

В. К. Шинкаренко, М. М. Талерко, А. М. Новіков, В. О. Краснов, В. О. Кашпур, О. А. Свирид, В. В. Августов

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

Радіоактивні аерозолі під укриттям нового безпечного конфайнмента після удару безпілотного літального апарата 14 лютого 2025 р.

Ключові слова:

радіоактивні аерозолі,
Чорнобильська зона,
новий безпечний конфайнмент,
 ^{137}Cs ,
 ^{241}Am ,
ресуспензія,
моніторинг,
імпактор,
авторадіографія

Вибух безпілотника та наступна пожежа призвели до пошкодження герметичності захисної оболонки Арки та до значного зростання об'ємної активності радіонуклідів у повітрі під нею. Відбір проб для визначення дисперсного складу радіоактивних аерозолів та активності пов'язаних із ними радіонуклідів (^{137}Cs , ^{241}Am) було здійснено за допомогою стаціонарних фільтрувально-вентиляційних установок та імпактора. Спостерігається дво модальний розподіл аерозольних частинок за аеродинамічними діаметрами: дрібні частинки з розмірами порядку 1 мкм і більш крупні з діаметрами порядку 10–20 мкм. За допомогою авторадіографії на експонованих після вибуху фільтрах зафіксовано появу великої кількості «гарячих» частинок, β -активності яких, як правило, не перевищують 5 Бк. Видається вельми вірогідним, що сплеск активності після вибуху зумовлений переважно ресуспензією раніше осілих частинок, а не новим викидом паливного матеріалу.

Вступ

14 лютого 2025 р. о 1:54 російський ударний безпілотний літальний апарат (БПЛА) «Герань-2» із фугасною бойовою частиною влучив у захисне укриття — Арку нового безпечного конфайнмента (НБК), зведену над зруйнованим 4-м енергоблоком Чорнобильської атомної електростанції (ЧАЕС) [1]. Унаслідок вибуху було пошкоджено обидва шари захисної оболонки Арки. Проте герметичність основного об'єму повітря під НБК збереглася, оскільки пробоїна припала на ізольоване приміщення депо мостових кранів.

Унаслідок вибуху спалахнула пожежа, після ліквідації якої до 7 березня продовжувалось тління гумового шару наповнювача захисної оболонки Арки НБК [2]. Вигорання цього шару, а також подальше руйнування

переминок, що герметизували основний об'єм, призвели до втрати герметичності захисної оболонки.

Вибух і наступна пожежа зумовили значний ріст повітряної активності радіонуклідів, а також інтенсивне задимлення простору під Аркою. Водночас, оскільки пошкоджень об'єктів, що містять радіоактивні матеріали, зафіксовано не було, залишається відкритим питання щодо походження виявлених у повітрі радіонуклідів.

Метою дослідження є з'ясування природи та джерел надходження радіонуклідів, виявлених у повітряному середовищі під Аркою НБК після удару БПЛА.

Вхідні дані та методи дослідження

Згідно зі штатною програмою контролю відбір аерозольних проб під Аркою НБК проводився за до-

© В. К. Шинкаренко, М. М. Талерко, А. М. Новіков, В. О. Краснов, В. О. Кашпур, О. А. Свирид, В. В. Августов, 2025. Ліцензія CC BY 4.0

