

**ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕМАТИЧНИХ МАШИН І СИСТЕМ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ПАНТІН МАКСИМ АНДРІЙОВИЧ

УДК 004.023:621.039.76

**ДИСЕРТАЦІЯ
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ РАДІАЦІЙНОГО
ЗАБРУДНЕННЯ ЧАЕС НА ОСНОВІ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО
ЗОНДУВАННЯ**

Спеціальність 122 — «Комп'ютерні науки»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів має посилання на відповідне джерело



М. А. Пантін

Науковий керівник Савельєв Максим Володимирович, кандидат технічних наук

Київ — 2026

АНОТАЦІЯ

Пантін М. А. Інформаційна технологія оцінювання радіаційного забруднення ЧАЕС на основі даних дистанційного зондування. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 — «Комп'ютерні науки» (12 — «Інформаційні технології»). — Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, Київ, 2026.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання в галузі комп'ютерних наук — розроблення інформаційної технології оцінювання радіаційного забруднення складних об'єктів на основі даних дистанційного зондування з використанням вдосконаленого еволюційного алгоритму. Потребу в такій технології зумовлено практикою обстеження об'єкта «Укриття» (ОУ) Чорнобильської АЕС (ЧАЕС): проведення вимірювань відповідно до стандартних методик Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) тут є недоцільним або нездійсненним з міркувань безпеки, мережа спостережень лишається нерегулярною та неповною, а кількість вимірювань на кілька порядків менша за кількість елементів поверхні, для яких потрібно відновити розподіл активності. Запропонована технологія дає змогу будувати цифрові карти радіаційного забруднення за неповними даними, зібраними на нерегулярній мережі спостережень.

Як вхідні дані використано результати вимірювань потужності еквівалентної дози (ПЕД), отримані під час введення в експлуатацію Нового безпечного конфайнменту (НБК) — на етапі, коли детектор, встановлений на системі основних кранів (СОК), реєстрував гамма-фон безпосередньо над старим саркофагом. На базі цих вимірювань побудовано модель реконструкції радіаційного поля, у якій зовнішню оболонку ОУ представлено як сукупність ізотропних точкових джерел із кроком 1 м, а задачу оцінювання сформульовано як пошук розв'язків невизначеної системи лінійних рівнянь із фізичними

обмеженнями. Для розв'язання цієї оберненої задачі запропоновано метод на основі вдосконаленого еволюційного алгоритму, початкову популяцію якого сформовано з урахуванням фізичного закону зменшення інтенсивності випромінювання залежно від відстані до джерела.

Отримані розрахункові значення верифіковано за незалежними контрольними дозиметричними вимірюваннями, виконаними фахівцями Інституту проблем безпеки АЕС НАН України. Запропонований метод на основі вдосконаленого еволюційного алгоритму з ініціалізацією початкової популяції на основі фізичних законів показав найкращі результати як порівняно з класичним методом інтерполяції, так і серед інших методів ініціалізації: середня абсолютна похибка (САП) = 0,173, середньоквадратична похибка (СКП) = 0,237, частка грубих помилок — 6,6 % проти 24,2 %. Це підтверджує застосовність запропонованої технології для оцінювання радіаційного стану складних об'єктів за неповними даними — зокрема для планування демонтажу нестабільних конструкцій, оптимізації маршрутів робототехнічних систем у межах НБК і зменшення дозових навантажень на персонал. Отриманий досвід можна поширити на інші ядерні об'єкти на етапі зняття з експлуатації, у межах концепції «розумного виведення з експлуатації».

Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності побудови цифрових карт радіаційного забруднення складних об'єктів в умовах неповних даних та нерегулярних спостережень, коли використання поширених методів є обмеженим або недоцільним з міркувань безпеки чи через обмеження практичної реалізації, шляхом розроблення відповідної інформаційної технології на основі даних дистанційного зондування з використанням еволюційного алгоритму.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого оцінювання радіаційного забруднення територій та ядерно небезпечних об'єктів, що виводяться з експлуатації, на основі даних дистанційного зондування (радіаційного моніторингу).

Предметом дослідження є методи побудови та функціонування інформаційної технології оцінювання радіаційного забруднення за неповними даними.

У результаті проведеного дослідження отримано такі наукові результати:

1. Уперше запропоновано інформаційну технологію оцінювання радіаційного забруднення складних об'єктів на основі даних дистанційного зондування з використанням вдосконаленого еволюційного алгоритму, що полягає у формалізації задачі у вигляді невизначеної системи лінійних рівнянь із фізичними обмеженнями. На відміну від існуючих технологій і методів, що базуються переважно на методах просторової інтерполяції за умови регулярної мережі спостережень, запропонована технологія дає змогу оцінювати радіаційне забруднення в умовах неповних даних на нерегулярній мережі спостережень.

2. Уперше запропоновано метод формування початкової популяції еволюційного алгоритму для побудови цифрових карт радіаційного забруднення, який полягає у використанні апріорної інформації про фізичний закон зменшення інтенсивності іонізуючого випромінювання залежно від відстані від точки вимірювання до джерела випромінювання. На відміну від типової випадкової ініціалізації, такий метод забезпечує спрямованість пошуку в області фізично обґрунтованих розв'язків, що дає змогу отримати краще початкове наближення та підвищити підсумкову якість апроксимації.

3. Удосконалено методологію використання статистичних методів оброблення даних радіаційного контролю, що полягає у застосуванні регресійного аналізу вимірювань для врахування часової динаміки радіаційного поля. На відміну від відомих рішень, запропонована методологія дає змогу інтегрувати архівні дані в процес оцінювання без проведення додаткових дозиметричних обстежень, зменшуючи розмірність простору пошуку за рахунок часткової фіксації змінних.

4. Набув подальшого розвитку метод еволюційного пошуку розв'язків невизначених систем лінійних рівнянь з обмеженнями на абсолютні значення змінних шляхом адаптації операторів відбору та мутації з урахуванням специфіки

радіаційних вимірювань. На відміну від класичних еволюційних схем, удосконалений метод забезпечує підвищення стійкості рішень в умовах високого рівня шуму та неповноти даних.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан проблеми застосування цифрових технологій для виявлення та локалізації іонізуючого випромінювання, а також для подання його просторового розподілу на цифрових картах. Розглянуто існуючі системи підтримки прийняття рішень у сфері радіаційної безпеки, визначено їх функціональні можливості та обмеження щодо оброблення неповних даних. Розглянуто еволюцію підходів до радіаційного моніторингу — від класичних дозиметричних методів до інтегрованих систем, що поєднують робототехніку, безпілотні платформи, сенсорне злиття даних та алгоритми інтелектуального оброблення інформації. Особливу увагу приділено сучасним технологіям тривимірного цифрового картографування радіаційних полів, зокрема підходам Scene Data Fusion (SDF) та Projective Linear Reconstruction (PLR), які дають змогу відновлювати просторову структуру поля випромінювання за обмеженої кількості вимірювань. Проаналізовано узагальнений підхід до цифрового радіаційного картографування відповідно до рекомендацій МАГАТЕ, визначено його структуру та обмеження. Окремо розглянуто специфіку об'єкта «Укриття» ЧАЕС, де високий рівень радіації, складна геометрія та обмежені можливості розгортання сенсорних систем унеможливають проведення повномасштабних прямих вимірювань. Обґрунтовано доцільність застосування інформаційних технологій для розв'язання задачі реконструкції просторового розподілу потужності дози в умовах неповних даних.

У другому розділі розроблено методичні та алгоритмічні засади реконструкції просторового розподілу гамма-випромінювання об'єкта «Укриття» на основі еволюційних обчислювальних методів. Запропоновано спрощену геометричну 3D-модель ОУ, у якій складну внутрішню структуру об'єкта замінено сукупністю ізотропних точкових гамма-джерел, розміщених на зовнішній оболонці із кроком 1 м. На основі закону обернених квадратів відстані сформовано модель вимірюваного сигналу та подано задачу у вигляді

невизначеної системи лінійних рівнянь із фізичними обмеженнями. Запропоновано еволюційну схему з функцією пристосованості, визначеною через відстань між векторами реальних і обчислених вимірювань. Розроблено проблемно-орієнтовані методи формування початкової популяції, зокрема ініціалізацію з урахуванням фізичного закону зменшення інтенсивності випромінювання з відстанню та проєкцію інтерпольованих вимірювань на площину джерел. Показано можливість використання історичних вимірювань як фіксованих змінних для зменшення розмірності задачі з урахуванням радіоактивного розпаду.

У третьому розділі на основі запропонованих методів розроблено інформаційну технологію цифрового радіаційного картографування, що охоплює повний цикл оброблення — від приймання дозиметричних вимірювань до формування інтерактивної цифрової карти радіаційного забруднення — і забезпечує прискорення процедур оцінювання радіаційної обстановки та зменшення похибок реконструкції просторового розподілу ПЕД. Технологію подано у вигляді багат шарової моделі, що фіксує склад процесів оброблення інформації та послідовність перетворення даних. Функціональну структуру формалізовано за нотацією IDEF0, архітектуру описано за допомогою UML-діаграм. Запропоновано тришарову архітектуру інформаційної технології, що включає: вебрівень (Nginx, Unicorn, Django), який забезпечує приймання запитів і відображення результатів; рівень обчислювального модуля (RabbitMQ + Python), що виконує ресурсомісткі розрахунки асинхронно, не блокуючи інтерфейс; рівень сховища (PostgreSQL, файлова система), який зберігає метадані завдань і результати реконструкції.

У четвертому розділі наведено результати експериментальної верифікації запропонованих рішень. Сформовано набір первинних даних про розподіл ПЕД у площині руху СОК над ОУ. За 7 000 ітерацій алгоритм досяг середньої абсолютної відсоткової похибки (САВП) близько 13 %, що відповідає рівню власної похибки дозиметричних вимірювань (близько 17 %). Проведено порівняльний аналіз класичного методу інтерполяції та еволюційного алгоритму з

різними методами ініціалізації початкової популяції — випадковою, інтерполяційною та з урахуванням фізичних законів — на незалежній вибірці контрольних точок вимірювань. Найкращі результати за інтегральними метриками показала ініціалізація з урахуванням фізичних законів, яка перевершила і класичний метод, і решту методів ініціалізації. Окреслено перспективи інтеграції алгоритму з робототехнічними системами радіаційної розвідки.

