

припустимих морськими стандартами [5]. КФКП забезпечує повну компенсацію реактивної потужності, споживаної ЕНПУ.

#### Список посилань

1. Zhuk A.K., Zhuk D.A. Complex rating and power quality providing in ac/dc electric power system of drilling vessel «Gazprom-1». Proceedings of 5th International scientific and technical conference on Unconventional Electromechanical and Electrical systems UEES'01, Miedzzydroje, Poland, Vol.2, 05–08 September, 2001, pp.551–556.
2. Zhuk, O., Zhuk, D., Kryvoruchko, D. Voltage Harmonic Distortion in Autonomous Electric Power System with an Adjustable Power Line Conditioner. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2018, pp. 33-38.
3. Zhuk, O., Zhuk, D., Kryvoruchko, D., D'yakonov, O. Control of Improved Hybrid Power Line Conditioner. 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2018, pp. 605-610.
4. Zhuk, D.; Zhuk, O.; Kozlov, M.; Stepenko, S. Evaluation of Electric Power Quality in the Ship-Integrated Electrical Power System with a Main DC Bus and Power Semiconductor Electric Drives as Part of the Electric Propulsion Complex. Energies 2023, 16, 2961.
5. IEC 61000-4-30 INTERNATIONAL STANDARD Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods. 2021.

УДК 63.631.4:604:58:631.484

**Моргун Б.В., докт. біол. наук**

Інститут клітинної біології і генетичної інженерії НАН України, м. Київ

**Білоусов О. С., студент**

Національний технічний університет «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,

ol21.belousov@gmail.com

### **ТРАНСГЕННІ РОСЛИНИ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ЗАСІБ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕГРАДОВАНИХ ҐРУНТІВ УКРАЇНИ ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ВИРОЩУВАННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР**

Війна в Україні в найближчому майбутньому закінчиться нашою Перемогою, але руйнівний потенціал російської смертоносної зброї ще десятиріччями буде нагадувати про себе, погіршуючи стан здоров'я майбутніх поколінь нашої нації.

Потенційним джерелом хімічного забруднення довкілля є вибухонебезпечні предмети, які містять вибухові речовини. Як основний вибуховий заряд для вибухонебезпечних предметів є вторинні вибухові речовини, які самостійно не можуть бути надійно підірвані без зовнішньої вибухової сили, але потужніші ніж первинні і менш чутливі до подразників. До таких речовин відносять органічні сполуки цикло-1,3,5-триметилен-2,4,6- тринітрамін (RDX або циклоніт, гексоген) та нітроароматичний 2,4,6- тринітротолуол (тротил).

Тротил і подібні сполуки токсичні для людини, тварин і рослин. Тротил швидше деградує в ґрунтах з високим вмістом органічних речовин. Ризики потрапляння в трофічні ланцюги тротилу вищі при наявності ґрунтових вод [1].

Тротил реалізує канцерогенну, отруйну та мутагенну дію на організм людини [2]. До біологічних ефектів тротилу належать подразнення шкіри, катаракта, анемія та порушення функції печінки [3]. У ґрунтах тротил пригнічує азотфіксацію, дегідрогеназу та інші мікробні активності навіть при низьких рівнях (10 мг/л) забруднення [4]. На сьогодні відомо, що понад 200 тис. га українських земель забруднені мінами, снарядами, уламками боєприпасів [5].

Метою даної роботи є дослідити класичні підходи до відновлення родючості та безпеки ґрунтів, що використовуються в агропромисловому комплексі, розібратися в їх ефективності та кількості часу, необхідного для отримання бажаного результату, з'ясувати перспективи застосування методів генної інженерії для вирішення зазначеної задачі.

**Матеріали та методи.** Відновлення родючості ґрунтів та забезпечування їх використання вже сьогодні є одним із важливих завдань, що стоять перед агропромисловим сектором країни.

До класичних методів відновлення родючості та безпеки ґрунтів можна віднести:

1. Механічні – оранка, зняття верхнього шару, вологе накопичування та розпушування
2. Фізико-хімічні – використання реактивів та сорбентів, добрив
3. Біологічні – використання мікроорганізмів та біопрепаратів, стимулювання процесів самоочищення [6].