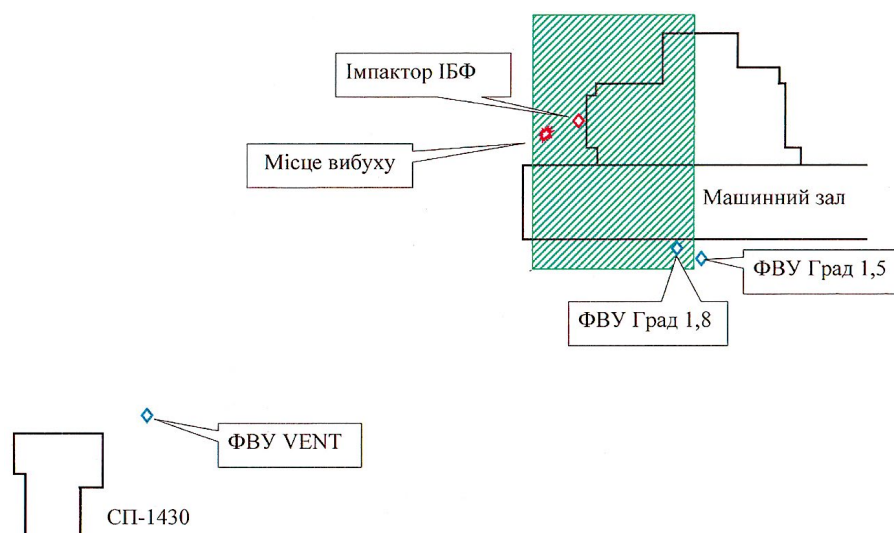


Рис. 1. Схема розташування пробовідбірників

помогою стаціонарної фільтр-вентиляційної установи (ФВУ) Град-1,8, розташованої в південно-східному кутку неподалік від східної стіни Арки НБК, та імпактора ІБФ-VTE, розташованого в північно-західній її частині. Каскади цього імпактора збирають та сортують частинки за їхніми аеродинамічними діаметрами: 17,0–8,5; 8,5–3,7; 3,7–1,2; 1,2–0,5 та менше 0,5 мкм. Періодичність зміни колекторних пластин імпактора 14 діб.

Поза НБК поблизу його східної стіни знаходилась ФВУ Град-1,5. ФВУ VENT була розташована приблизно за 500 м на захід — південний захід від НБК (рис. 1).

Основні характеристики ФВУ наведено в таблиці. Матеріал повітряних фільтрів — тканина Петрянова ФПП-15-1,5. Періодичність зміни фільтрів — 7 діб.

Вимірювання активності ^{137}Cs , ^{154}Eu та ^{241}Am на повітряних фільтрах проводили за допомогою напівпровідникового γ -спектрометра з охолоджуванним детектором із надчистого германію.

Авторадіографічні дослідження проводили згідно з [3] з використанням медичної рентгенівської

плівки. Цифрові денситограми авторадіографічних плям отримували за допомогою сканування в режимі відбивання, роздільна здатність 600 точок на дюйм. Визначення параметрів радіографічних плям проводили за допомогою пакета обробки зображень Image-Pro Plus 6.0. Для визначення β -активності частинок за параметрами їхніх радіографічних зображень будували калібрувальну залежність, отриману за даними авторадіографії лінійки частинок із відомою активністю. Свого часу (2000–2003 рр.) ці частинки були ізолювані з повітряних фільтрів, експонованих поблизу об'єкта «Укриття»; β -активності відібраних частинок були визначені за допомогою низькофонового пропорційного лічильника LB-720 (Bekman).

Результати та обговорення

Повітряний фільтр ФВУ Град-1,8, що був експонований у період 12–18.02.2025 й продовжував працювати після удару БПЛА, мав інтенсивне темне забарвлен-

Основні технічні характеристики пробовідбірників аерозолі

Характеристики пробовідбірників	ФВУ Vent	ФВУ Град-1,5	ФВУ Град-1,8	Імпактор ІБФ
Місцезнаходження:				
Широта	51°23'13.0"	51°23'17.9"	51°23'17.9"	51°23'21.6"
Довгота	30°05'31.4"	30°05'53.4"	30°05'52.4"	30°05'48.5"
Висота відбирання проби, м	1,0	1,5	1,8	1,5
Продуктивність, м³/год	300	450	450	3
Площа фільтра, м²	0,36	0,56	0,56	$3,85 \cdot 10^{-3}$

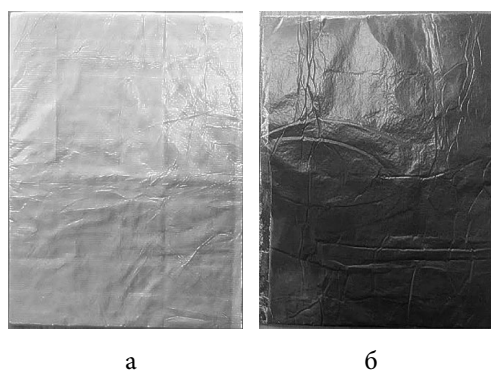


Рис. 2. Фрагменти експонованих повітряних фільтрів:
а — 28.01–06.02.2025, $Q = 30\,000\text{ м}^3$, б — 12–18.02.2025,
 $Q = 14\,000\text{ м}^3$, де Q – прокачаний об'єм повітря

ня і залишався липким унаслідок відкладання великої кількості частинок кіптяви. На рис. 2 для порівняння наведено зображення фрагментів двох повітряних фільтрів, експонованих до і під час удару.