У висновках узагальнено основні результати дослідження, що підтверджують досягнення поставленої мети та розв'язання всіх визначених завдань.

Практичне значення роботи полягає у застосуванні запропонованої інформаційної технології для побудови цифрових карт радіаційного забруднення покрівлі об'єкта «Укриття», що дає змогу знижувати невизначеність під час планування демонтажу нестабільних конструкцій, а також оптимізувати маршрути та час перебування робототехнічних систем і персоналу в зонах підвищеної радіації. Розроблена інформаційна технологія може слугувати основою системи підтримки прийняття рішень у сфері радіаційної безпеки або бути інтегрована до існуючої системи для інформаційного забезпечення фахівців, які планують роботи в зонах обмеженого доступу.

Дисертацію виконано в Інституті проблем математичних машин і систем Національної академії наук України.

Ключові слова: еволюційний алгоритм, система лінійних алгебраїчних рівнянь, математичне моделювання, обернена задача, літальний апарат, інтеграція даних, реконструкція гамма-поля, зона відчуження ЧАЕС, радіаційний моніторинг, радіаційна безпека, об'єкт «Укриття», Новий безпечний конфайнмент, Чорнобильська АЕС, об'єкт критичної інфраструктури, системи підтримки прийняття рішень.

ABSTRACT

Pantin M. A. Information Technology for Assessing Radiation Contamination of the Chornobyl NPP Based on Remote Sensing Data. — Qualifying scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 122 — “Computer Science” (12 — “Information Technologies”). — Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

This dissertation addresses a topical scientific problem in the field of computer science, namely the development of information technology for assessing radiation contamination of complex objects based on remote sensing data using an enhanced evolutionary algorithm. The need for such technology arises from the practice of surveying the Shelter Object (SO) of the Chornobyl Nuclear Power Plant (Chornobyl NPP): measurements in accordance with the standard methodologies of the International Atomic Energy Agency (IAEA) are impractical or infeasible on safety grounds, the observation network remains irregular and incomplete, and the number of measurements is several orders of magnitude smaller than the number of surface elements for which the distribution of activity needs to be reconstructed. The proposed technology makes it possible to construct digital radiation contamination maps from incomplete data collected over an irregular observation network.

The input data comprised equivalent dose rate (EDR) measurements obtained during the commissioning of the New Safe Confinement (NSC), at the stage when a detector installed on the Main Cranes System (MCS) recorded the gamma background directly above the old sarcophagus. Based on these measurements, a radiation-field reconstruction model was developed in which the outer shell of the SO is represented as a set of isotropic point sources with a spacing of 1 m, while the estimation problem is formulated as the search for solutions to an underdetermined system of linear equations subject to physical constraints. To solve this inverse problem, a method based on an

enhanced evolutionary algorithm was proposed, with the initial population generated taking into account the physical law governing the decrease in radiation intensity with distance from the source.

The calculated values were verified against independent control dosimetric measurements performed by specialists of the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine. The proposed method based on the enhanced evolutionary algorithm with physics-based initial population initialisation demonstrated the best results both in comparison with the classical interpolation method and among the other initialisation methods: mean absolute error (MAE) = 0.173, root mean square error (RMSE) = 0.237, and gross-error rate = 6.6% compared with 24.2%. These results confirm the applicability of the proposed technology for assessing the radiation state of complex objects from incomplete data, in particular for planning the dismantling of unstable structures, optimising the routes of robotic systems within the NSC, and reducing radiation doses to personnel. The experience gained can be extended to other nuclear facilities undergoing decommissioning within the concept of “smart decommissioning”.

The aim of the dissertation research is to improve the efficiency of constructing digital radiation contamination maps of complex objects under conditions of incomplete data and irregular observations, where the use of commonly applied methods is limited or impractical for safety reasons or due to practical implementation constraints, through the development of appropriate information technology based on remote sensing data using an evolutionary algorithm.

The object of the research is the processes of automated assessing radiation contamination of territories and nuclear-hazardous facilities undergoing decommissioning based on remote sensing data (radiation monitoring).

The subject of the research is the methods for constructing and operating the information technology for radiation contamination assessment from incomplete data.

The following scientific results were obtained:

1. For the first time, information technology for assessing radiation contamination of complex objects based on remote sensing data using an enhanced

evolutionary algorithm has been proposed. The technology consists in formulating the problem as an underdetermined system of linear equations subject to physical constraints. Unlike existing technologies and methods, which are predominantly based on spatial interpolation methods under conditions of a regular observation network, the proposed technology makes it possible to assess radiation contamination from incomplete data collected over an irregular observation network.

2. For the first time, a method for generating the initial population of an evolutionary algorithm for constructing digital radiation contamination maps has been proposed. The method uses a priori information about the physical law governing the decrease in the intensity of ionising radiation as a function of the distance from the measurement point to the radiation source. Unlike conventional random initialisation, this method directs the search towards a region of physically plausible solutions, thereby providing a better initial approximation and improving the final quality of the approximation.

3. The methodology for applying statistical methods to the processing of radiation monitoring data has been improved through the use of regression analysis of measurements to account for the temporal dynamics of the radiation field. Unlike existing solutions, the proposed methodology makes it possible to integrate archival data into the assessment process without additional dosimetric surveys, reducing the dimensionality of the search space through partial fixing of variables.

4. The method of evolutionary search for solutions to underdetermined systems of linear equations with constraints on the absolute values of variables has been further developed by adapting the selection and mutation operators to the specific characteristics of radiation measurements. Unlike classical evolutionary schemes, the enhanced method provides greater robustness of the solutions under high noise levels and incomplete data.

Chapter 1 analyses the current state of the problem of applying digital technologies for the detection and localisation of ionising radiation, as well as for representing its spatial distribution on digital maps. Existing decision-support systems in the field of radiation safety are considered, and their functionality and limitations in

processing incomplete data are identified. The evolution of approaches to radiation monitoring is examined, from classical dosimetric methods to integrated systems combining robotics, unmanned platforms, sensor data fusion and intelligent information-processing algorithms. Particular attention is paid to modern technologies for three-dimensional digital mapping of radiation fields, including the Scene Data Fusion (SDF) and Projective Linear Reconstruction (PLR) approaches, which make it possible to reconstruct the spatial structure of a radiation field from a limited number of measurements. The generalised approach to digital radiation mapping in accordance with IAEA recommendations is analysed, and its structure and limitations are identified. The specific characteristics of the Chernobyl NPP Shelter Object are considered separately: high radiation levels, complex geometry and limited opportunities for deploying sensor systems make full-scale direct measurements impossible. The applicability of information technology to the reconstruction of the spatial distribution of dose rate under conditions of incomplete data is substantiated.

Chapter 2 develops the methodological and algorithmic foundations for reconstructing the spatial distribution of gamma radiation from the Shelter Object using evolutionary computational methods. A simplified 3D geometric model of the SO is proposed, in which the complex internal structure of the object is replaced by a set of isotropic point gamma sources located on the outer shell at 1 m spacing. A model of the measured signal is developed based on the inverse-square law of distance, and the problem is formulated as an underdetermined system of linear equations subject to physical constraints. An evolutionary scheme is proposed with a fitness function defined by the distance between the vectors of actual and calculated measurements. Problem-oriented methods for generating the initial population are developed, including initialisation based on the physical law governing the decrease in radiation intensity with distance and projection of interpolated measurements onto the source plane. The possibility of using historical measurements as fixed variables to reduce the dimensionality of the problem, taking radioactive decay into account, is demonstrated.

Chapter 3 develops information technology for digital radiation mapping based on the proposed methods. The technology covers the complete processing cycle, from

receiving dosimetric measurements to generating an interactive digital radiation contamination map, and provides accelerated radiation-state assessment procedures and reduced errors in reconstructing the spatial distribution of EDR. The technology is presented as a multilayer model describing the composition of information-processing operations and the sequence of data transformations. Its functional structure is formalised using the IDEF0 notation, while its architecture is described using UML diagrams. A three-tier architecture of the information technology is proposed, comprising a web tier (Nginx, Gunicorn, Django), which handles request processing and result display; a computational module tier (RabbitMQ + Python), which performs resource-intensive calculations asynchronously without blocking the interface; and a storage tier (PostgreSQL, file system), which stores task metadata and reconstruction results.

Chapter 4 presents the results of experimental verification of the proposed solutions. A set of primary data on the EDR distribution in the MCS movement plane above the SO was compiled. After 7,000 iterations, the algorithm achieved a mean absolute percentage error (MAPE) of approximately 13%, corresponding to the intrinsic error level of the dosimetric measurements (approximately 17%). A comparative analysis of the classical interpolation method and the evolutionary algorithm with different initial population initialisation methods — random, interpolation-based and physics-based — was performed using an independent sample of control measurement points. The physics-based initialisation produced the best results according to the integral metrics, outperforming both the classical method and the other initialisation methods. The prospects for integrating the algorithm with robotic radiation-reconnaissance systems are outlined.

The conclusions summarise the main results of the research, confirming that the stated aim has been achieved and all defined objectives have been addressed.

The practical significance of the work lies in the application of the proposed information technology to construct digital radiation contamination maps of the roof of the Shelter Object, thereby reducing uncertainty in planning the dismantling of unstable structures and optimising the routes and dwell times of robotic systems and personnel in

areas of elevated radiation. The developed information technology can serve as the basis for a decision-support system in the field of radiation safety or be integrated into an existing system to provide information support for specialists planning operations in restricted-access areas.

