

УДК 628.472.3; 628.516

**О. В. Березюк, д. т. н., доц.; М. С. Лемешев, к. т. н., доц.; І. Н. Дудар, д. т. н., проф.****РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ КОНЦЕНТРАЦІЇ СВИНЦЮ В ҐРУНТАХ НА ВІДСТАНІ ВІД ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ**

*В Україні останнім часом значно зросла загальна площа полігонів твердих побутових відходів та сміттєзвалищ, в тому числі й перевантажених, які порушують норми екологічної безпеки та є об'єктами інтенсивного екологічного навантаження, що загрожує забрудненням навколишнього середовища хімічними речовинами, спричиняючи хімічному забрудненню ґрунтів, зокрема свинцем. Визначення регресійної залежності концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігонів твердих побутових відходів є актуальною науково-технічною задачею.*

*Метою дослідження є визначення регресійної залежності свинцю в ґрунтах від відстані до полігонів твердих побутових відходів. Під час проведення дослідження використано метод регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором раціонального виду функції із шістнадцяти найпоширеніших варіантів за критерієм максимального значення коефіцієнта кореляції. Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір.*

*Отримано адекватну регресійну степеневу залежність концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігонів твердих побутових відходів, яку можна застосувати для визначення рівня хімічного забруднення ґрунтів свинцем. Побудовано графічну інтерпретацію залежності концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігону твердих побутових відходів, яка дозволяє наочно проілюструвати цю залежність та показати збіжність теоретичних результатів з фактичними на рівні 0,93493. Визначено, що відстань від полігона твердих побутових відходів, на якій забруднення ґрунту свинцем не перевищує фоновий рівень (межа зони слабого забруднення), складає 526 м.*

**Ключові слова:** сміттєзвалище, полігон, тверді побутові відходи, хімічне забруднення, концентрація, свинець, ґрунт, регресійний аналіз.

**Вступ**

Для охорони здоров'я людини та навколишнього природного середовища великий негативний довготривалий вплив становлять тверді побутові відходи (ТПВ) [1, 2], що є гетерогенною багатокомпонентною сумішшю складного морфологічного складу, на відміну від будівельних [3, 4] чи промислових [5] відходів, які є, в основному, однорідними й відносно легко підлягають переробці. Щорічний об'єм утворення ТПВ на території нашої країни перевищує 54 млн. м<sup>3</sup>, основна частина яких захоронюється на 6107 полігонах та сміттєзвалищах площею майже 7700 га та лише частково переробляються або утилізуються на сміттєспалювальних заводах, на відміну від високорозвинутих країн з широким застосуванням сучасних технологій переробки та утилізації ТПВ [6]. Протягом періоду 1999 - 2014 рр. втричі збільшилась сумарна площа полігонів та сміттєзвалищ в Україні. Майже вдвічі зросла площа перевантажених та більше ніж втричі тих полігонів і сміттєзвалищ, які порушують норми екологічної безпеки, загрожуючи забрудненням навколишнього середовища (повітря, води та ґрунтів), зокрема хімічним забруднення ґрунтів важкими металами, наприклад свинцем, що спричиняє захворювання живих організмів [7], забруднення прилеглих земельних ділянок [8]. Тому для запобігання зростанню темпів зростання площ полігонів та їхнього негативного впливу на навколишнє природне

Наукові праці ВНТУ, 2022, № 4

середовище сміттєвози під час завантаження виконують технологічну операцію ущільнення ТПВ [9, 10]. Зневоднення ТПВ [11] також сприятиме зменшенню темпів зростання площ полігонів.

### Постановка проблеми

Відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 265 серед пріоритетних напрямів поводження з ТПВ в Україні є забезпечення організації контролю за діючими та закритими полігонами ТПВ для запобігання шкідливому впливу на довкілля та здоров'я людини [12]. Тому визначення регресійної залежності концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігону твердих побутових відходів, яка може бути використана для визначення рівня хімічного забруднення ґрунтів свинцем, є актуальною науково-технічною задачею.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Математичні моделі прогнозування об'ємів утворення ТПВ та площ полігонів і сміттєзвалищ в Україні запропоновано в матеріалах статті [13], за допомогою яких встановлено, що загальна площа полігонів та сміттєзвалищ, а також тих, що не відповідають нормам екобезпеки збільшується з часом приблизно за експоненціальним законом, а площа перевантажених полігонів та сміттєзвалищ, як тих, що відповідають, так і тих, що не відповідають нормам екобезпеки зростає щорічно майже лінійно. Для зменшення темпів зростання площ полігонів виконується технологічна операція ущільнення ТПВ під час завантаження у сміттєвоз [9, 10]. Високий коефіцієнт ущільнення ТПВ сприяє більш ефективному використанню площі полігона захоронення [14, 15].

