

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.19

УДК 656.71:504.43.45

Черняк Л.М.¹, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-4192-3955, e-mail: specially@ukr.net

Міхєєв О.М.¹, д. біол.н., ст.н.сп., ORCID: 0000-0003-4069-3625, e-mail: mikhalex7@yahoo.com

Маджд С.М.², д.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-2857-894x, e-mail: madzhd@ukr.net

Дмитруха Т. І.¹, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-5195-9519,

e-mail: tetiana.dmytrukha@npp.nau.edu.ua

Петрусенко В.П.¹, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-3120-9379,

e-mail: valentyna.petrusenko@npp.nau.edu.ua

Лапань О.М.¹, Phd з біології, ORCID: 0000-0001-6509-4456,

e-mail: oksana.lapan@npp.nau.edu.ua

¹Національний авіаційний університет, м. Київ

²Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, м. Київ

Cherniak Larysa¹, Candidate of engineering sciences, Associate Professor of the Department of Ecology

Mikhyeyev Olexandr¹, Doctor of biological sciences, Professor of the Department of Ecology

Madzhd Svitlana², Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Water Ecosystems and Bioresources

Dmytrukha Tetiana¹, Candidate of engineering sciences, Associate Professor of the Department of Ecology

Petrusenko Valentyna¹, Candidate of engineering sciences, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics

Lapan Oksana¹, Ph.D., Assistant Professor of Ecology

¹National Aviation University, Kyiv

²State Ecology Academy of Postgraduate Education and Management, Kyiv

ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ МЕТОДУ ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ГРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ НАФТОПРОДУКТАМИ

У статті наведено результати дослідження якості відновлення ґрунтів на основі методу фітореємедіації. Проаналізовано негативний та позитивний впливи цього методу відновлення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами, на основі двофакторного аналізу експерименту. Наведено залежності цих впливів у вигляді регресійних рівнянь для досліджуваних проб ґрунту.

Ключові слова: фітореємедіація; ґрунт; метод факторного експерименту; концентраційна залежність; забруднення нафтопродуктами.

The article presents the results of a study of the quality of soil restoration based on the phytoremediation method. The negative and positive effects of this method of remediation of soils contaminated with petroleum products were analyzed on the basis of a two-factor analysis of the experiment. The dependences of these effects are given in the form of regression levels for the studied soil samples.

Keywords: phytoremediation; soil; factorial experiment method; concentration dependence; oil pollution.

Постановка проблеми

На сьогодні проблема забруднення ґрунтів нафтопродуктами має глобальний характер [1—2]. Особливо гостро стоїть питання якості ґрунтів на техногенно навантажених територіях [3—4], до яких, зокрема належать території аеропортів [5—6]. Для зменшення негативного впливу нафтопродуктів на стан ґрунтів та відновлення їх якісних характеристик використовують різні методи деструкції нафтових вуглеводнів у забруднених ґрунтах [3—4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Останніми роками все більшої популярності набувають біологічні методи очищення ґрунтів від нафтопродуктів [5—6]. Зазначені методи мають рід переваг над фізико-хімічним та механічними методами відновлення якості ґрунтів, забруднених нафтопродуктами [5—7]. Серед них найбільш популярним, є метод фіторемедіації [8—10]. В своїх дослідженнях нами, обрано саме цей метод очищення ґрунтів, забруднених авіаційним паливом, оскільки він є одним із найбільш екологічно безпечним, рентабельним, доступним та перспективним з існуючих методів відновлення якості ґрунтів, забруднених нафтопродуктами [11—13].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи була оцінка використання фіторемедіації для відновлення якісних характеристик ґрунту, забрудненого авіаційним паливом, з використанням методу математичного планування експерименту, а саме методу повного факторного експерименту (ПФЕ), який дозволяє отримати статистичну модель впливу задіяних факторів, а саме наявності рослин та нафтопродуктів.

Виклад основного матеріалу

Матеріали для дослідження: авіаційний керосин марки ТС-1, проби ґрунту, насіння вівса (*Avena sativa* L.) та тимофіївки (*Phleum* L.), ростильні, термостат, вода, чашки Петрі, фільтрувальний папір, насіння крес-салат (*Lepidium sativum*).