The dissertation was carried out at the Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Keywords: evolutionary algorithm, system of linear algebraic equations, mathematical modelling, inverse problem, aerial vehicle, data integration, gamma-field reconstruction, Chornobyl Exclusion Zone, radiation monitoring, radiation safety, Shelter Object, New Safe Confinement, Chornobyl NPP, critical infrastructure object, decision support systems.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Saveliev M. V., Pantin M. A., Skiter I. S. et al. Implementation of Novel Evolutional Algorithm for 3-Dimensional Radiation Mapping and Gamma-Field Reconstruction within the Chornobyl Sarcophagus. *MDPI Algorithms*. 2023. Vol. 16, Issue 4. Article 204. DOI:10.3390/a16040204. Базу: SCOPUS Q2, CrossRef, Google Scholar.
2. Saveliev M., Krasnov V., Levchenko A., Novikov A., Evstigneev A., Pantin M. Measuring the equivalent dose rate over the Shelter object after completion of the New Safe Confinement. *Nuclear power and the environment*. 2020. Vol. 4, Issue 19. P. 50–56. DOI:10.31717/2311-8253.20.4.6. Базу: CrossRef, Google Scholar.
3. Михайлов О. В., Савельєв М. В., Пантін М. А. Результати контролю потужності еквівалентної дози γ -випромінювання у приміщеннях об'єкта “Укриття” ЧАЕС. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2024. Вип. 2, № 30. С. 51–60. DOI:10.31717/2311-8253.24.2.6. Базу: CrossRef, Google Scholar.
4. Saveliev M. V., Godun R. L., Pantin M. A. et al. The nuclear safety monitoring system for fuel-containing materials located in destroyed Unit No. 4 of the Chornobyl NPP and proposals for its modernization. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2022. Vol. 23, Issue 3. P. 172–181. DOI:10.15407/jnpae2022.03.172. Базу: SCOPUS Q4, CrossRef, Google Scholar.
5. Saveliev M., Shtefan V., Proskurin O., Pantin M., Martin P. G., Grechaninov V., Havrylko Y. Multi-robot radiation reconnaissance in the Chornobyl NPP Exclusion Zone. *Nuclear and Radiation Safety*. 2024. Vol. 4, Issue 104. P. 41–49. DOI:10.32918/nrs.2024.4(104).05. Базу: SCOPUS Q3, CrossRef, Google Scholar.
6. Saveliev M., Shtefan V., Scott T. B., Grechaninov V., Mykhailov O., Doroshenko A., Pantin M. UAV-Based Survey of the Equivalent Dose Rate Distribution Above the Outer Cladding of the Chornobyl New Safe Confinement

Following Damage. *Drones*. 2026. Vol. 10, Issue 8. Article 562. DOI:10.3390/drones10080562. Базу: SCOPUS Q1, CrossRef, Google Scholar.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Савельев М. В., Краснов В. А., Евстигнеев А. Ю., Пантин М.А. Измерение мощности экспозиционной дозы над объектом “Укрытие” после сдачи Нового Безопасного Конфаймента. *Матеріали V Міжнародної конф. “Проблеми зняття з експлуатації об’єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища” INUDECO 20*. (27.04.2020). Славутич, Україна, 2020. Також доступний за посиланням: <https://inudeco.pro/> (збірник INUDECO 2020) С. 194–196.

8. Истомин Н., Пантин М., Савельев М. Пример импортозамещения в автоматизированном радиационном контроле. *Матеріали IV-ої Міжнародної конференції “Проблеми зняття з експлуатації об’єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища” INUDECO 19*. (24.04.2019). Славутич, Україна: Славутиська міська рада, 2019. С. 102–106.

9. Khomenko D., Pantin M., Saveliev M. et al. Autonomous quadruped robotic systems for radiation mapping. *XVIII International Scientific-Practical Conference, 13–15 November 2023 MODS 2023*. (13.11.2023). Chernihiv, Ukraine, 2023. P. 10–12.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ЦИФРОВОГО РАДІАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ.....	30
1.1 Виявлення, локалізація джерел випромінювання та цифрове радіаційне картографування.....	30
1.2 Тривимірний аналіз радіаційного поля.....	33
1.3 Узагальнений підхід до радіаційного картографування та його обмеження....	36
1.3.1 Загальна структура підходу відповідно до рекомендацій МАГАТЕ.....	37
1.3.2 Обмеження узагальненого підходу до радіаційного картографування.....	38
1.4 Застосування технологій у контексті Чорнобильської АЕС.....	39
1.5 Інформаційні технології та системи підтримки прийняття рішень в атомній енергетиці.....	41
1.5.1 Основні напрями застосування та отримувані ефекти.....	42
1.5.2 Огляд існуючих світових систем підтримки прийняття рішень.....	45
1.5.3 Стан розроблення та впровадження інформаційних технологій радіаційної безпеки в Україні.....	47
1.5.4 Рекомендації міжнародних організацій та пропозиції виробників.....	49
1.5.5 Узагальнення результатів аналізу.....	50
1.6 Постановка задачі дослідження.....	51
1.7 Висновки до розділу 1.....	53
РОЗДІЛ 2 ЕВОЛЮЦІЙНИЙ АЛГОРИТМ ОЦІНЮВАННЯ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІД ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ».....	55
2.1 Модель гамма-випромінювання від об'єкта «Укриття».....	55
2.2 Еволюційні алгоритми як метод розв'язання задач.....	59
2.3 Опис еволюційного алгоритму реконструкції гамма-випромінювання від об'єкта «Укриття».....	62

	17
2.4 Методи формування початкової популяції	65
2.4.1 Випадкова ініціалізація	66
2.4.2 Ініціалізація на основі фізичних законів	67
2.4.3 Початкова популяція як проєкція інтерполяції вимірювань	70
2.5 Можливість використання історичних даних	72
2.6 Висновки до розділу 2	73
РОЗДІЛ 3 ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ РАДІАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ЗА НЕПОВНИМИ ДАНИМИ НА ОСНОВІ ЕВОЛЮЦІЙНОГО АЛГОРИТМУ	75
3.1 Модель інформаційної технології	76
3.2 Функціональна модель інформаційної технології	79
3.2.1 Метод функціонального моделювання IDEF0	79
3.2.2 Контекстна діаграма	80
3.2.3 Діаграма декомпозиції	82
3.3 Детальне проєктування програмних компонентів	84
3.3.1 Моделювання архітектури обчислювальних систем	85
3.3.2 Діаграма прецедентів	87
3.3.3 Діаграма послідовностей	90
3.3.4 Діаграма класів	93
3.3.5 Діаграма розгортання	109
3.4 Обґрунтування вибору технологічного стеку	112
3.5 Висновки до розділу 3	118
РОЗДІЛ 4 ВЕРИФІКАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ НА РЕЗУЛЬТАТАХ ГАММА-ВИМІРЮВАНЬ НА ПОКРІВЛІ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»	121
4.1 Отримання первинних даних для дослідження	121
4.2 Реконструкція радіаційного фону на покрівлі ОУ згідно з ініціалізацією початкової популяції на основі фізичних законів	131
4.3 Порівняння з класичним методом та аналіз ефективності еволюційного алгоритму	136

	18
4.4 Перспективи подальшого розвитку	145
4.5 Висновки до розділу 4	147
ВИСНОВКИ.....	150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	153
ДОДАТКИ	170
Додаток А Акти та довідки впровадження результатів дисертаційного дослідження.....	171
Додаток Б Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	173
Додаток В Запропонована схема еволюційного алгоритму мовою візуального програмування DRAKON	175
Додаток Г Схеми функціонального моделювання інформаційної технології.....	176
Додаток Д Програмний код класу Point	181
Додаток Е Програмний код класу Sensor	182
Додаток Ж Програмний код класу Surface.....	183
Додаток И Результати реконструкції потужності еквівалентної дози в 91 контрольній точці різними методами	184

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕС — атомна електростанція.

БпЛА — безпілотний літальний апарат.

ІПБ АЕС — Інститут проблем безпеки АЕС.

ІПММС — Інститут проблем математичних машин і систем.

МАГАТЕ — Міжнародне агентство з атомної енергії.

НАН — Національна академія наук.

НБК — Новий безпечний конфайнмент.

НРК — наземний робототехнічний комплекс.

ОУ — об'єкт «Укриття».

ПВМ — паливовмісні матеріали.

ПЕД — потужність еквівалентної дози.

ПЗ — програмне забезпечення.

РАВ — радіоактивні відходи.

РВПК — реактор великої потужності каналний.

САВП — середня абсолютна відсоткова похибка.

САП — середня абсолютна похибка.

СЗ — систематичне зміщення.

СКП — середньоквадратична похибка.

СОК — система основних кранів.

СППР — система підтримки прийняття рішень.

ЧАЕС — Чорнобильська атомна електростанція.

API — Application Programming Interface.

HTML — HyperText Markup Language.

ICAM — Integrated Computer-Aided Manufacturing.

IDEF0 — ICAM Definition for Function Modeling.

IoT — Internet of Things.

JSON — JavaScript Object Notation.

LAMP — Localization and Mapping Platform.

NTP — Network Time Protocol.

ORM — Object-Relational Mapping.

PLR — Projective Linear Reconstruction.

QA/QC — Quality Assurance/Quality Control.

REST — Representational State Transfer.

SDF — Scene Data Fusion.

SIP — Shelter Implementation Plan.

SQL — Structured Query Language.

UGV — Unmanned Ground Vehicle.

UML — Unified Modeling Language.

WSGI — Web Server Gateway Interface.

ВСТУП

Актуальність теми

Забезпечення безпеки функціонування об'єктів критичної інфраструктури в умовах повномасштабної збройної агресії проти України належить до першочергових завдань держави. Серед таких об'єктів окреме місце посідають ядерні установки та об'єкти поводження з радіоактивними відходами: порушення їх штатного режиму спричиняє наслідки, що виходять далеко за межі промислового майданчика.

Найбільшим за масштабом радіаційної небезпеки об'єктом цього класу в Україні лишається об'єкт «Укриття» (ОУ), споруджений 1986 року над зруйнованим четвертим енергоблоком Чорнобильської АЕС (ЧАЕС). Станція втратила енергетичне значення після остаточної зупинки 2000 року, проте зосереджені під ОУ паливовмісні матеріали (ПВМ) та радіоактивні відходи (РАВ) утримують майданчик у статусі джерела радіаційної небезпеки на десятиліття вперед [1]. У 2020 році над ОУ введено в експлуатацію новий безпечний конфайнмент (НБК) — аروحну споруду з розрахунковим терміном служби щонайменше 100 років[2].