Звичайно, залучення зазначених методів відновлення ґрунтів можливе лише після розмінування територій та механічного очищення від залишків снарядів та бронетехніки.

Використання наведених класичних методів відновлення ґрунтів потребує залучення значного фінансування, а час, потрібний для розкладання залишків тротилу та гексогену традиційним шляхом вимірюється десятиріччями.

За допомогою методів фітореMediaції забезпечити ґрунти, на яких відбувалися активні воєнні дії, та повернути їм родючість в комплексі з іншими методами відновлення можливо в значно короткі строки. ФітореMediaція – це методика використання рослин та мікроорганізмів, що з ними пов'язані, для очищення навколишнього середовища. За допомогою рослин є можливість вилучити забруднюючі речовини або активізувати їх розкладання до більш безпечних сполук [7].

**Результати та обговорення.** В деяких публікаціях повідомлялося про відновлення рослинності на колись безплідних місцевостях, забруднених тротилом, що дало надію на використання методів фітореMediaції. Передбачається, що фітореMediaція *in situ*, яка використовує кореневу систему рослин для вилучення та детоксикації забруднюючих речовин і сонячне світло як незалежне джерело енергії, є менш руйнівною для навколишнього середовища, ніж методи фізичної реMediaції [8].

Потрібно зазначити, що деградація тротилу місцевими рослинами є неефективною та найчастіше неповною. RDX навіть менш піддається біологічному розкладанню через триазинове кільце з трьома складовими азотами, які залишають мало місця для ферменту, щоб замінити електрони та отримати доступ до відкритих нітратних груп [9].

Серія інших досліджень продемонструвала, що деякі бактерії, *Pseudomonas* [10], *Bacillus* [11], *Enterobacter* [12] і *Rhodococcus* [13], здатні розкласти тротил. Але мікробна деградація тротилу, як правило, обмежена наявністю симетричних нітрогруп на його ароматичному кільці, що перешкоджає активності діоксигенази [14].

Для подолання зазначених недоліків та обмежень були розроблені та успішно апробовані трансгенні культури. Гени бактерій, що кодують синтез ферментів, здатних розщеплювати молекули вибухових речовин, були вбудовані у ДНК вищих рослин. Це призвело до прискорення процесів розщеплення органічних молекул, а також зменшило концентрацію небажаних сполук в ґрунті за більш короткий термін [15]. Наприклад, були створені рослини, в яких відбувається експресія НАДФН-залежної нітроредуктази з *Enterobacter cloacae*, яка забезпечує перетворення тротилу в амінодинітротолуоли. Рослини тютюну, що експресують цю бактеріальну нітроредуктазу, розщеплюють тротил при його концентраціях в ґрунті на рівнях, які є летальними для рослин дикого типу.

Виявилось, що ендегенні рослинні гени кодують додаткові ферментативні етапи, необхідні для видалення токсичних продуктів розпаду, що є результатом цієї реакції, амінодинітротолуолів. Таким чином, високий рівень експресії одного трансгену бактеріальної нітроредуктази забезпечив створення рослини з винятковим фітореMediaційним потенціалом.

В останніх дослідженнях ген *xpIA* був застосований з *Rhodococcus rhodochrous* для деградації RDX. Цей ген і гени *xpIA* від споріднених бактерій кодують химерний злитий білок, що складається з N-кінцевого домену флаводоксину та C-кінцевого домену P450 [16],

структура, яку раніше не бачили. Автори показують, що очищений бактеріальний фермент *xplA* може здійснювати анаеробну НАДФН-залежну деградацію RDX до 4-нітро-2,4-діазобутаналу, нітриту та формальдегіду [17] без додавання ферредоксину, як того вимагає стандарт P450s. Біохімічні дані свідчать про те, що домен P450 і домен флаводоксину взаємодіють по-новому в цьому катаболічному процесі.