Забруднення важкими металами ґрунтів через захоронення ТПВ розглянуто в роботах [16 - 19]. В статті [20] наведені дані щодо впливу важких металів на мікробіоценоз дерново-слабопідзолистого ґрунту.

Огляд найпоширеніших методів ремедіації важких металів в ґрунті викладено в роботі [21]. В статті [22] наведено дані щодо питомих затрат електроенергії на зменшення концентрацій важких металів (кадмій, свинець та цинк) в ґрунті полігонів ТПВ методом електрохімічної ремедіації, який оснований на використанні електричного струму для виділення відповідних забруднюючих речовин. Цим методом можна відновлювати ґрунти безпосередньо на поверхні землі без їх відбору у спеціальні ємності, що робить процес менш енергоємним. В статті [23] визначено регресійну залежність питомих енерговитрат очищення ґрунтів полігонів ТПВ через забруднення такими важкими металами, як кадмій, свинець та цинк, від їхніх фактичних та граничнодопустимих концентрацій. В роботі [24] виконані дослідження з удосконалення математичної моделі питомих енерговитрат очищення ґрунтів полігонів ТПВ через забруднення важкими металами від концентрацій кобальту, міді, нікелю, хрому, ванадію та марганцю, що дозволяють оцінити енерговитрати очищення забруднених ґрунтів від вказаних шкідливих речовин.

Авторами статті [25] наголошується, що традиційно міське середовище вирішує проблему накопичення відходів за рахунок сільських територій, внаслідок чого виникає проблема їхнього забруднення через погіршення якості ґрунтів, води, повітря, а також встановлено, що полігон ТПВ може бути причиною погіршення якості питних вод та санітарно-гігієнічного стану ґрунтів на прилеглих сільськогосподарських територіях. В роботі [26] визначено адекватну регресійну степеневу залежність концентрації нафтопродуктів в ґрунтах від відстані до полігонів твердих побутових відходів, яку застосовано для визначення безпечної відстані розміщення полігонів твердих побутових відходів від земель сільськогосподарського призначення за показником рівня хімічного забруднення ґрунтів нафтопродуктами.

Забруднення свинцем ґрунтів виникають як наслідок виробництва свинцевих

аккумуляторних батарей, утворення, накопичення та переробки їхніх відходів, а також при використанні в якості моторного мастила етилованого бензину [27]. В роботі [28] зазначено, що переважна кількість водорозчинних сполук свинцю при надходженні в ґрунт закріплюються у ньому і переходять у нерозчинний стан.

У матеріалах статті [29] наведена хімічна характеристика ґрунтів території полігону ТПВ с. Сенча Лохвицького району Полтавської області, зокрема рівень забрудненості свинцем на різних відстанях від полігону. Однак конкретних математичних залежностей концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігону твердих побутових відходів, в результаті аналізу відомих публікацій, авторами не виявлено.

### Мета і завдання статті

**Метою цієї статті** є використання методу регресійного аналізу при визначенні концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігону твердих побутових відходів, що може бути використано для визначення рівня хімічного забруднення ґрунтів свинцем.

### Методи і матеріали

Для визначення регресійної залежності концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігону ТПВ використано такі методи: аналіз літературних джерел, регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей, комп'ютерне моделювання.

### Результати досліджень

У таблиці 1 показані концентрації свинцю в ґрунтах полігону ТПВ с. Сенча Лохвицького району Полтавської області, отримані за допомогою атомно-абсорбційного методу із використанням спектрофотометру атомно-абсорбційний С-115 У [29]. На основі даних таблиці 1 планувалось отримати парну регресійну залежність концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігонів ТПВ.

Таблиця 1

**Концентрації свинцю в ґрунтах полігону ТПВ [29]**

Відстань від полігону, ТПВ	0	50	100	200	500
Концентрація свинцю в ґрунті, мг/кг	18,65	12,56	11,65	2,66	2,01

Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, що дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів [30] за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz" [31], яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір, і детально описана в роботі [32].

Програма "RegAnaliz" дозволяє проводити регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором раціонального виду функції із 16-ти найпоширеніших варіантів за критерієм максимального значення коефіцієнта кореляції зі збереженням результатів в форматі MS Excel та Bitmap.

Результати регресійного аналізу наведені в таблиці 2, де сірим кольором позначено комірку з максимальним значенням коефіцієнта кореляції  $R$ , що відповідає степеневій функції №16.