Упродовж останніх десятиліть Україна, як суверенна держава, послідовно вживає заходів, спрямованих на зниження радіаційної небезпеки Чорнобильської зони: обмеження викиду радіоактивних речовин, дезактивацію територій у межах зони відчуження, спорудження сховищ для РАВ, підготовку до вилучення ПВМ [3]. Роботи такого характеру — технічні, технологічні, будівельні — виконуються в умовах підвищених полів іонізуючого випромінювання та обмеженого доступу персоналу, тому кожне рішення щодо їх планування спирається на оцінювання поточної радіаційної обстановки.

Обсяг і складність цих рішень зумовлюють потребу в засобах інформаційної підтримки. Цифрові інформаційні технології дають змогу звести розрізнені дозиметричні вимірювання, дані дистанційного зондування та архівні

спостереження до єдиного подання, придатного для аналізу, і на його основі обґрунтувати послідовність робіт, маршрути переміщення та допустимий час перебування в зоні. Скорочення трудовитрат, прискорення оброблення даних, зменшення дозових навантажень на персонал, зниження похибки оцінювання радіаційної обстановки — саме ці ефекти визначають доцільність упровадження інформаційних технологій у роботах з радіаційно небезпечними об'єктами.

Формою подання обстановки, найпридатнішою для таких завдань, є цифрова карта радіаційного забруднення — просторово прив'язана модель розподілу потужності еквівалентної дози (ПЕД), яка дає змогу оцінити очікуваний рівень опромінення в довільній точці об'єкта, зокрема там, де прямих вимірювань не проводили.

Основне завдання подальших робіт полягає у вилученні ПВМ та РАВ з їх подальшим захороненням у спеціалізованих сховищах — поблизу поверхні або у глибоких геологічних формаціях. Ці процеси мають бути виконані в межах терміну експлуатації НБК, який забезпечує необхідні умови для безпечного проведення відповідних робіт.

Особливу загрозу становить старіння матеріалів всередині ОУ, адже навіть незначне руйнування конструкцій може призвести до осідання уламків саркофага на залишки зруйнованого реактора, що спричинить повторне вивільнення високорадіоактивного пилу та частинок ядерного палива. Подібний сценарій може знову підвищити рівень радіаційного фону на об'єкті до небезпечних значень [4].

Для запобігання цьому необхідно здійснювати постійний моніторинг радіаційного стану, що передбачає створення детальних цифрових карт просторового розподілу гамма-випромінювання.

У контексті сучасних технологій це означає не лише статичне вимірювання потужності дози, але й побудову тривимірних, динамічних моделей радіаційних полів, які змінюються в часі. Такі моделі є критично важливими для планування майбутніх операцій з демонтажу та дезактивації, а також для прогнозування довгострокових ризиків для персоналу й довкілля.

Отже, цифрове радіаційне картографування, а особливо тривимірне, часово-залежне визначення гамма-поля, є ключовим етапом для будь-яких подальших безпечних робіт у межах Нового безпечного конфайнменту. Без точних даних про розподіл радіації неможливо проєктувати або проводити роботи всередині об'єкта, адже від цього залежать як рівні опромінення персоналу, так і працездатність технічних систем.

Практика дозиметричного обстеження об'єкта «Укриття» склалася так, що вимірювання виконуються вибірково — у точках, доступ до яких припустимий з погляду радіаційного захисту, і за траєкторіями, продиктованими технологічними завданнями, а не потребами обстеження. Мережа спостережень є нерегулярною та неповною, а кількість вимірювань на кілька порядків менша за кількість елементів поверхні, для яких потрібно відновити розподіл активності. Класичні методи просторової інтерполяції, орієнтовані на згладжування значень усередині області спостережень, за таких умов не дають задовільного результату, оскільки не враховують ані фізичної природи формування поля, ані геометрії об'єкта, що зумовлює часткове екранування окремих ділянок від детекторів. Це визначає потребу в методах, які відновлюють розподіл джерел, а не згладжують наявні показання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Основний обсяг досліджень виконано в межах планової науково-дослідної роботи Інституту проблем математичних машин і систем НАН України за темою «Сучасні технології створення автоматизованої системи радіаційної розвідки із застосуванням дистанційно керованих засобів з урахуванням стандартів НАТО» цільової науково-технічної програми оборонних досліджень НАН України.

Окремі результати отримано у співпраці з дослідниками Університету Брістоля та Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України під час виконання грантового проєкту НАТО G-5913 «Enhanced radiation detection for nuclear security and incident response».

Мета та завдання дослідження

Підвищення ефективності побудови цифрових карт радіаційного забруднення складних об'єктів в умовах неповних даних та нерегулярних спостережень, коли використання поширених методів є обмеженим або недоцільним з міркувань безпеки чи через обмеження практичної реалізації, шляхом розроблення відповідної інформаційної технології на основі даних дистанційного зондування з використанням еволюційного алгоритму.

Для досягнення мети дослідження було поставлено такі завдання:

1. Провести аналіз сучасних систем підтримки прийняття рішень у сфері радіаційної безпеки та реалізованих у них методів цифрового радіаційного картографування, зокрема підходів, що базуються на просторовій інтерполяції та реконструкції радіаційних полів, і визначити їх обмеження в умовах неповних та нерегулярних вимірювань.
2. На основі моделі радіаційного поля як суперпозиції ізотропних точкових джерел випромінювання формалізувати задачу реконструкції радіаційного забруднення як обернену задачу та обґрунтувати метод її розв'язання.
3. Розробити метод розв'язання сформульованої задачі на основі еволюційного алгоритму, придатний для роботи в умовах неповних даних, зокрема адаптувати оператори відбору та мутації з урахуванням специфіки радіаційних вимірювань.
4. Запропонувати та обґрунтувати метод формування початкової популяції еволюційного алгоритму з використанням апріорної фізичної інформації.
5. Розробити підхід до використання історичних даних радіаційного контролю шляхом їх статистичної актуалізації та інтеграції у процес розв'язання задачі оптимізації.
6. Розробити інформаційну технологію цифрового радіаційного картографування, що реалізує запропоновані методи та забезпечує повний цикл

оброблення — від приймання дозиметричних вимірювань до формування цифрової карти радіаційного забруднення.

7. Провести експериментальну перевірку інформаційної технології на реальних даних радіаційних вимірювань та виконати порівняльний аналіз з класичними методами за кількісними критеріями точності.

Об’єктом дослідження є процеси оцінювання радіаційного забруднення територій та ядерно небезпечних об’єктів, що виводяться з експлуатації, на основі даних дистанційного зондування (радіаційного моніторингу).

Предметом дослідження є методи побудови та функціонування інформаційної технології оцінювання радіаційного забруднення за неповними даними.

Методи дослідження

Дослідження ґрунтується на принципах системного підходу. Для розв’язання поставлених задач використано: системний і порівняльний аналіз — для огляду та оцінювання існуючих систем підтримки прийняття рішень у сфері радіаційної безпеки та реалізованих у них методів цифрового радіаційного картографування; методи теорії обернених (некоректних) задач та регуляризації — для формалізації задачі реконструкції; методи математичного моделювання — для побудови моделі вимірюваного сигналу на основі закону обернених квадратів; еволюційні обчислення — для розв’язання сформульованої невизначеної системи лінійних рівнянь з обмеженнями; регресійний і статистичний аналіз — для актуалізації історичних даних з урахуванням їх часової динаміки; методи функціональної нотації IDEF0 та об’єктно-орієнтованого UML моделювання — для проєктування інформаційної технології; обчислювальний експеримент — для верифікації методу на реальних даних радіаційних вимірювань.

Наукова новизна отриманих результатів

У результаті виконання поставлених завдань одержано результати, що становлять наукову новизну і мають практичну цінність.

Уперше:

Запропоновано інформаційну технологію оцінювання радіаційного забруднення складних об'єктів на основі даних дистанційного зондування з використанням вдосконаленого еволюційного алгоритму, що полягає у формалізації задачі у вигляді невизначеної системи лінійних рівнянь із фізичними обмеженнями. На відміну від існуючих технологій і методів, що базуються переважно на методах просторової інтерполяції за умови регулярної мережі спостережень, запропонована технологія дає змогу оцінювати радіаційне забруднення в умовах неповних даних на нерегулярній мережі спостережень.

Запропоновано метод формування початкової популяції еволюційного алгоритму для побудови цифрових карт радіаційного забруднення, який полягає у використанні апріорної інформації про фізичний закон зменшення інтенсивності іонізуючого випромінювання залежно від відстані від точки вимірювання до джерела випромінювання. На відміну від типової випадкової ініціалізації, такий метод забезпечує спрямованість пошуку в області фізично обґрунтованих розв'язків, що дає змогу отримати краще початкове наближення та підвищити підсумкову якість апроксимації.

Удосконалено:

Методологію використання статистичних методів оброблення даних радіаційного контролю, що полягає у застосуванні регресійного аналізу вимірювань для врахування часової динаміки радіаційного поля. На відміну від відомих рішень, запропонована методологія дає змогу інтегрувати архівні дані в процес оцінювання без проведення додаткових дозиметричних обстежень, зменшуючи розмірність простору пошуку за рахунок часткової фіксації змінних.

Набув подальшого розвитку:

Метод еволюційного пошуку розв'язків невизначених систем лінійних рівнянь з обмеженнями на абсолютні значення змінних шляхом адаптації операторів відбору та мутації з урахуванням специфіки радіаційних вимірювань. На відміну від класичних еволюційних схем, удосконалений метод забезпечує підвищення стійкості рішень в умовах високого рівня шуму та неповноти даних.

Практичне значення отриманих результатів

Розроблено інформаційну технологію, що забезпечує побудову цифрових карт радіаційного забруднення покрівлі об'єкта «Укриття» з просторовою роздільною здатністю до 1 м² та оцінювання поточного рівня гамма-фону, що дає змогу інформаційно забезпечити планування демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта, а також оптимізувати маршрути та час перебування робототехнічних систем і персоналу в зонах підвищеної радіації. Ця інформаційна технологія може слугувати основою системи підтримки прийняття рішень у сфері радіаційної безпеки або бути інтегрована до існуючої системи як окремий функціональний модуль для інформаційного забезпечення фахівців із планування робіт у небезпечних зонах.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить особисто:

У роботі [5] наведено програмні та конструктивні рішення щодо реалізації приладу-аналога вимірювального пристрою гамма-випромінювання Mirion GIM-204, що становить основу контролю потужності еквівалентної дози НБК, результати функціонування якого використано як експериментальну базу для розроблення, налаштування та верифікації еволюційного алгоритму відновлення просторового розподілу еквівалентної дози.