Відповідно до встановленої мети дослідження було підготовлено шість ростильень з ґрунтом, для дослідження (рис. 1, а). А, саме: 1 — контроль без додавання керосину; 2 — ґрунт без додавання керосину, з висіяним у відповідній кількості насінням вівса; 3 — ґрунт без додавання керосину, з висіяним у відповідній кількості насіння тимофіївки; 4 — ґрунт з додаванням керосину у концентрації 10 ОДК (орієнтовно допустима концентрація); 5 — ґрунт з додаванням керосину у кількості 10 ОДК, з висіяним у відповідній кількості насінням вівса; 6 — ґрунт, з додаванням керосину у кількості 10 ОДК, з висіяним у відповідній кількості насінням тимофіївки.



Рис. 1. Досліджувані проби ґрунту: а) до пророщування; б) на 5-ту добу після пророщування

Наступним етапом роботи було пророщування насіння, обраного для дослідження рослин: вівса посівного (*Avena sativa* L.) та тимофіївки (*Phleum* L.) на підготовлених пробах ґрунту.

На п'яту добу пророщування було встановлено низький рівень схожості тимофіївки (рис. 1, б) та обрано для подальшого дослідження рівня фітотоксичності ґрунту ростильні з вівсом звичайним.

На десяту добу пророщування було відібрано проби ґрунту з ростильень (рис. 2) для визначення рівня фітотоксичності даних проб ґрунту та встановлення ефективності очищення ґрунту від нафтопродуктів за допомогою фіторемедіації з використанням вівсу звичайного. Для визначення рівня фітотоксичності було використано ростовий тест з використанням насіння салату посівного (*Lactuca sativa*) та визначені ростові характеристики його проростків.

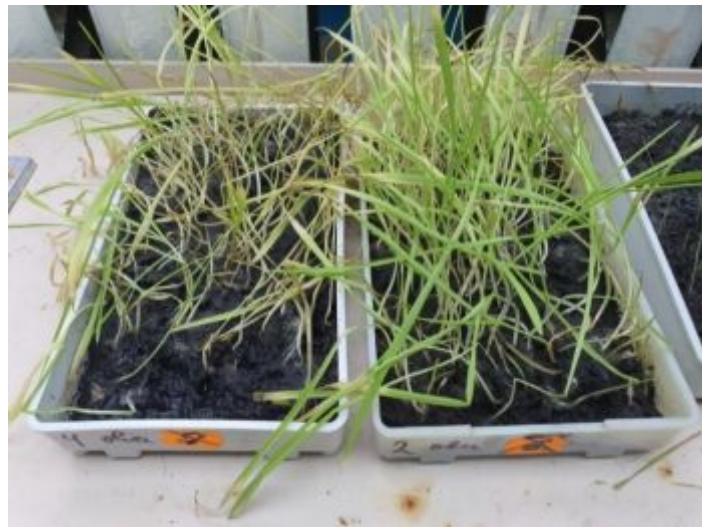


Рис. 2. Проростки салату посівного (*Avena sativa* L.) на десяту добу пророщування

Наступним етапом було визначення впливу двох факторів, а саме наявності рослин (X_1) та вмісту нафтопродуктів (X_2) на рівень фітотоксичності досліджуваних проб ґрунту, штучно забруднених авіаційним керосином марки ТС-1. Як відомо, схема ПФЕ для двох чинників на двох рівнях дозволяє оцінити параметри статистичної моделі у регресійного рівняння типу:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2. \quad (1)$$

У якості значення функції відгуку (Y), за якими ми визначали ефективність фітореємедіації, використано середню довжину органів проростків у порівнянні до контролю.

Завдання математичного планування експерименту (МПЕ) полягає в отриманні статистичної форми зв'язку виходів системи з входами, тобто з діючими чинниками [14—15]. У нашому випадку, для визначення ефективності застосування фітореємедіації ґрунтів, забруднених нафтопродуктами, було застосовано схему повного факторного експерименту (ПФЕ), що є одним із видів МПЕ.

Щоб була можливість встановлювати рівень впливу кожного з факторів незалежно від рівнів інших чинників, важливим є те, щоб кожний чинник задавався незалежно від іншого. Рівнем чинника називається його доза/концентрація впливу на всю систему або на окремі її частини (підсистеми). Наявність або відсутність чинника теж може бути прийнята за діючий фактор.