Отже, за результатами регресійного аналізу на основі даних таблиці 1, як найбільш адекватну остаточно прийнято таку регресійну залежність:

$$C_{Pb} = 19,76 - 2,761x^{0,3} \text{ [мг/кг]}, \quad (1)$$

де  $C_{pb}$  – концентрація свинцю в ґрунті, мг/кг;  $x$  – відстань до полігону ТПВ, м.

На рис. 1 показані фактичну та теоретичну графічну залежність концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігону ТПВ.

Таблиця 2

**Результати регресійного аналізу залежності концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігону ТПВ**

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R	№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R
1	$y = a + bx$	0,84375	9	$y = ax^b$	0,56071
2	$y = 1 / (a + bx)$	0,92904	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,72235
3	$y = a + b / x$	0,72183	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,72302
4	$y = x / (a + bx)$	0,92777	12	$y = a / (b + x)$	0,92904
5	$y = ab^x$	0,89149	13	$y = ax / (b + x)$	0,45151
6	$y = ae^{bx}$	0,89149	14	$y = ae^{b/x}$	0,56009
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,89149	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,56009
8	$y = 1 / (a + be^{-x})$	0,45150	16	$y = a + bx^n$	0,93493

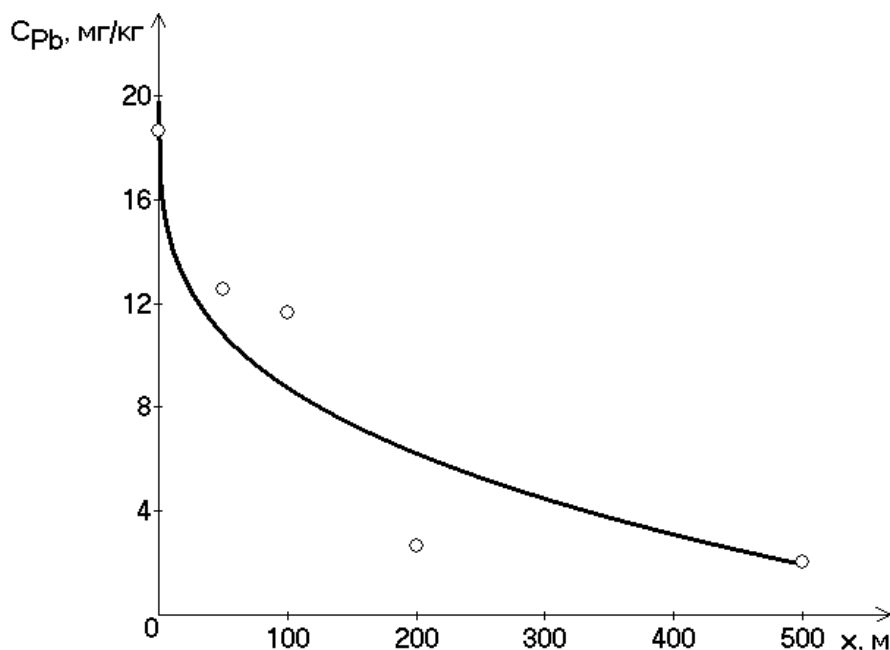


Рис. 1. Зміна концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігону ТПВ

Порівняння фактичних та теоретичних даних показало, що теоретичні концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігону ТПВ, розраховані за допомогою рівняння регресії (1), несуттєво відрізняються від даних, наведених в роботі [29], що підтверджує визначену раніше точність отриманої залежності на рівні **0,93493**.

Оскільки ГДК свинцю в ґрунті складає  $ГДК = 32$  мг/кг, що вище рівнів забруднення, визначених в роботі [29], то доцільно визначити межу зони слабого забруднення, в якій концентрація свинцю в ґрунті не перевищує ГДК, але вища за природний фоновий рівень. Підставивши значення фонові концентрації свинцю в ґрунті **Полтавської області**  $C_{\phi} = 1,615$  мг/кг [33] у рівняння регресії (1), визначимо відстань від полігону ТПВ, на якій забруднення ґрунту свинцем не перевищує фоновий рівень (межа зони слабого забруднення)

$$x = \left( \frac{19,76 - C_{pb}}{2,761} \right)^{\frac{1}{0,3}} = \left( \frac{19,76 - 1,615}{2,761} \right)^{\frac{1}{0,3}} \approx 526 \text{ (м)}.$$