У роботах [6, 7] на основі інтерполяції виміряних значень потужності еквівалентної дози, отриманих під час експерименту на Об'єкті «Укриття», сформовано первинну цифрову картограму розподілу потужності еквівалентної дози, яка стала відправною точкою для подальшого розроблення в дисертації еволюційного алгоритму точнішої реконструкції ПЕД.

У роботі [8] розроблено та експериментально перевірено еволюційний підхід до реконструкції просторового розподілу джерел гамма-випромінювання за неповними даними, результати якого покладено в основу подальшого розвитку методів, представлених у дисертації.

У роботі [9] запропоновано напрями модернізації системи ядерного моніторингу об'єкта «Укриття» (ОУ) — упровадження алгоритмів автоматичної ідентифікації аномалій та прогнозування змін нейтронного потоку. Це підтверджує можливість розширення функціональності існуючих систем моніторингу за рахунок інтелектуальних алгоритмічних підходів, зокрема методу просторової реконструкції радіаційних полів, описаного в цій дисертації.

У статті [10] виконано аналіз історичних даних ПЕД гамма-випромінювання в приміщеннях об'єкта «Укриття» та визначено закономірності їх часової динаміки, що може бути використано для попередньої корекції вхідних даних і врахування зміни радіаційного поля в часі перед застосуванням еволюційного алгоритму, описаного в дисертації.

У роботах [11, 12] показана можливість інтеграції алгоритмічних методів оброблення радіаційних даних із робототехнічними системами наземної та повітряної розвідки, що підтверджує перспективність практичного застосування розробленого в дисертації еволюційного алгоритму в автоматизованих системах радіаційного моніторингу.

У статті [13] здобувачем виконано програмне опрацювання первинного масиву даних безпілотного вимірювання ПЕД гамма-випромінювання над пошкодженою обшивкою НБК (фільтрація за достовірністю позиціонування, перетворення координат, побудова цифрової картограми); результати використано в дисертації як приклад цифрового радіаційного картографування в реальних польових умовах, що ілюструє проблему просторової неповноти даних, на розв'язання якої спрямовано розроблений еволюційний алгоритм відновлення просторового розподілу еквівалентної дози.

Апробація результатів дисертації

Основні результати цієї роботи були апробовані та доповідались на таких конференціях:

— IV Міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища INUDECО 19» (м. Славутич, Україна, 24—26 квітня 2019 р.)

– V Міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об’єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища INUDECО 20» (м. Славутич, Україна, 27—29 квітня 2020 р.)

– VII Міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об’єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища INUDECО 22» (м. Славутич, Україна, 27—28 квітня 2022 р.)

– MODS 2023 XVIII International Scientific-Practical Conference (Chernihiv, Ukraine, November 13—15 2023)

– 1st International Conference on Smart Automation & Robotics for Future Industry (Lviv, Ukraine, April 18—20, 2024)

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 9 наукових працях, серед яких 6 статей: у виданнях, індексованих у Scopus, — Q1 [13], Q2 [8], Q3 [12], Q4 [9] ; у наукових фахових виданнях України категорії «Б» — [7, 10]. Також 3 тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій [5, 6, 11].

Декларація використання засобів штучного інтелекту. У процесі підготовки дисертаційної роботи використовувався інструмент штучного інтелекту Claude (Anthropic), версії лінійки 3 Opus — Opus 5, у період із січня 2025 по серпень 2026. Він застосовувався для редагування і стилістичного вдосконалення тексту, структурування окремих підрозділів, переформулювання окремих фрагментів тексту та перекладу окремих тез і цитат. Жоден із згенерованих фрагментів не використано без змін: усі вони перевірені та відредаговані автором особисто. Наукові положення, висновки та результати дисертації є власним інтелектуальним внеском автора.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 152 сторінки основного тексту, 18 рисунків, 6 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 186 сторінок, список використаних джерел налічує 138 найменувань. Дисертація містить 8 додатків, розміщених на 17 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ЦИФРОВОГО РАДІАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ

1.1 Виявлення, локалізація джерел випромінювання та цифрове радіаційне картографування

Наукові та інженерні принципи, що лежать в основі виявлення і вимірювання іонізуючого випромінювання, а також використання цих технологій для картографування просторових змін гамма- та нейтронних полів, мають тривалу історію розвитку [14]. Протягом десятиліть опубліковано численні технічні роботи, у яких детально описано методи виявлення, калібрування та візуалізації радіаційних даних, а також найкращі практики застосування таких технологій у різних умовах [15–17].

Попри довгу історію, саме останні десятиліття відзначилися значними проривами в галузі виявлення і просторової локалізації джерел випромінювання. Особливо після аварії на японській АЕС «Фукусіма-Даїчі» у березні 2011 року розвинулися технології безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [18–20], наземних робототехнічних комплексів (НРК) [21, 22], а також розподілених систем детектування стаціонарного або мобільного типу [23].

Ці технології дали змогу здійснювати вимірювання у місцях, недоступних для людини, забезпечуючи отримання високоточних даних у режимі реального часу навіть за умов підвищених дозових навантажень.

Особливістю сучасних систем є поєднання класичних методів радіаційного контролю з технологіями робототехніки, дистанційного зондування, інтернету речей (IoT) та штучного інтелекту. Завдяки цьому вдається створювати автономні або напіваавтономні комплекси, які здатні не лише збирати радіаційні дані, а й аналізувати їх безпосередньо на борту, формуючи просторову карту розподілу потужності дози іонізуючого випромінювання у форматі 2D або 3D. Такий підхід

суттєво зменшує потребу у втручанні оператора та знижує ризики для персоналу під час дослідження небезпечних зон.

Навіть через багато років після катастрофи у Фукусімі дослідження у сфері виявлення, локалізації та картографування випромінювання залишаються активними. Прогрес досягається як у створенні нових детекторних матеріалів — новітніх пластиків, стійких до високих доз напівпровідників, подвійних сцинтиляторів, здатних одночасно виявляти гамма- і нейтронне випромінювання [24–27], — так і в розробленні автономних та мініатюризованих систем розгортання [28–30].

Крім того, значна увага приділяється методам об'єднання даних сенсорів (sensor fusion) та візуалізації з переходом від двовимірних до тривимірних моделей розподілу радіації [31–36].

Сучасні методи також активно застосовують машинне навчання та статистичні підходи для фільтрації шумів, відновлення сигналів та прогнозування просторових змін радіаційного поля. Це дає змогу підвищити точність відтворення просторового розподілу потужності дози іонізуючого випромінювання навіть за обмеженої кількості вимірювань. Зокрема, застосування алгоритмів реконструкції на основі баєсівських моделей або стохастичних градієнтних методів дало змогу створювати адаптивні системи, що уточнюють оцінку радіаційної обстановки під час роботи без попереднього калібрування.

Ці дослідження давно вийшли за межі окремих наукових центрів і сформували міждисциплінарну сферу, де поєднуються радіаційна фізика, електроніка, комп'ютерні науки, системна інженерія та прикладна математика. Такий підхід сприяє появі нового покоління вимірювальної техніки, здатної працювати у складних умовах — від зон відчуження і сховищ радіоактивних відходів до ядерних об'єктів, що перебувають на етапі зняття з експлуатації.

Сучасні технології радіаційного моніторингу мають також широкий спектр практичних застосувань:

- у знятті з експлуатації ядерних енергоблоків, де вони дають змогу оцінювати ступінь забруднення перед демонтажем;
- у сфері ядерної безпеки та фізичного захисту, де використовуються для виявлення несанкціонованих джерел випромінювання;
- у системах екологічного моніторингу, які контролюють радіаційний стан територій, прилеглих до об'єктів атомної енергетики;
- у реагуванні на аварійні ситуації, коли необхідно оперативно визначити просторовий розподіл дозових навантажень.

Важливим є те, що методи, розроблені для аварійного реагування, часто набувають нового застосування у мирних галузях — наприклад, у моніторингу промислових підприємств, контролі радіаційної безпеки під час перевезення матеріалів, а також у наукових експериментах, де потрібне точне вимірювання фонові активності середовища. Отже, розвиток систем радіаційного картографування має не лише суто прикладний, а й стратегічний характер, сприяючи формуванню нових стандартів у сфері радіаційної безпеки.

Спільною рисою перелічених методів залишається те, що вони оперують полем вимірних значень: уточнюють, згладжують і доповнюють його, проте не переходять до оцінювання розподілу самих джерел, якими це поле породжується.

Отже, сучасна наука і техніка забезпечують багаторівневий арсенал засобів для виявлення, локалізації та картографування радіаційного поля, який постійно вдосконалюється. Одним із прикладів застосування таких технологій безпосередньо в умовах Чорнобильської зони є обстеження розподілу потужності еквівалентної дози над пошкодженою зовнішньою обшивкою Нового безпечного конфайнмента (НБК) за допомогою апаратно-програмного комплексу на основі БпЛА [13]. Обстеження виконувалося в реальних польових умовах — за наявності зон, закритих для польотів, вітрової турбулентності та поблизу масивних металоконструкцій, — унаслідок чого отримані набори даних мають просторово неповний характер. Ця неповнота є особливо відчутною в умовах Чорнобильського об'єкта «Укриття», де рівень радіації та структурна складність

середовища обмежують можливості безпосереднього обстеження й ускладнюють отримання повного просторового покриття.

Саме ця обставина — неможливість забезпечити повне просторове покриття вимірюваннями — визначає потребу в методах, що відновлюють розподіл джерел за обмеженою вибіркою показань. Наявні підходи до такого відновлення розглянуто далі.

