus giganteus* на ґрунтах з більш високою концентрацією забруднення.

References

- Abdel Ghany, T. M., Abboud Mohamed, A. Al, Negm Moustafa, E. & Shater Abdel-Rahman, M. (2015). Rhizosphere microorganisms as inducers for phytoremediation a review. *International Journal of Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 1 (1), 7–15.
- Acikel, H. (2011). The use of miscanthus (*Giganteus*) as a plant fiber in concrete production. *Scientific Research and Essays*, 6(13), 2660–2667. doi: doi.org/10.5897/sre10.1139
- Banks, M. K., Kulakow, P., Schwab, A. P., Chen, Z. & Rathbone, K. (2003). Degradation of Crude Oil in the Rhizosphere of *Sorghum bicolor*. *International Journal of Phytoremediation*, 5(3), 225–234. doi: [10.1080/713779222](https://doi.org/10.1080/713779222)
- Barbosa, B., Boléo, S., Sidella, S., Costa, J., Duarte, M. P., ... 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)
- Bloem, J., Hopkins, D. W. & Benedetti, A. (2005). Microbiological methods for assessing soil quality. CABI Publishing, Wallingford.
- Bourgeois, E., Dequiedt, S., Lelièvre, M., van Oort, F., Lamy, I., ... 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)
- Brandt, R., Merkl, N., Schultze-Kraft, R., Infante, C. & Broll, G. (2006). Potential of vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela, 8(4), 273–284. doi: [10.1080/15226510600992808](https://doi.org/10.1080/15226510600992808)
- 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)
- Chou, C.-H. (2009). *Miscanthus* plants used as an alternative bio-fuel 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)
- Cook, R. L., Landmeyer, J. E., Atkinson, B., Messier, J. P. & Nichols, E. G. (2010). Field Note: Successful Establishment of a Phytoremediation System at a Petroleum Hydrocarbon Contaminated Shallow Aquifer: Trends, Trials, and Tribulations. *International Journal of Phytoremediation*, 12(7), 716–732. doi: [10.1080/15226510903390395](https://doi.org/10.1080/15226510903390395)
- Dakora, F. D., & Philips D. A. (2002). Root exudates as mediators of mineral acquisition in lownutrient environments. *Plant and Soil*, 245(1), 35–47 doi: [10.1023/a:1020809400075](https://doi.org/10.1023/a:1020809400075)
- Davis, S. C., Parton, W. J., Dohleman, F. G., Smith, C. M., Del Grosso, S., Kent, A. D., & DeLucia, E. H. (2010). Comparative Biogeochemical Cycles of Bioenergy Crops Reveal Nitrogen-Fixation and Low Greenhouse Gas Emissions in a *Miscanthus* × *giganteus* Agro-Ecosystem. *Ecosystems*, 13(1), 144–156. doi: [10.1007/s10021-009-9306-9](https://doi.org/10.1007/s10021-009-9306-9)
- Dzhura N. M., Romanyuk, O. I., Jan Gonsyor, Tsvilynuk, O. M. & Terek O. I. (2006). Using plants for restoration of the oil-cut soils. *Ecology and noospherology*, 17(1), 55–60 (in Ukrainian).
- Dzhura, N. M. (2011). *Perspektyvy fitoremediatsiyi naftozabrudnennykh gruntiv roslynamy Faba bona Medic (Vicia faba L.) [Prospects of oil polluted soils phytoremediation by Faba bona Medic. (Vicia faba L.) plants]. Visnyk of the Lviv University. Series Biology*, 57, 117–124 (in Ukrainian).
- Evangelou, M. W. H., Papazoglou, E. G., Robinson, B. H., & Schuln, 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)
- Flathman, P. E. & Lanza, G. R. (1998). Phytoremediation: Current views on an emerging green technology. *Soil and Sediment Contamination*, 7(4), 415–432. doi: [10.1080/10588339891334438](https://doi.org/10.1080/10588339891334438)
- Gerhardt, K. E., Huang, X. D., Glick, B. R. & Greenberg, B. M. (2009). Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: Potential and challenges. *Plant Science*, 176(1), 20–30. doi: [10.1016/j.plantsci.2008.09.014](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2008.09.014)
- Gyrllya, L. M. (2011). Phytothermization is an effective way to reduce the content of heavy metals in soils. *Proceedings Petro Mohyla Black Sea State UniversityComplex “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* × *Giganteus* Greef et Deu. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis Sborník Mendelovy Univerzity v Brně*, 58(1), 71–76. doi: [10.11118/act-aun201058010071](https://doi.org/10.11118/act-aun201058010071)
- Kaimi, E., Mukaidani, T. & Tamaki, M. (2007). Screening of Twelve Plant Species for Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil, 10(2), 211–218. doi: [10.1626/pss.10.211](https://doi.org/10.1626/pss.10.211)
- Kamath, R., Rentz, J. A., Schnoor, J. L., P. & Alvarez, J. J. (2004). Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soils: principles and applications. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 151, 447–478. doi: [10.1016/s0167-2991\(04\)80157-5](https://doi.org/10.1016/s0167-2991(04)80157-5)
- Kuiper, I., Lagendijk, E. L., Bloemberg, G. V. & Lugtenberg, J. J. (2004). Rhizoremediation: a beneficial plant-microbe interaction. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 17(1), 6–15. doi: [10.1094/mpmi.2004.17.1.6](https://doi.org/10.1094/mpmi.2004.17.1.6)