На рис. 3 наведено авторадіограми цих фрагментів. Відмітимо, що верхній шар тканини Петрянова залишався липким тривалий час після експозиції, що призвело до часткового злипання шарів складеного фільтра. Світлі ділянки на авторадіограмі рис. 3, б утворилися внаслідок часткового видалення волок-

нистого шару, темна ділянка вгорі відповідає шару подвійної товщини. Бета-активності «гарячих» частинок на обох фрагментах, переважно, не перевищують 5 Бк, лише деякі з них мають активності не більше 10 Бк. Виходячи із середньої на сьогодні питомої β -активності опроміненого палива¹ порядку $1,31 \cdot 10^9$ Бк/г UO_2 та густини палива $\approx 10\text{ г/см}^3$, маємо оцінку аеродинамічних діаметрів частинок порядку 28,5 мкм з активністю 5 Бк та ≈ 36 мкм для частинок з активністю 10 Бк. Тобто ФВУ Град-1,8 переважно досягли частинок з аеродинамічними діаметрами менше 30–40 мкм. Аналогічна ситуація спостерігалась у 2019 р. під час обвалу в приміщенні 402/3, коли на повітряних фільтрах цієї установки теж були відсутні частинки з більшими активностями. Видається ймовірним, що цьому сприяло як віддалене розташування установки від місця обвалу, так і наявність залишку стіни машинного залу поряд з установкою. У результаті більш крупні частинки або не утворилися в просторі під Аркою, або не змогли долетіти до установки [3].

Динаміка об'ємної активності ^{137}Cs в повітрі поблизу точки розташування ФВУ Град-1,8 наведена на рис. 4. У період з 12 по 18 лютого спостерігається підвищення об'ємної активності, але потрібно пам'ятати,