1.2 Тривимірний аналіз радіаційного поля

Одним із найактивніших напрямів сучасних досліджень, що розвивається паралельно з підвищенням обчислювальної потужності та мініатюризацією електронних систем, є тривимірне картографування радіаційного поля — технологія комплексування сценічних даних (Scene Data Fusion, SDF), або «злиття сценічних даних». Цей метод передбачає графічне подання складних геопросторових наборів даних шляхом поєднання радіометричної інформації з контекстними просторовими даними, що дає змогу створювати наочні, інтерактивні 3D-моделі радіаційного середовища [37].

Методику SDF розробили дослідники Берклівської національної лабораторії імені Лоуренса та Каліфорнійського університету в Берклі для застосування у сфері виявлення незаконних джерел випромінювання та аварійного реагування. Її сутність полягає у використанні спеціалізованої платформи LAMP (Localization and Mapping Platform) у поєднанні зі сцинтиляційними гамма-спектрометрами на основі кристалів CsI та гамма-камерою Polaris на базі кристалів CdZnTe. Такі системи застосовують методи сенсорного злиття даних, поєднуючи інформацію від лідарів, оптичних камер і масивів детекторів гамма-випромінювання, що уможливорює створення тривимірних карт радіаційних полів, придатних для інтерпретації операторами без спеціальної підготовки [37, 38].

Перевага підходу SDF полягає в тому, що він забезпечує не лише фіксацію величини дози, а й дає змогу візуалізувати просторову структуру поля у вигляді кольорових або прозорих тривимірних хмар даних. Така візуалізація значно підвищує ефективність аналізу та прийняття рішень у складних радіаційних середовищах — наприклад, у межах об'єкта «Укриття» ЧАЕС або під час розвідки пошкоджених енергоблоків.

Інший підхід, який використовує меншу кількість детекторів, запропонували науковці Бристольського університету. Цей метод, відомий як проєктивна лінійна реконструкція (Projective Linear Reconstruction, PLR), базується на математичному відновленні просторового розподілу джерел випромінювання за результатами серії сканувань. Застосовують експериментально визначену функцію відгуку детектора (Detector Response Function), за допомогою якої виконують рандомізовану деконволюцію Качмара (randomized Kaczmarz deconvolution). Отримані дані уможливають відновлення тривимірної структури поля навіть за неповного набору вимірювань [39].

Подібні обчислювальні методи використовують і в Україні, зокрема в Інституті геохімії навколишнього середовища НАН України, де ведуться дослідження з математичного моделювання та реконструкції радіаційних полів [40].

Слід зазначити, що подібні алгоритми реконструкції поступово переходять на рівень інтеграції з системами штучного інтелекту, що дає змогу автоматично оптимізувати параметри моделей та прогнозувати зміни радіаційного середовища із часом [41]. Це особливо актуально для об'єктів, де присутність людини неможлива, а весь процес аналізу відбувається дистанційно.

Паралельно з розвитком сучасних методів SDF та PLR продовжують використовуватися традиційні системи локалізації джерел випромінювання, що базуються на перевірених детекторних технологіях [42]. Однією з таких систем є Комптон-камера (Compton Camera), що застосовує принцип послідовного розсіювання і поглинання гамма-квантів у двох або більше детекторах. Аналізуючи кути розсіювання фотонів, система реконструює «конус

інцидентності» (cone of incidence), за яким визначається положення джерела випромінювання [14, 43, 44].

Інша поширена технологія — гамма-камера (або сцинтиляційна камера, відома також як камера Ангера) [14]. Її спочатку розробили для медичних цілей — сцинтиграфії, тобто створення зображень внутрішніх органів за допомогою радіоактивних ізотопів. На відміну від Комптон-камери, гамма-камера має лише один сцинтилятор, а для визначення напрямку джерела використовує коліматори або кодовані маски, що обмежують кут вхідного випромінювання [45, 46]. Хоча цей метод менш обчислювально затратний і швидше формує зображення сцени, він потребує складної постобробки даних для точного визначення координат джерел випромінювання.

Останніми роками дослідники активно розвивають методи, засновані на концепції «compressed sensing» — стисненого відбору даних, коли сцена реконструюється за допомогою обмеженої кількості вимірювань. Застосування випадково закодованих масок уможливорює отримання повноцінного зображення поля випромінювання навіть за використання одного пікселя детектора. Це відкриває шлях до створення нових поколінь легких, швидкодійних і недорогих систем візуалізації радіації [47].

Отже, тривимірний аналіз радіаційного поля став невід’ємною частиною сучасних технологій радіаційного моніторингу. Він дає змогу не лише оцінювати рівень забруднення, а й отримувати точну інформацію про геометрію розташування джерел, щільність радіоактивних матеріалів та їх потенційну динаміку в часі.

Для Чорнобильської АЕС такі методи становлять практичний інтерес: тривимірні карти випромінювання можуть стати основою для рішень щодо демонтажу об’єкта «Укриття» та поводження з паливовмісними матеріалами.

Розвиток 3D-картографування радіаційних полів демонструє перехід від статичних вимірювань до динамічного підходу, у якому просторові дані, радіаційні параметри та часові зміни розглядають як єдину систему. Проте спільною передумовою розглянутих методів залишається можливість розгорнути

вимірювальну апаратуру безпосередньо в досліджуваному просторі: SDF потребує проходження платформи крізь сцену, PLR — серії сканувань з різних позицій, Комптон- і гамма-камери — прямої видимості джерел. В умовах об'єкта «Укриття» жодна з цих передумов не виконується повною мірою, що зумовлює потребу в підходах, орієнтованих на роботу з наявними розрізненими вимірюваннями.

1.3 Узагальнений підхід до радіаційного картографування та його обмеження

Попри активний розвиток нових методів просторового аналізу радіаційних полів — безпілотних літальних апаратів, мобільних гамма-спектрометричних систем, геоінформаційних технологій та алгоритмів інтелектуального оброблення даних — основним нормативно регламентованим підходом до радіаційного картографування на майданчиках атомної енергетики залишається дотримання стандартів і рекомендацій Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) [48–50]. Саме вони визначають вимоги до організації моніторингу, забезпечення якості вимірювань, оцінювання невизначеності та інтерпретації результатів, що робить отримані дані прийнятними для регуляторних цілей і придатними для обґрунтування рішень у сфері ядерної та радіаційної безпеки.

МАГАТЕ розглядає радіаційне картографування як складник комплексної системи радіаційного захисту населення, персоналу та довкілля, а не як ізольований етап вимірювань. Такий підхід ґрунтується на принципах виправданості, оптимізації та обмеження доз опромінення і застосовний на всіх етапах життєвого циклу ядерних установок — від експлуатації до зняття з експлуатації та подальшої реабілітації територій [50–52].

1.3.1 Загальна структура підходу відповідно до рекомендацій МАГАТЕ

Узагальнений підхід до радіаційного картографування, рекомендований МАГАТЕ, охоплює низку послідовних етапів, які забезпечують системність результатів і їх прийнятність для регуляторних цілей [48–53].

На першому етапі визначається мета картографування та тип ситуації опромінення (запланована, аварійна або існуюча). Мета може полягати у підтвердженні відповідності радіаційних параметрів нормативним вимогам, оцінюванні доз опромінення населення, плануванні робіт із зняття з експлуатації або виборі заходів з ремедіації. Чітке формулювання мети безпосередньо впливає на вибір методів вимірювань, просторову роздільну здатність карти та рівень деталізації результатів.

Далі формують концептуальну радіологічну модель майданчика, що передбачає ідентифікацію потенційних джерел іонізуючого випромінювання, очікуваний нуклідний склад, можливі шляхи міграції радіонуклідів та критичні зони накопичення радіоактивного забруднення. Особливого значення цей етап набуває під час зняття ядерних установок з експлуатації, коли історичні особливості функціонування об'єкта суттєво визначають просторову структуру радіаційних полів.

Програму вимірювань розробляють з урахуванням просторової схеми (регулярна або стратифікована сітка, маршрутні вимірювання, комбіновані підходи), методів контролю (вимірювання «на місці», відбір проб із лабораторним аналізом, дистанційні методи) та переліку радіаційних параметрів, які підлягають визначенню. МАГАТЕ рекомендує застосовувати градуїований підхід, за якого обсяг і складність вимірювань відповідають рівню потенційного радіаційного ризику.

Обов'язковою складовою узагальненого підходу є забезпечення якості вимірювань (QA/QC), що охоплює калібрування приладів, контроль фонових значень, оцінювання похибок і невизначеностей, а також документування всіх

етапів збирання й оброблення даних. Саме ці вимоги відрізняють нормативно регламентоване радіаційне картографування від експериментальних або дослідницьких підходів.

Завершує послідовність побудова радіаційної карти та її інтерпретація [54]. Радіаційну карту супроводжують метаданими, інформацією про умови вимірювань і кількісною оцінкою невизначеності. Отримані просторові розподіли використовуються для оцінювання доз опромінення, визначення меж зон контролю, планування захисних заходів і підготовки звітної документації для регулюючих органів.

1.3.2 Обмеження узагальненого підходу до радіаційного картографування

Попри універсальність і дієвість рекомендацій МАГАТЕ, узагальнений підхід до радіаційного картографування має низку обмежень, які необхідно враховувати під час аналізу та інтерпретації результатів [15, 48].

Перше обмеження пов'язане з просторовою неоднорідністю радіоактивного забруднення. Навіть детально спроектована сітка вимірювань не гарантує виявлення локальних максимумів, зумовлених технологічними особливостями об'єкта або аварійними подіями в його історії, що обмежує точність просторової інтерполяції даних [15, 53].

Не менш відчутними є інструментальні обмеження польових методів, зокрема гамма-спектрометрії «на місці». На результати вимірювань істотно впливають геометрія джерел, екранування, вологість ґрунту та неоднорідність середовища, що ускладнює кількісну інтерпретацію без лабораторного підтвердження [15, 55].

Окрему групу обмежень породжує часова мінливість радіаційних полів, особливо під час демонтажу обладнання та дезактиваційних робіт. Будь-яка

радіаційна карта відображає стан об'єкта лише на момент вимірювань і потребує регулярного оновлення [51, 53].

Крім того, перехід від радіаційної карти до оцінювання доз опромінення ґрунтується на модельних припущеннях, що стосуються сценаріїв перебування людей, шляхів опромінення та параметрів переносу радіонуклідів. Це зумовлює додаткову невизначеність, яку не завжди вдається повністю усунути навіть за умов дотримання вимог стандартів [49, 50].