### Висновки

1. Використано метод регресійного аналізу при визначенні концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігону твердих побутових відходів, що застосовано для визначення рівня хімічного забруднення ґрунтів свинцем.
2. Побудовано графічну зміну концентрації свинцю в ґрунтах від відстані до полігону твердих побутових відходів, яка дозволяє наочно проілюструвати цю регресійну залежність та показати збіжність теоретичних результатів з фактичними на рівні 0,93493.
3. Встановлено, що концентрація свинцю в ґрунтах зі збільшенням від відстані до полігону твердих побутових відходів спадає за степеневою залежністю.
4. Визначено, що відстань від полігона ТПВ, на якій забруднення ґрунту свинцем не перевищує фоновий рівень (межа зони слабого забруднення), складає 526 м.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сагдеева О. А. Оцінка рівня екологічної небезпеки звалищ твердих муніципальних відходів / О. А. Сагдеева, Г. В. Крусір, А. Л. Цикало // Екологічна безпека. – 2018. – № 1. – С. 75 – 83.
2. Hamer G. Solid waste treatment and disposal : effects on public health and environmental safety / G. Hamer // Biotechnology advances. – 2003. – Vol. 22, № 1 – 2. – P. 71 – 79. – <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.007>.
3. Ковальський В. П. Використання золи виносу ТЕС у будівельних матеріалах / В. П. Ковальський, О. С. Сідлак // Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві: науково-технічний збірник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. – № 1 (16). – С. 35 – 40.
4. Лемішко К. К. Використання промислових відходів енергетичної та хімічної галузі в технології виготовлення будівельних виробів / К. К. Лемішко, М. Ю. Стаднійчук, М. С. Лемешев // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт», 26 грудня 2018 р. – Одеса : ОНАХТ, 2019. – С. 23 – 25.
5. Синюк О. М. Наукові основи проектування обладнання для переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості : дис. ... докт. техн. наук : 05.05.10 / Синюк Олег Миколайович. – Хмельницький, 2018. – 485 с.
6. Мороз О. В. Економічні аспекти вирішення екологічних проблем утилізації твердих побутових відходів : монографія / О. В. Мороз, А. О. Свентух, О. Т. Свентух. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 110 с.
7. Піскун Р. П. Функціональна морфологія головного мозку при атеросклерозі в експерименті та під впливом вінпоцетину / Р. П. Піскун, С. М. Горбатюк // Таврический медико-биологический вестник. – 2006. – Т. 9. – № 3. – С. 100 – 113.
8. Березюк О. В. Моделювання динаміки санітарно-бактеріологічного складу твердих побутових відходів під час літнього компостування / О. В. Березюк, С. М. Горбатюк, Л. Л. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 4. – С. 17 – 20.
9. Березюк О. В. Шляхи підвищення ефективності пресування твердих побутових відходів у сміттєвозах / О. В. Березюк // Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві : науково-технічний збірник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – № 1 (6). – С. 111 – 114.
10. Березюк О. В. Структура машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів / О. В. Березюк // Вісник машинобудування та транспорту. – 2015. – № 2. – С. 3 – 7.
11. Березюк О. В. Експериментальне дослідження процесів зневоднення твердих побутових відходів шнековим пресом / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018. – № 5. – С. 18 – 24.
12. Кабінет Міністрів України. Постанова № 265 “Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами” [Електронний ресурс] 4 березня 2004. / Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/265-2004-%D0%BF>.
13. Березюк О. В. Математичне моделювання прогнозування об’ємів утворення твердих побутових відходів та площ полігонів і сміттєзвалищ в Україні / О. В. Березюк // Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві: Науково-технічний збірник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – № 2. – С. 88 – 91.
14. Попович В. В. Ефективність експлуатації сміттєвозів у середовищі "місто-сміттєзвалище" / В. В. Попович, О. В. Придатко, М. І. Сичевський // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – Т. 27, № 10. – С. 111 – 116.
15. Березюк О. В. Привод зневоднення та ущільнення твердих побутових відходів у сміттєвозі / О. В. Березюк // Вісник машинобудування та транспорту. – 2016. – № 2. – С. 14 – 18.
16. Impact Assessment of Contamination Pattern of Solid Waste Dumpsites Soil: A Comparative Study of Bauchi Metropolis / D. S. Buteh, I. Y. Chindo, E. O. Ekanem, E. M. Williams // World Journal of Analytical Chemistry. – 2013. – Vol. 1, № 4. – P. 59 – 62.
17. Heavy metal distribution in soil and plant in municipal solid waste compost amended plots / F. Ayari, H. Hamdi,

N. Jedidi, N. Gharbi, R. Kossai // Int. J. Environ. Sci. Tech. – 2010. – № 7 (3). – P. 465 – 472.

18. Tripathi A. A study of physico-chemical properties and heavy metals in contaminated soils of municipal waste dumpsites at Allahabad India / A. Tripathi, D. R. Misra // International Journal Of Environmental Sciences. – 2012. – Vol. 2, № 4. – P. 1 – 10.