Важливим є те, що коефіцієнти членів регресійного рівняння дозволяють кількісно оцінити як незалежний внесок кожного чинника (пророщування рослин на ґрунті та вплив нафтопродуктів), так і ефекти їх сумісної (поєднаної) дії. Що є важливим, оцінка взаємодії означає можливість оцінки ступеня нелінійності (синергізм чи антагонізм) дії обраних для дослідження двох чинників, що особливо важливе для вивчення можливої неадитивної (синергетичної, зокрема) взаємодії фітодезактивації і хімічного чинника (нафтопродукту).

Для встановлення кількісної оцінки використання технології фітореємедіації ґрунту, забрудненого авіаційним паливом, з допомогою обраного виду тест-рослини (крес-салат), необхідно було обчислити коефіцієнти регресійного рівняння для трьох варіантів обробки ґрунту: незабрудненого авіаційним паливом марки ТС-1, штучно забрудненого паливом без попереднього вирощування рослин та забрудненого після вирощування на ньому рослин вівса посівного.

Використовуючи первинні дані впливу факторів на рости активність органів проростків, при використанні стандартного ростового тесту і матрицю планування двофакторного експерименту, у відповідності з якою, фактично, ставили досліди, їх представили наступним чином у табл. 1.

Розраховані коефіцієнти регресійних рівнянь за довжиною кореня проростків салату при пророщування насіння салату на досліджуваних пробах ґрунту, представлені на рис. 3.

Таблиця 1. Матриця планування двофакторного експерименту та отримані результати (довжина органів у % до контролю) на 10-ту добу спостереження

Номер досліджу	Варіант досліджу	Y_i (корінь)	Y_i (стебло)
1	Контроль	100	100
2	X_1 (рослини)	100	96
3	X_2 (керосин)	32,4	22,5
4	$X_1 + X_2$	90,9	104

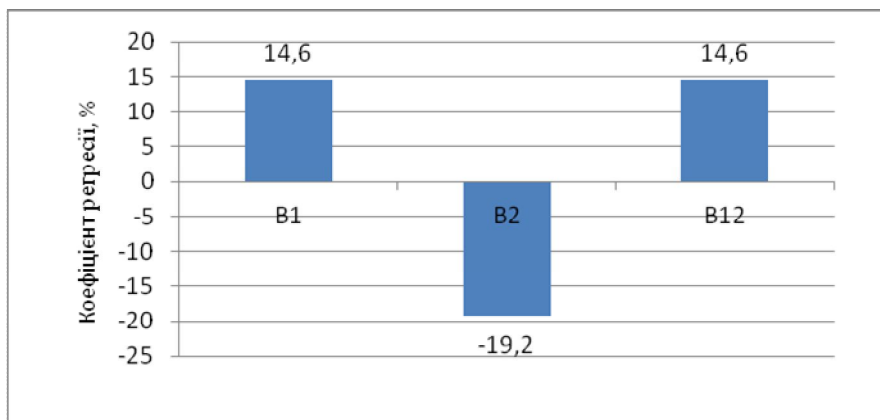


Рис. 3. Коефіцієнти регресійних рівнянь для досліджуваних проб ґрунту (по відношенню до контролю (%)) для ростового параметру — довжина кореня) на десяту добу спостереження: B_1 — коефіцієнт регресійного рівняння для впливу фактору наявності рослин; B_2 — коефіцієнту регресійного рівняння для впливу фактору керосину; B_{12} — коефіцієнт регресійного рівняння, що вказує на взаємодію X_1 з X_2