Зазначається, що коли трансген *xplA* експресується в модельній рослині *Arabidopsis thaliana*, рослина стає високостійкою до токсичних ефектів RDX у ґрунті в концентраціях, які затримують ріст рослин дикого типу. Трансгенні корені *xplA* ростуть набагато краще на забрудненому RDX ґрунті, ніж коріння дикого типу або трансгенні *xplA* на незабрудненому ґрунті. Це може свідчити про те, що трансгенні рослини можуть використовувати азот, отриманий з гексогену, щоб посилити власний ріст [18].

**Висновок.** Існує високоефективний та екологічний метод відновлення деградованого та забрудненого вибухонебезпечними речовинами ґрунту в Україні, які дозволять країні в найкоротші строки повернути втрачену внаслідок війни велич аграрного сектору.

### Список посилань

1. Сайт ДНСН України <https://dsns.gov.ua/>
2. Koske, D.; Goldenstein, N.I.; Kammann, U. Nitroaromatic compounds damage the DNA of zebrafish embryos (*Danio rerio*). *Aquat. Toxicol.* 2019, 217, 105345.
3. Bolt, H.M.; Degen, G.H.; Dorn, S.B.; Plöttner, S.; Harth, V. Genotoxicity and potential carcinogenicity of 2,4,6-trinitrotoluene: Structural and toxicological considerations. *Rev. Environ. Health* 2006, 21, 217–228.
4. Travis, E.R.; Bruce, N.C.; Rosser, S.J. Microbial and plant ecology of a long-term TNT-contaminated site. *Environ. Pollut.* 2008, 153, 119–126
5. Виступ Президента України Володимира Зеленського на саміті «G20» 15.11.2022 - <https://www.president.gov.ua/>
6. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу / О. Голубцов, Л. Сорокіна, А. Сплодитель, С. Чумаченко – Київ: ГО «Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. – 32 с.
7. Ram Chandra, N.K. Dubey, Vineet Kumar *Phytoremediation of Environmental Pollutants*, Edition 1st Edition, 2017. - CRC Press, 524 p.
8. Susan Eapen, S F D&#39;Souza Prospects of genetic engineering of plants for phytoremediation of toxic metals *Biotechnol Adv.* 2005 Mar;23(2):97-114. (Epub 2004 Nov 5.)
9. Richard B Meagher *Plants tackle explosive contamination Nature Biotechnology*(Vol. 24, Issue 2) Nature Publishing Group Feb. 2006
10. Esteve-Núñez, A.; Caballero, A.; Ramos, J.L. Biological degradation of 2,4,6-trinitrotoluene. *Microbiol. Mol. Biol. R.* 2001, 65, 335–352.
11. Kalafut, T.; Wales, M.E.; Rastogi, V.K.; Naumova, R.P.; Zaripova, S.K.; Wild, J.R. Biotransformation patterns of 2,4,6-trinitrotoluene by aerobic bacteria. *Curr. Microbiol.* 1998, 36, 45–54.
12. Vanderberg, L.A.; Perry, J.J.; Unkefer, P.J. Catabolism of 2,4,6-trinitrotoluene by *Mycobacterium vaccae*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1995, 43, 937–945.
13. Vorbeck, C.; Lenke, H.; Fischer, P.; Spain, J.C.; Knackmuss, H.J. Initial reductive reactions in aerobic microbial metabolism of 2,4,6-trinitrotoluene. *Appl. Environ. Microbiol.* 1998, 64, 246–252
14. Martin, J.L.; Comfort, S.D.; Shea, P.J.; Drijber, R.A.; Kokjohn, T.A. Denitration of 2,4,6-trinitrotoluene by *Pseudomonas savastanoi*. *Can. J. Microbiol.* 1997, 43, 447–455
15. Hannink, N. et al . *Nat. Biotechnol.* 19, 1168-1172 (2001).
16. Seth-Smith, H.M. et al . *Appl. Environ. Microbiol.* 68, 4764-4771 (2002).
17. Fournier, D., Halasz, A., Spain, J., Fiurasek, P. & Hawari, J. *Appl. Environ. Microbiol.* 68, 166-172 (2002).
18. Elizabeth L Rylott 1, Neil C Bruce *Plants disarm soil: engineering plants for the phytoremediation of explosives Trends Biotechnol* 2009 Feb;27(2):73-81. (Epub 2008 Dec 26.)