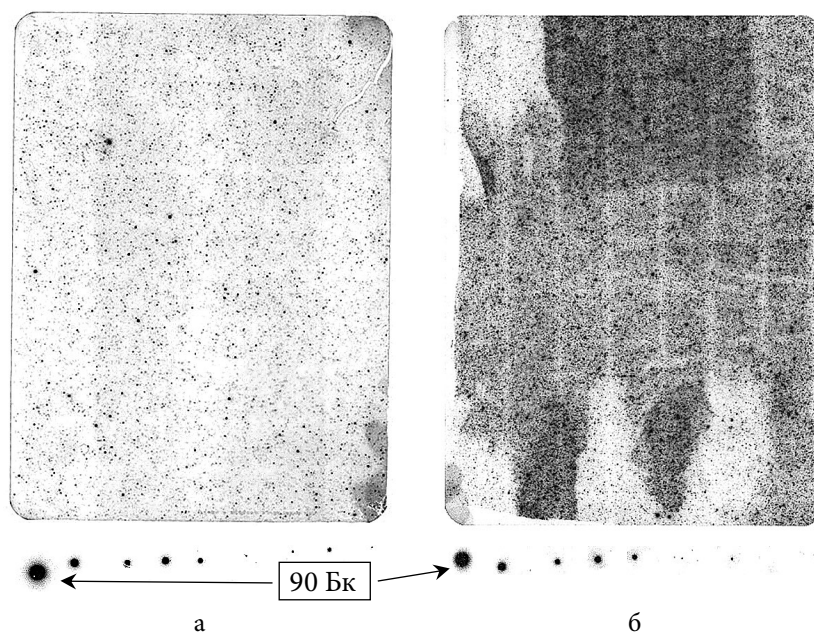
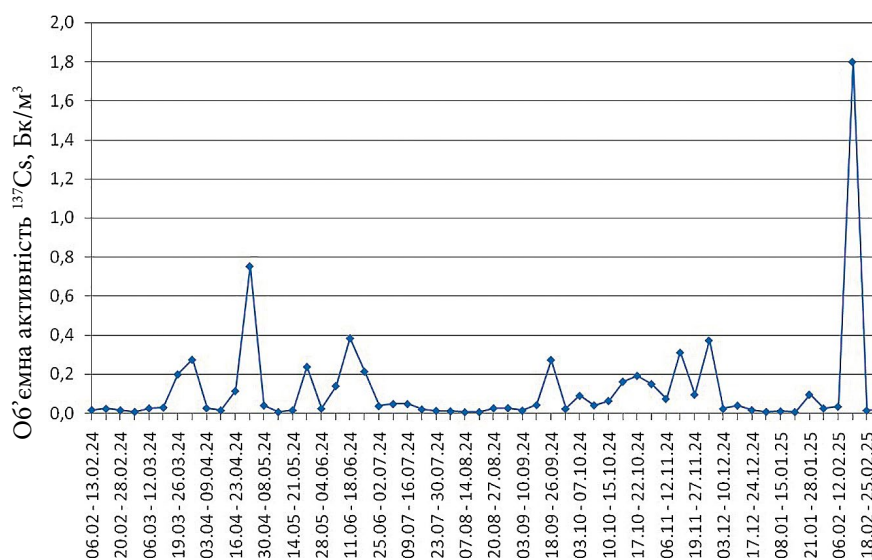
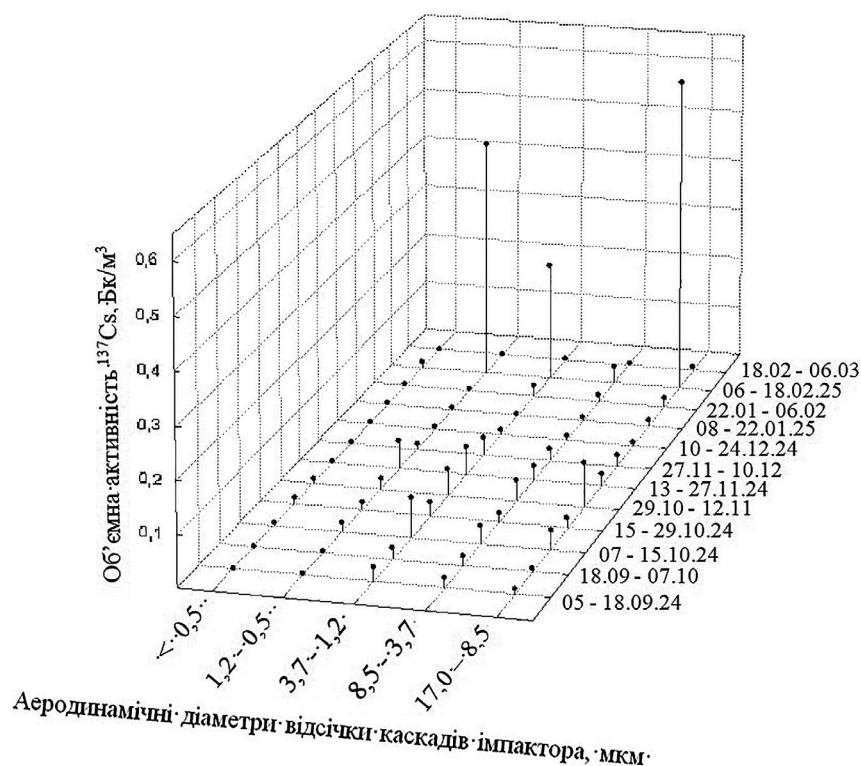


Рис. 3. Авторадіографічні зображення фрагментів повітряних фільтрів:
а — 28.01–06.02.2025, радіографічна експозиція 14 діб; б — 12–18.02.2025,
експозиція 7 діб. Внизу відповідні авторадіограми лінійки частинок

¹ Розраховано згідно з даними, наведеними в [5]. Бета-випромінювання ^{241}Pu не брали до уваги, оскільки енергії цих частинок ($\leq 20\text{ кеВ}$) замалі для досягнення робочого шару фотоемульсії.