1.4 Застосування технологій у контексті Чорнобильської АЕС

Аварія на Чорнобильській атомній електростанції 1986 року стала однією з наймасштабніших техногенних катастроф в історії людства, що визначила подальший розвиток підходів до забезпечення радіаційної безпеки та управління наслідками ядерних аварій [56]. Упродовж наступних десятиліть міжнародна спільнота доклала значні зусилля для локалізації наслідків трагедії, результатом яких стало спорудження Нового безпечного конфайнменту — інженерної споруди, здатної ізолювати зруйнований четвертий енергоблок ЧАЕС щонайменше на століття [1]. Проте навіть цей унікальний за масштабами проєкт не усуває всіх проблем: внутрішні конструкції старіють далі, а паливовмісні матеріали залишаються джерелом потенційної небезпеки [4].

Оцінювання поточного радіаційного стану ОУ ускладнене тим, що рівні опромінення не дають змоги виконувати прямі вимірювання в необхідному обсязі. Це стосується як внутрішніх приміщень, доступ до яких практично закритий, так і зовнішньої оболонки, обстеження якої обмежене доступними технологічними маршрутами. Тому особливого значення набувають технології дистанційного радіаційного моніторингу та математичного моделювання, здатні відновлювати просторовий розподіл випромінювання за обмеженою кількістю

вимірювань. Такі методи дають змогу зменшити ризики для персоналу й планувати сценарії майбутнього демонтажу нестабільних конструкцій.

Крім того, серйозною перешкодою для реалізації автоматизованих систем моніторингу є складна архітектура внутрішніх приміщень четвертого енергоблока, зруйнованого під час аварії. Неможливість розгорнути стабільну радіомережу або прокласти дротові комунікації значно обмежує застосування робототехнічних систем, а також унеможливорює створення повноцінної сенсорної мережі всередині ОУ. Отже, традиційні підходи до радіаційного моніторингу, які ефективно функціонують у звичайних умовах атомних станцій, тут виявляються практично непридатними.

Тому для ОУ постає потреба в розробленні спеціалізованих, адаптивних та дистанційних методів оцінювання радіаційного стану, що поєднують математичне моделювання, аналіз архівних даних і сучасні алгоритми реконструкції просторових полів. У ситуаціях, коли пряме вимірювання неможливе, саме такі підходи стають практично єдиним способом отримати достовірну інформацію про поточний розподіл радіації.

Досвід попередніх обстежень показав, що підвищені рівні гамма- та нейтронного випромінювання під НБК і всередині ОУ не лише унеможливають роботу операторів, а й спричиняють швидку деградацію електроніки дистанційних вимірювальних систем [4]. Це означає, що проєкти з демонтажу зруйнованого енергоблока потребують попереднього картографування полів випромінювання для визначення безпечних маршрутів і стратегій виконання робіт.

Додаткову перешкоду створює геометрія внутрішніх приміщень реакторного відділення: численні перегородки, вентиляційні шахти й порожнини, у яких накопичилися пилоподібні паливовмісні матеріали. Навіть незначне механічне збурення таких структур може призвести до підняття в повітря частинок із високим рівнем активності, що створює додаткову загрозу вторинного забруднення.

За таких умов достовірна карта розподілу радіаційного поля стає необхідною передумовою будь-яких робіт на об'єкті. Оскільки розгорнути щільну мережу сенсорів безпосередньо в цих умовах неможливо, реалістичним шляхом залишається повторне опрацювання наявних даних — вимірювань, виконаних під час попередніх кампаній спостережень і монтажу НБК. Саме такий підхід розглянуто в наступних розділах роботи, причому як вихідну задачу обрано відновлення розподілу джерел на зовнішній оболонці ОУ за показаннями, зібраними в площині руху системи основних кранів.

1.5 Інформаційні технології та системи підтримки прийняття рішень в атомній енергетиці

Інформаційні технології нині забезпечують розв'язання широкого кола задач у різних галузях промисловості та на об'єктах критичної інфраструктури, і атомна енергетика тут не є винятком. Згідно з ДСТУ 2226-93, інформаційна технологія — це технологічний процес, предметом перероблення й результатом якого є інформація [57]; за ISO/IEC 38500 — ресурси, потрібні для отримання, оброблення, зберігання та розповсюдження інформації [58]. У межах цієї роботи склад таких ресурсів конкретизується як сукупність програмного, апаратного та математичного забезпечення. Останній складник має тут особливе значення: математичне забезпечення утворюють методи й алгоритми оброблення, і саме вони визначають, який результат буде отримано з тих самих вхідних даних за того самого апаратного та програмного оснащення. Запропонований у розділі 2 вдосконалений еволюційний алгоритм належить саме до математичного забезпечення, а описана в розділі 3 програмна реалізація є формою його втілення.

Інформаційна технологія реалізується в межах інформаційної системи — організаційно-технічної системи, в якій здійснюється оброблення інформації з використанням технічних і програмних засобів [59]. Співвідношення між цими

поняттями є співвідношенням ядра та оболонки: технологія визначає спосіб перетворення даних, система — організаційну форму, в якій це перетворення виконується. Саме воно визначає структуру подальшого аналізу.

Прийняття рішень у сфері радіаційної безпеки відбувається в умовах, які практично унеможливають суто експертний підхід: обсяг вимірювальної інформації великий, її просторово-часова структура нерівномірна, ціна помилки визначається дозовими навантаженнями на персонал і населення, а час на вироблення рішення обмежений. Саме тому системи підтримки прийняття рішень (СППР) сформувалися в окремий клас інформаційних систем ядерної галузі. Така система охоплює збирання даних, їх оброблення, моделювання наслідків і подання результату особі, яка приймає рішення.

Історично важливим поштовхом до розвитку СППР у сфері радіаційної безпеки стала аварія на Чорнобильській АЕС. Аналіз її причин і наслідків виявив, зокрема, суттєві недоліки в організації комунікації та обміну інформацією, а також у забезпеченні операторів важливою інформацією для безпечної експлуатації ядерної установки [60]. Подальший розвиток систем аварійного реагування був спрямований на забезпечення оперативного збирання, оброблення, узгодження та подання радіологічних даних особам, які приймають рішення.

1.5.1 Основні напрями застосування та отримувані ефекти

Аналіз існуючих рішень і оглядових публікацій дає змогу виділити шість основних напрямів застосування інформаційних технологій в атомній енергетиці.

Керування конфігурацією та інформаційним забезпеченням життєвого циклу. Історично перший напрям, узагальнений МАГАТЕ ще на початку 2000-х років: перехід від паперово-орієнтованого до дата-орієнтованого документообігу, електронні архіви проєктної документації, бази даних обладнання, керування змінами [61]. Мета — забезпечити відтворюваність проєктної основи установки

протягом усього життєвого циклу, зокрема на етапі зняття з експлуатації, коли від якості збереженої інформації прямо залежить обсяг додаткових обстежень.

Діагностика стану обладнання та прогнозна аналітика. Сюди належать системи виявлення аномалій, класифікації відхилень і прогнозування залишкового ресурсу, у яких за останнє десятиліття домінують методи машинного навчання — рекурентні та згорткові нейронні мережі, автоенкодери, байєсові мережі [62, 63]. Мета — перехід від планово-запобіжного обслуговування до обслуговування за фактичним станом.

Підтримка дій оператора в аварійних умовах. Системи цього напрямку інтегрують симптомо-орієнтовані інструкції з ліквідації аварій, моніторинг параметрів у реальному режимі часу та алгоритми класифікації аварійних станів, формуючи рекомендації безпосередньо на робочому місці оператора [64]. Мета — скорочення часу діагностування аварійної ситуації та зменшення кількості помилок персоналу.

Аварійна готовність і реагування за межами майданчика. Найбільш зрілий клас СППР: прогнозування атмосферного перенесення, оцінювання доз, порівняння сценаріїв контрзаходів (евакуація, укриття, йодна профілактика, обмеження харчових ланцюгів). Представники — RODOS/JRODOS, ARGOS, NARAC, SPEEDI [65–68]. Мета — обґрунтування захисних заходів у перші години після викиду.

Радіаційний моніторинг та обмін даними. Автоматизовані системи контролю радіаційної обстановки (АСКРО) на майданчиках АЕС, національні мережі спостережень та міжнародні платформи обміну даними, зокрема система IRMIS MAGATE, інтегрована з платформою USIE [69]. Мета — безперервне отримання верифікованих даних і формування єдиної картини обстановки для регулюючих органів.

Характеризація об'єктів та інформаційне забезпечення зняття з експлуатації. Найновіший і найдинамічніший напрям: тривимірні моделі приміщень і конструкцій, цифрові двійники установок, дистанційна характеризація за допомогою робототехнічних і безпілотних платформ, планування демонтажу з

оцінюванням дозових навантажень за принципом ALARA [70, 71]. Мета — планувати роботи в приміщеннях, куди людина не може або не повинна входити.

Спільним для всіх шести напрямів є одна кінцева ціль — скорочення часу від отримання вимірювання до обґрунтованого рішення за одночасного підвищення достовірності цього рішення. У термінах предметної області це означає підвищення рівня ядерної та радіаційної безпеки: створюється інструмент не лише фіксації, а й прогнозування ситуації.

Ефекти, яких досягають застосуванням інформаційних технологій у задачах атомної енергетики, зручно згрупувати за їх характером.

1. Безпека персоналу. Ключова перевага, що визначає доцільність усього напряму дистанційного зондування: персонал не перебуває в небезпечній зоні. Дані отримуються засобами, розміщеними в зоні, або з мобільних платформ, а спосіб їх передавання — оптоволоконна лінія, радіоканал, супутниковий зв'язок — є другорядним щодо самого факту відсутності персоналу в полі. Саме зниження променевого навантаження на персонал прямо декларується як цільовий ефект у сучасних концепціях модернізації АСКРО [72] та в оглядах технологій зняття з експлуатації [70].

2. Зниження трудомісткості. Автоматизоване оброблення замінює послідовність ручних операцій — від перенесення показань до побудови цифрових карт — програмною процедурою. Це відображає системний ефект автоматизації: тривалість циклу оброблення скорочується на кілька порядків, а трудомісткість знижується завдяки зменшенню потрібної кількості персоналу до одного оператора.