- Kurilo, V. L., Raxmetov, D. B., & Kulyk, M. I. (2018). 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)
- Lim M. W., Von Lau E. & Poh P.E. (2016) A comprehensive guide of remediation technologies for oil contaminated soil. Present works and future directions. *Marine Pollution Bulletin*, 109(1), 14–45. doi: [10.1016/j.marpolbul.2016.04.023](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.023)
- 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., Fourrier, 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., & Dri-mal, M. (2015). *Miscanthus × 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.
- 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)
- Pidlisnyuk, V. V., Erickson, L. E., Trögl, J., Shapoval, P. Y., Popelka, J., Davis, L. C., ... Hettiarachchi, G. M. (2018). Metals uptake behaviour in *Miscanthus x giganteus* plant during growth at the contaminated soil from the military site in Sliač, 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)
- Ryan, M. G., & Law, B. (2005). Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 73(1), 3–27. doi: [10.1007/s10533-004-5167-7](https://doi.org/10.1007/s10533-004-5167-7)
- Schroder, P., Harvey, P. J., & Schwitzguebel, J.-P. (2002). Prospects for the phytoremediation of organic pollutants in Europe. *Environmental Science and Pollution Research*, 9(1), 1–3. doi: [10.1007/bf02987312](https://doi.org/10.1007/bf02987312)
- Shevchyk, L. Z. & Romaniuk, O. I. (2016). Phytoremediation of oil contaminated soil using Sea Buckthorn. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytsky Melitopol State Pedagogical University*, 6(3), 472–480. doi: [10.15421/2016120](https://doi.org/10.15421/2016120)
- Shevchyk, L. Z. & Romaniuk, O. I. (2017). The analysis of biological ways of restoration of the oil-contaminated soils, 1(4), 31–39. doi: [10.15587/2519-8025.2017.94052](https://doi.org/10.15587/2519-8025.2017.94052)
- Somerville, C., Youngs, H., Taylor, C., Davis, S. & Long, S. (2010). Feedstocks for lignocellulosic biofuels, 13(8), 790–792. doi: [10.1126/science.1189268](https://doi.org/10.1126/science.1189268)
- Susarla, S., Medina, V., & McCutcheon, S. (2002) Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering*, 18(5), 647–658. doi: [10.1016/S0925-8574\(02\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00026-5)
- Têcher, D., Laval-Gilly, P., Henry, S., Bennasroune, A., Formanek, P., Martinez-Chois, C., ... 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*, 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)
- Telysheva, G., Jashina, L., Lebedeva, G., Dizhbite, T., Solodovnik, V., Mutere, O. et. al. (2011). Use of plants to remediate soil polluted with oil. *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 1, 38–45. doi: [10.17770/etr2011vol1.925](https://doi.org/10.17770/etr2011vol1.925)
- 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)
- Wang, J., Zhang, Z., Su, Y., He, W., He, F. & Song, H. (2008). Phytoremediation of petroleum polluted soil. *Petroleum Science*, 5 (2), 167–171. doi: [10.1007/s12182-008-0026-0](https://doi.org/10.1007/s12182-008-0026-0)
- 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)
- Yateem, A., Balba, M. T., El-Nawawy, A. S. & Al-Awadhi, N. (2000). Plants-associated microflora and the remediation of oil-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 2(3), 183–191. doi: [10.1080/15226510009359031](https://doi.org/10.1080/15226510009359031)