Рис. 4. Об'ємні активності ^{137}Cs в повітрі поблизу ФВУ Град-1,8Рис. 5. Динаміка об'ємної активності ^{137}Cs в повітрі на місці розташування імпактора ІБФ

що це значення усереднене за тиждень, тому пікова активність могла бути на 1-2 порядки більшою.

На рис. 5 наведено значення об'ємної активності ^{137}Cs в повітрі поблизу розташування імпактора ІБФ. Дані за період 6–18 лютого частково відкориговані — враховано, що надходження радіонуклідів відбувалося з моменту удару, тобто з 14 лютого 2025 р. Спостерігається двогорбий розподіл аерозольних частинок

за аеродинамічними діаметрами: дрібні частинки з розмірами порядку 1 мкм і більш крупні з діаметрами порядку 10–20 мкм.

Варто зазначити, що β -активності паливних частинок з аеродинамічними діаметрами 1; 5 та 20 мкм на сьогодні становлять $2,15 \cdot 10^{-3}$, $8,6 \cdot 10^{-2}$ та 1,73 Бк відповідно. Для повітряних фільтрів спостерігається співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ на рівні 30–70, що дещо

перевищує розрахункове значення ≈ 20 , отримане для поточного стану опроміненого палива на ЧАЕС з урахуванням розпаду ізотопів ^{137}Cs , ^{241}Am та ^{241}Pu , виходячи з даних [5] на момент аварії. Це може бути пояснено, як було показано в роботі [6], наявністю додаткової цезієвої компоненти забруднення, окрім забруднення паливними частинками.

Також зазначимо, що скориговане сумарне значення об'ємної активності ^{137}Cs за ступенями імпактора ($1,36 \text{ Бк/м}^3$) є близьким до активності, зареєстрованої на повітряному фільтрі ФВУ Град-1,8 — $1,8 \text{ Бк/м}^3$. Незначна розбіжність може бути зумовлена тим, що імпактор відсікає частинки з аеродинамічними діаметрами понад 17 мкм , тоді як на повітряному фільтрі ФВУ присутні поодинокі частинки діаметром $30\div 40 \text{ мкм}$.

Висновки

Атака БПЛА 14 лютого 2025 р. спричинила тимчасове, але помітне підвищення рівнів ^{137}Cs та інших нуклідів у повітрі під Аркою НБК. Оскільки після вибуху БПЛА не було зареєстровано пошкоджень об'єктів, що містили б паливні матеріали чи інші радіоактивні речовини, можна вважати, що сплеск активності під укриттям НБК відбувся внаслідок вторинної ресуспензії аерозольних частинок із поверхонь усередині об'єктів «Арка» та «Укриття». Варіант із викидом паливних частинок під час тління герметизуючої оболонки виглядає малоімовірним, оскільки, по-перше, малоімовірним є накопичення паливних частинок на цій оболонці, по-друге, ще більш неймовірним виглядає вивільнення паливних частинок у процесі тління.

Список використаної літератури

1. Російський ударний дрон із фугасною бойовою частиною влучив вночі 14 лютого в укриття над зруйнованим 4-м енергоблоком Чорнобильської атомної станції // Укрінформ : офіційний веб-сайт. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3959875-rosijskij-dron-vluciv-vnoci-v-ukritta-nad-cetvertim-energoblokom-caes-zelenskij.html>.
2. Рятувальники ліквідували тління після удару російського дрона по саркофагу Чорнобильської АЕС // Район.in.ua. – Режим доступу: <https://rayon.in.ua/news/788470-ryatuvalniki-likvidovali-tlinnya-pislya-udaru-rosiyskogo-drone-po-sarkofagu-chornobilskoj-aes>.
3. Шинкаренко В. К. Методичні рекомендації до визначення бета-активності «гарячих» часток та розподілу

їх за активностями. Метод авторадіографії забруднених поверхонь / В. К. Шинкаренко. – Київ : Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, 2021. – 43 с.