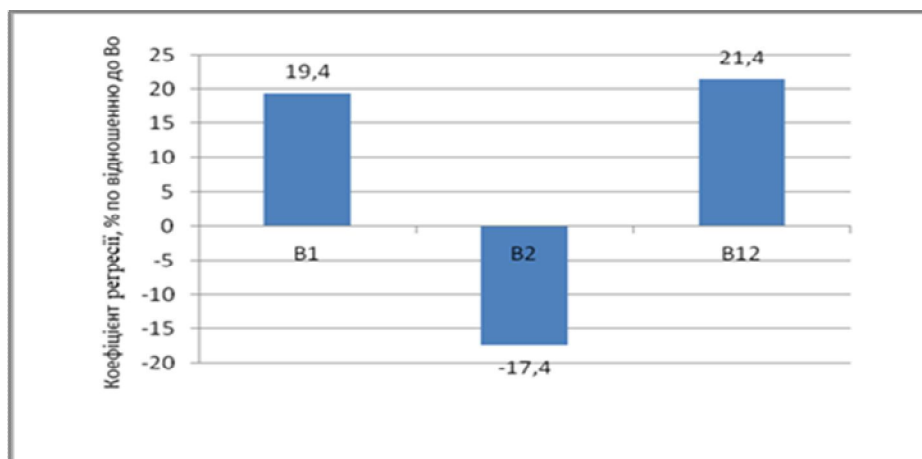


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів регресійних рівнянь для досліджуваних проб ґрунту (по відношенню до контролю (%)) для ростового параметру — довжина стебла) на десяту добу дослідження: B_1 — коефіцієнт регресійного рівняння для впливу фактору наявності рослин; B_2 — коефіцієнту регресійного рівняння для впливу фактору керосину; B_{12} — коефіцієнт регресійного рівняння, що вказує на взаємодію X_1 з X_2

Можна бачити, що на 10-ту добу спостерігається негативний вплив авіаційного палива (X_2) та позитивний вплив рослин (X_1) на корені проростків. Взаємодія факторів X_1 та X_2 , яка відображена концентраційною залежністю коефіцієнта B_{12} , є позитивною, що означає підсилення позитивного впливу рослин та зниження негативного впливу авіаційного палива при сумісній дії двох факторів (X_1 та X_2).

Залежність коефіцієнтів регресії, визначені за довжиною стебла проростків салату, при пророщування насіння салату на досліджуваних пробах ґрунту, представлені на рис. 4.

Як і для кореня для проростків стебла салату, очевидним є те, що на 10-ту добу спостереження проявляється негативний вплив авіаційного палива (X_2) та позитивний вплив фактору наявності рослин (X_1). Взаємодія факторів X_1 та X_2 , є позитивною, що означає підсилення позитивного впливу дії рослин та зменшення негативного впливу палива при сумісній дії цих факторів.

Висновки

У роботі була здійснена оцінка використання фітореMediaції для відновлення якісних характеристик ґрунту, забрудненого авіаційним паливом, з використанням методу математичного планування експерименту, а саме метод повного факторного експерименту. Отримані дані продемонстрували, що на 10-ту добу спостереження проявляється негативний вплив авіаційного палива (X_2) та позитивний вплив рослин (X_1). У той же час, підсилення позитивного впливу дії рослин та зменшення негативного впливу авіаційного палива при взаємодії зазначених двох факторів X_1 та X_2 , відображено концентраційною залежністю коефіцієнта B_{12} , і є позитивним.

Отже, аналізуючи отримані результати можна зробити висновок про можливість використання технології фітореMediaції нафтозабруднених ґрунтів, яка кількісно оцінена за допомогою методу повного факторного експерименту.

Список використаної літератури

1. Banks M.K., Schultz R.E. Comparison of Plants for Germination Toxicity test in Petroleum-contaminated soils. *Water, air and soil pollution*. 2005. 167. P. 211–219. [in English].
2. Amadi A. Chronic effects of oil spill on soil properties and microflora of a rainforest ecosystem in Nigeria. *Water, air and soil pollution*. 1996. 86. P. 1–11. [in English].
3. Nunes L.M., Zhu Y.-G., Stigter T.Y., Monteiro J.P. and Teixeira M.R. Environmental impacts on soil and groundwater at airports: origin, contaminants of concern and environmental risks. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2011. 13. P. 3026–3039. [in English].
4. Trofimov I., Pavliukh L., Novakivska T., Bondarenko D. Assessment of Fitotoxic Toxicity of Mixed Aviation Fuels Using of Plant Testers. *International independent scientific journal*. 2020. P. 9–17. [in English].
5. Гроза В.А., Маджд С.М., Франчук Г.М.. Екологічний стан ґрунтового покриву в зоні експлуатації та ремонту авіаційної техніки. *Екологічна безпека та природокористування: Збірник наукових праць*, Вип. 5. 2010. С. 56–66.
6. Cherniak L.M., Petruk R.V., Mikhieiev O.M., Madzhd S.M., Petruk G. D. Investigation of the influence of hyperthermia and soil pollution with the petrochemicals on test objects using the method of mathematical planning . *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022. № 5, P. 153–157. [in English].
7. Cherniak L. Mikhieyev O., Madzhd S., Lapan O., Dmytrukha T., Korniienko I. Usage of plant test systems for determination of phytotoxicity of contaminated with petroleum products soil. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. № 22, P. 66–71. [in English].
8. Терек О. І. Механізми адаптації рослин до нафтового забруднення. *Біологічні студії*. 2018. № 12 (3–4). С. 141–164.
9. Бабаджанова О.Ф., Гринчишин Н.М. Роль сорбентів у ліквідації аварійних розливів нафтопродуктів із поверхні ґрунту. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності: зб. наук. праць*. Львів : Вид-во Львівського ДУ БЖД. 2010. № 4. С. 75–81.
10. Гринчишин Н.М., Бабаджанова О.Ф. Реабілітація ґрунтів, забруднених аварійними виливами нафтопродуктів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.7. С. 43–49.