19. Chao Su. A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques / Chao Su, Li Qin Jiang, Wen Jun Zhang // Environmental Skeptics and Critics. – 2014. – № 3 (2). – P. 24 - 38.

20. Гринчишин Н. М. Вплив важких металів на мікробіоценоз дерново-слабопідзолистого ґрунту / Н. М. Гринчишин, Т. М. Лозовицька // Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С. З. Гжицького. – Т. 11, № 2 (41), Ч. 4, 2009. – С. 54 – 57.

21. Nanda S. Remediation of heavy metal contaminated soil / S. Nanda, J. Abraham // African Journal of Biotechnology. – 2013. – Vol. 12 (21). – P. 3099 – 3109.

22. Лысенко Л. Перспективы решения проблемы загрязнения почв тяжелыми металлами / Л. Лысенко, М. Пономарев, Б. Корнилович // Экологические и ресурсосбережение. – 2001. – № 4. – С. 59 – 63.

23. Березюк О. В. Моделювання питомих енерговитрат очищення ґрунтів полігонів твердих побутових відходів від забруднення важкими металами / О. В. Березюк // Комунальне господарство міст. Серія: безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика. – 2015. – № 1 (120). – С. 240 – 242.

24. Березюк О. В. Удосконалення математичної моделі питомих енерговитрат очищення ґрунтів полігонів твердих побутових відходів від забруднення важкими металами / О. В. Березюк // Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи : II міжнар. наук.-практ. конф. : матеріали конф. – Львів : ЛДУ БЖД, 2015. – С. 185 – 187.

25. Макаренко Н. А. Вплив полігонів твердих побутових відходів на прилеглі сільські території / Н. А. Макаренко, О. О. Будак // Таврійський науковий вісник. – 2015. – № 93. – С. 227 – 233.

26. Регресійний аналіз концентрації нафтопродуктів в ґрунтах полігонів твердих побутових відходів / О. В. Березюк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2022. – № 3. – Режим доступу до журналу : <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/658/622>.

27. Агапова В. Т. Оцінка ризиків для здоров'я населення внаслідок емісії свинцю від антропогенних джерел / В. Т. Агапова, О. В. Золотко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2012. – № 42. – С. 29 – 34.

28. Шолохова А. С. Забруднення ґрунтів геоєкосистеми Тульчинського полігону ТПВ та перспективи їх ремедіації / А. С. Шолохова, В. П. Михайленко // Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство», 23 травня 2019 р., м. Київ. – Київ, 2019. – С. 87 – 88.

29. Типологізація техногенно порушених земель, які знаходяться під звалищами твердих побутових відходів, з урахуванням локальних особливостей / П. В. Писаренко, М. С. Самойлік, М. А. Галицька [та ін.] // Аграрні інновації. – 2022. – № 13. – С. 113 – 120.

30. Михалевич В. М. Математичні системи комп'ютерної алгебри як засіб підвищення ефективності і якості освітнього процесу з вищої математики / В. М. Михалевич, О. І. Шевчук, Н. Л. Буга // Сучасні інформаційні технології та інноваційні методи навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми. Зб. наук. прац. – Київ-Вінниця : ДОВ «Вінниця», 2007. – Випуск 14. – С. 357 - 360.

31. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Регресійний аналіз" ("RegAnaliz") / О. В. Березюк // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 49486. – К. : Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 03.06.2013.

32. Березюк О. В. Встановлення регресій параметрів захоронення відходів та потреби в ущільнювальних машинах на основі комп'ютерної програми "RegAnaliz" / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 1. – С. 40 – 45.

33. Гупал В. В. Вміст важких металів у ґрунтах захисних лісових насаджень призалізничних територій / В. В. Гупал, І. Р. Чорнявська // Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2018. – № 4. – С. 123 – 130.

Стаття надійшла до редакції 11.11.2022.

Стаття пройшла рецензування 25.11.2022.

**Березюк Олег Володимирович** – д. т. н., доцент, професор кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: berezyukoleg@i.ua.

**Лемешев Михайло Степанович** – к. т. н., доцент, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури.

**Дудар Ігор Никифорович** – д. т. н., професор, професор кафедри будівництва, міського господарства та архітектури.

Вінницький національний технічний університет.