4. До сплеску активності ^{137}Cs в повітрі під об'єктом «Арка» 17 жовтня 2019 р. / В. К. Шинкаренко, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, П. В. Сабенін // Ядерна енергетика та довкілля. – 2021. – № 2 (21). – С. 107–115.
5. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС: краткий справочник / С. Н. Бегичев, А. А. Боровой, Е. В. Бурлаков [и др.]. – Москва, 1990. – 22 с. – (Препринт / ИАЭ; 5268/3).
6. Гаргер Е. К. Оценка степени растворения радиоактивных аэрозольных частиц из объекта «Укрытие» / Е. К. Гаргер, А. А. Одинцов, В. К. Шинкаренко // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2009. – Вип. 12. – С. 125–136.

V. K. Shynkarenko, M. M. Talerko, A. M. Novikov,
V. O. Krasnov, V. O. Kashpur, O. A. Svyryd,
V. V. Augustov

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the
National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Lysohirska st.,
Kyiv, 03028, Ukraine*

Radioactive Aerosols under the Cover of the New Safe Confinement after the Strike by an Unmanned Aerial Vehicle on February 14, 2025

On February 14, 2025, at 1:54 a.m., a Russian combat UAV “Geran-2” struck the New Safe Confinement (NSC) — the protective structure built over the destroyed Unit 4 of the Chornobyl NPP. The explosion damaged both layers of the NSC cladding and initiated a fire, followed by prolonged smoldering of the rubber filler layer. Although no fuel-containing objects were directly impacted, air monitoring under the NSC registered a notable increase in radionuclide activity. This paper presents the results of aerosol sampling using stationary filter-ventilation units (FVUs) and an impactor system. Analyses revealed elevated airborne ^{137}Cs concentrations and the presence of radioactive aerosol particles, primarily with aerodynamic diameters under $40 \text{ }\mu\text{m}$. Autoradiographic and spectrometric studies confirmed low-activity hot particles consistent with irradiated nuclear fuel, as indicated by typical $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ ratios of 30–70. However, due to the lack of confirmed damage to radioactive material storage or fuel debris, the observed activity spike is most likely attributed to secondary resuspension of pre-existing

contamination on surfaces within the NSC and Shelter structures, rather than new emissions. These findings underline the vulnerability of the NSC to external impacts and emphasize the need to enhance radiological monitoring strategies under conditions of military threat.

Keywords: Radioaerosols, Chornobyl zone, New Safe Confinement, ^{137}Cs , ^{241}Am , resuspension, monitoring, impactor, autoradiography, hot particle.

References

1. [A Russian strike drone with a high-explosive warhead hit a shelter above the destroyed 4th power unit of the Chornobyl nuclear power plant on the night of February 14]. Available at: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3959875-rosijskij-dron-vluciv-vnoci-v-ukritta-nad-cetvertim-energoblokom-caes-zelenskij.html> (in Ukr.)
2. [Rescuers eliminate smoldering after Russian drone hits Chornobyl nuclear power plant sarcophagus]. Available at: <https://rayon.in.ua/news/788470-ryatuvalniki-likvidu-vali-tlinnya-pislya-udaru-rosiyskogo-drona-po-sarkofagu-chornobilskoi-aes> (in Ukr.)
3. Shynkarenko V. K. (2021). *Metodychni rekomendacii do vyznachennia beta-aktyvnosti "gharjachykh" chastok ta rozpodilu iikh za aktyvnostiamy. Metod avtoradioghrafii zabrudnennykh poverkhon.* [Methodical recommendations for determination of beta-activity of "hot" particles and their distribution by activities. Method of autoradiography of contaminated surfaces]. Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 43 p. (in Ukr.)
4. Shynkarenko V. K., Kashpur V. A., Skoryak G. G., Sabenin P. V. (2021). [To a burst of ^{137}Cs activity in the air under the "Arch" object on October 17, 2019]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 21, no. 2, pp. 107–115. (in Ukr.)
5. Beghychev S. N., Borovoi A. A., Burlakov E. V. [et al.] (1990). [ChNPP Unit 4 Reactor Fuel: (Brief Guide)]. Moscow, 22 p. Preprint IAE; 5268/3. (in Rus.)
6. Garger E. K., Odintsov A. A., Shynkarenko V. K. (2009). [Estimation of the degree of dissolution radioactive aerosols particles from the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 12, pp. 125–136. (in Rus.)

Надійшла / Received 09.06.2025

Рекомендована до друку / Accepted 03.07.2025