11. Зеленько Ю.В., Горбова О.В., Вострокнудова І.В., Лещинська А.Л. Оптимізація використання біокомпонентних матеріалів та моделювання процесів біологічної деструкції нафтопродуктів. *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту*. Донецьк: Видавництво Донецького інституту залізничного транспорту, 2012. Вип. 29. С. 222–227.
12. Фецько З.М., Терек О.І., Баранов В.І., Бешлей С.В., Ващук С.П., Філяк О.С. Техногенно девастровані території вугле- і нафтовидобувної промисловості та заходи щодо їх фітомеліорації. *Біологічні Студії*. 2012. № 3. С. 235–246.
13. Джура Н.М. Перспективи фітореMediaції нафтозабруднених ґрунтів рослинами *Faba bona Medic.* *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2011. Вип. 57. С. 117–124.
14. Coursey W.J. *Statistics and Probability for Engineering Applications*. Elsevier Science (USA). 2003. 396 p. [in English].
15. Walpole R.E., Myers R.H., Myers S.L., Ye K. (2012). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. 9th edition, Pearson: MA. USA. 2012. 552 p. [in English].

USING OF THE MATHEMATICAL PLANNING OF THE EXPERIMENT FOR THE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE METHOD OF PHYTOREMEDIATION RESTORATION OF SOILS CONTAMINATED WITH PETROCHEMICALS

Abstract

Nowadays, the problem of soil contamination with oil products has global character. The issue of soil quality is particularly acute in technogenically loaded territories, which, in particular, include the territories of airports. To reduce the negative impact of petrochemicals on the condition of the soils and to restore their quality characteristics, various methods of destruction of petroleum hydrocarbons in contaminated soils are used. In recent years, biological methods of cleaning soils from oil products are gaining more and more popularity. These methods have a number of advantages over physicochemical and mechanical methods of restoring the quality of the soils contaminated with petrochemicals. However, the most popular is the phytoremediation method. In our research, we have chosen this method of cleaning soils contaminated with aviation fuel, as it is one of the most ecologically safe, cost-effective, accessible and promising of the existing methods of restoring the quality of soils contaminated with petroleum products. The purpose of the work was to evaluate the use of phytoremediation to restore the quality characteristics of soil contaminated with aviation fuel, using the method of mathematical planning of the experiment, namely the method of full factorial experiment, which allows obtaining a statistical model of the influence of the factors involved, namely the presence of plants and petroleum products. To achieve the goal, the phytoremediation technology of soil samples artificially contaminated with TS-1 aviation kerosene was applied. The plants chosen for the study were oats (*Avena Sativa L.*) and timothy (*Phleum L.*). The change in the level of phytotoxicity of the soil samples after the application of phytoremediation technology was determined using a growth test with watercress (*Lepidium sativum*).

The obtained data showed that on the 10th day of observation, the negative impact of aviation fuel (X_2) and the positive impact of plants (X_1) is observed. At the same time, strengthening the positive impact of plant action and reducing the negative impact of aviation fuel in the interaction of these two factors X_1 and X_2 . Analyzing the obtained results, we can draw a conclusion about the possibility of using the technology of phytoremediation of oil-contaminated soils, which is quantitatively evaluated using the method of a full factorial experiment.

References

- [1] M.K.Banks, R.E. Schultz. (2005). Comparison of Plants for Germination Toxicity test in Petroleum-contaminated soils. *Water, air and soil pollution*, 167, 211-219. [in English].
- [2] Amadi A. (1996). Chronic effects of oil spill on soil properties and microflora of a rainforest ecosystem in Nigeria. *Water, air and soil pollution*, 86, 1–11. [in English].

- [3] Nunes L.M., Zhu Y.-G., Stigter T.Y., Monteiro J.P. & Teixeira M.R. (2011). Environmental impacts on soil and groundwater at airports: origin, contaminants of concern and environmental risks. *Environmental Monitoring and Assessment*, 13.P. 3026–3039. [in English].
- [4] Trofimov I., Pavliukh L., Novakivska T., Bondarenko D. Assessment of Fitotoxic Toxicity of Mixed Aviation Fuels Using of Plant Testers. (2020). *International independent scientific journal*.P. 9–17. [in English].
- [5] Hroza V.A., Madzhd S.M., Franchuk H.M. Ekolohichnyi stan gruntovoho pokryvu v zoni ekspluatatsii ta remontu aviatsiinoi tekhniki. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia: zbirnyk naukovykh prats*, Vyp. 5, 2010. P. 56–66. [in Ukrainian].
- [6] Cherniak L.M., Petruk R.V., Mikhieiev O.M., Madzhd S.M., Petruk G. D. (2022). Investigation of the influence of hyperthermia and soil pollution with the petrochemicals on test objects using the method of mathematical planning . *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 5. P. 153–157. [in English].
- [7] Cherniak L. Mikhyeyev O., Madzhd S., Lapan O., Dmytrukha T., Korniienko I. (2021). Usage of plant test systems for determination of phytotoxicity of contaminated with petroleum products soil. *Journal of Ecological Engineering*, 22, P. 66–71. [in English].
- [8] Terek O. I. Mekhanizmy adaptatsii roslyn do naftovoho zabrudnennia. *Biolohichni studii*. 2018. №12(3–4). P. 141–164. [in Ukrainian].
- [9] Babadzhanova O.F., Hrynchyshyn N.M. Rol sorbentiv u likvidatsii avariinykh rozlyviv naftoproduktiv iz poverkhni gruntu. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti: zb. nauk. prats*. Lviv : Vyd-vo Lvivskoho DU BZhd. 2010. № 4. P. 75–81. [in Ukrainian].
- [10] N.M. Hrynchyshyn, O.F. Babadzhanova. Reabilitatsiia gruntiv, zabrudnennykh avariinymy vlyvamy naftoproduktiv. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*. 2012. Vyp. 22.7. P. 43–49. [in Ukrainian].
- [11] Zelenko Yu.V., Horbova O.V., Vostroknutova I.V., Leshchynska A.L. Optymizatsiia vykorystannia biokompozytnykh materialiv ta modeliuvannia protsesiv biolohichnoi destrukttsii naftoproduktiv. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu*. Donetsk: Vydavnytstvo Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu, 2012. Vypusk 29. P. 222–227. [in Ukrainian].
- [12] Fetsko Z.M., Terek O.I., Baranov V.I., Beshlei S.V., Vashchuk S.P., Filiak O.S. Tekhnohenko devastovani terytorii vuhle- i naftovydobuvnoi promyslovosti ta zakhody shchodo yikh fitomelioratsii. *Biolohichni Studii*. 2012. №3. P. 235–246. [in Ukrainian].
- [13] Dzhura N.M. Perspektyvy fitoremediatsii naftozabrudnennykh gruntiv roslynamy *Faba bona Medic*. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Serii biologichna*. 2011. Vypusk 57. P. 117–124. [in Ukrainian].
- [14] Coursey W.J. *Statistics and Probability for Engineering Applications*. (2003). Elsevier Science (USA). 396. [in English].
- [15] Walpole R.E., Myers R.H., Myers S.L., Ye.K. (2012). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. 9th edition, Pearson: MA. USA. 552 p. [in English].

Надійшла до редколегії 26.03.2023