3. Мінімізація похибки та підвищення відтворюваності. Формалізована процедура оброблення виключає суб'єктивність експертної інтерполяції та забезпечує повторюваність результату за тих самих вхідних даних, що є обов'язковою умовою для використання результату в регуляторних процедурах.

4. Оброблення в реальному режимі часу. Радіаційна обстановка на об'єкті, що виводиться з експлуатації, є динамічною. Інформаційна технологія дає змогу оновлювати оцінку з періодичністю надходження даних, тобто перетворює

разову оцінку на процес оцінювання. Для прогнозних СППР цей ефект кількісно задокументовано: у системі NARAC перший автоматичний розрахунок формується за 5–15 хв, а уточнений продукт із залученням польових вимірювань — за 30–60 хв [67].

5. Інтеграція різнорідних даних. Сучасні системи об'єднують в одній моделі показання стаціонарних детекторів, результати спектрометрії, дані лазерного сканування та фотограмметрії, метеорологічну інформацію та архівні вимірювання, чого принципово не можна досягти засобами роздільного оброблення.

6. Збереження знань. Цифрова модель об'єкта є носієм інформації, який переживає зміну поколінь персоналу, — критично для об'єктів із багатодесятилітнім періодом виведення з експлуатації [61].

1.5.2 Огляд існуючих світових систем підтримки прийняття рішень

Найбільш поширеною в Європі СППР для аварійного реагування за межами майданчика є система RODOS та її сучасна версія JRODOS, розроблення якої координує Технологічний інститут Карлсруе (Німеччина) за підтримки рамкових програм ЄС. Система охоплює повний ланцюг: приймання даних моніторингу та метеопрогнозу, моделювання атмосферного перенесення й осадження, розрахунок доз за шляхами опромінення, оцінювання ефективності контрзаходів та підтримку рішень на пізніх фазах аварії, включно з реабілітацією територій [65]. Версія JRODOS реалізована на платформно-незалежній архітектурі та поширюється серед національних центрів аварійного реагування.

Систему ARGOS розробила компанія Prolog Development Center спільно з Данським агентством з надзвичайних ситуацій; вона використовується в низці країн Європи, а також у Канаді, Бразилії та Австралії. Система функціонально близька до RODOS і побудована на трьох складниках: збирання та аналіз даних

радіаційного моніторингу, моделювання атмосферного розсіювання, розрахунок доз для харчових ланцюгів і міського середовища; охоплює також хімічні та біологічні загрози [66].

У США функції прогнозного центру виконує Національний центр консультування щодо атмосферних викидів NARAC/IMAAC Ліверморської національної лабораторії, який працює з 1979 р. і забезпечує цілодобове моделювання наслідків викидів у будь-якій точці світу. Обчислювальне ядро — метеорологічна модель WRF, модель асиміляції метеоданих ADAPT і дисперсійна модель LODI; продукти — прогноз шлейфу, цифрові карти забруднення поверхні, оцінки доз і рекомендації щодо захисних дій [67].

Японська національна система прогнозування доз SPEEDI/WSPEEDI створена для оперативного оцінювання обстановки навколо АЕС. Досвід її застосування під час аварії на АЕС «Фукусіма-Даїчі» став класичним прикладом обмеження всього прогнозного класу СППР: за невідомого джерельного члена прогноз втрачає достовірність, і система здатна вказати лише конфігурацію переносу, але не рівні забруднення [68]. Цей досвід прямо обґрунтовує потребу в системах, що відновлюють обстановку за фактичними вимірюваннями, а не за модельним джерелом.

Платформи обміну даними. Окремий шар утворюють системи міжнародного обміну: IRMIS MAGATE приймає значення потужності дози від стаціонарних постів, мобільних лабораторій і портативних приладів держав-членів та відображає їх на картах у режимі, близькому до реального часу, підтримуючи платформу USIE [69]; в Європі аналогічні функції виконує платформа EURDEP. Ці системи не містять власного апарату відновлення полів — вони є інфраструктурою збирання та візуалізації.

Системи характеристизації та цифрові двійники. Це клас, найближчий до предмета цього дослідження. Найбільш показовим є програмний комплекс N-Visage (Createc, Велика Британія), який будує тривимірний розподіл гамма-випромінювальних нуклідів за даними колімованих і неколімованих вимірювань, суміщеними з геометричною моделлю приміщення, і дає змогу розраховувати

потужність дози в довільній точці моделі, оцінювати обсяги радіоактивних відходів та імітувати сценарії демонтажу; заявлена точність відновлення активності — у межах $\pm 10\%$ за оброблення до 100 000 точок вимірювань [71]. Саме до цього класу належать підходи Scene Data Fusion та проєктивної лінійної реконструкції, розглянуті в підрозділі 1.2.

1.5.3 Стан розроблення та впровадження інформаційних технологій радіаційної безпеки в Україні

В Україні базовим елементом інформаційного забезпечення радіаційної безпеки є автоматизовані системи контролю радіаційної обстановки (АСКРО), розгорнуті на майданчиках усіх діючих АЕС і в зоні відчуження. Принципи їх побудови та методи реалізації узагальнено у працях [73], де сформульовано вимоги до складу постів контролю, регламенту передавання даних і подання результатів. Водночас сучасний аналіз показує, що функціональні можливості цих систем обмежені: чинне програмне забезпечення АСКРО забезпечує обмежену точність прогнозування в межах пристанційної зони 0–10 км, а стаціонарні пости не здатні виявляти вузькі радіоактивні шлейфи, поширення яких визначається рельєфом і забудовою [72]. Запропонована в [72] концепція модернізації передбачає інтеграцію мобільних робототехнічних і безпілотних платформ, захищений програмно-технічний комплекс з резервним супутниковим каналом та побудову багатомасштабного цифрового двійника процесів розсіювання — тобто рух саме в бік технологій, розглянутих у цьому розділі.

Прогнозний контур аварійного реагування в Україні забезпечується системою JRODOS. Її впровадження виконано Технологічним інститутом Карлсруе за підтримки ЄС спільно з профільними центральними органами виконавчої влади; систему презентовано в ДСНС України у 2016 р. і розгорнуто на майданчиках усіх чотирьох АЕС та в зоні відчуження [74, 75]. Практичну

придатність системи підтверджено, зокрема, під час пожеж у зоні відчуження. Розрахунки JRODOS використовуються також мобільною лабораторією радіаційної розвідки ДНТЦ ЯРБ для планування точок відбору проб, а результати вимірювань передаються до Інформаційно-кризового центру Держатомрегулювання [76].

Для об'єкта «Укриття» створено інтегровану автоматизовану систему контролю, що в реальному режимі часу відстежує параметри ядерної та радіаційної безпеки, стан будівельних конструкцій і сейсмічну активність [77]. Ця система забезпечує моніторинг у контрольних точках, однак не розв'язує задачі відновлення просторового розподілу поля між ними.

Науковий доробок з підтримки прийняття рішень щодо об'єкта «Укриття» формує передусім Інститут проблем безпеки АЕС НАН України: розроблено факторно-критеріальні та багатокритеріальні моделі сценарного аналізу для вибору варіанта перетворення об'єкта на екологічно безпечну систему [78, 79], застосовано тривимірне моделювання для планування демонтажу нестабільних конструкцій. Інформаційно-технологічні розробки для оцінювання радіаційного стану довкілля виконуються також ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» — зокрема системи оперативного радіаційного контролю з носіїв та експертні системи оцінювання впливу ядерних установок [80]. Робототехнічні засоби радіаційної розвідки в зоні відчуження ЧАЕС і алгоритми оброблення отриманих ними даних розвиваються спільно ІПБ АЕС та ІПММС НАН України [8, 12].

Узагальнюючи, слід констатувати: в Україні існують усі складники інформаційної інфраструктури — мережі вимірювань, прогнозна СППР світового рівня, засоби дистанційного зондування та наукові школи багатокритеріального аналізу. Проте контур, який мав би перетворювати розріджений набір фактичних вимірювань усередині складного об'єкта на цифрову карту радіаційного забруднення, залишається найслабшою ланкою.

1.5.4 Рекомендації міжнародних організацій та пропозиції виробників

Позиція МАГАТЕ, узагальнена за результатами профільних програм із зняття з експлуатації, полягає в рекомендації комплексу з чотирьох взаємопов'язаних технологій: робототехнічні та безпілотні платформи для дистанційної характеристики; тривимірні моделі та цифрові двійники установок; засоби віртуальної реальності для підготовки персоналу; методи штучного інтелекту, що перетворюють результати сканування на інтелектуальні інформаційні моделі об'єкта. Практичне застосування цього комплексу задокументовано на АЕС «Фукусіма-Даїчі» (Японія), в Інституті енергетичних технологій IFE (Норвегія), компанії Sogin (Італія) та на АЕС «Богуніце» (Словаччина); заявлені ефекти — зниження радіологічних і фінансових ризиків та захист персоналу [70]. Окремо МАГАТЕ формулює міркування щодо впровадження застосунків штучного інтелекту в атомній галузі, наголошуючи на вимогах верифікованості та пояснюваності результатів.

Комерційні постачальники рухаються в тому самому напрямі, але з акцентом на платформну архітектуру. Так, у листопаді 2025 р. Orano та Dassault Systèmes оголосили про партнерство щодо переведення повного життєвого циклу ядерних об'єктів на платформу 3DEXPERIENCE з використанням віртуальних двійників і системної інженерії — із заявленими ефектами у вигляді наскрізної простежуваності та контрольованості проєктних і експлуатаційних даних [81]. Framatome розвиває лінійку цифрових рішень для роботи в обмежених і радіаційно небезпечних середовищах. Createc пропонує N-Visage як галузевий стандарт де-факто для тривимірної характеристики [71], Mirion Technologies — мобільні спектрометричні платформи для авіаційного та автомобільного носіїв. В Україні аналогічний продуктовий напрям представляє програмно-технічний комплекс «Вулкан-М» розробки ТОВ «Вестрон» [72].

Отже, узагальнена рекомендація світових виробників зводиться до такої схеми: дистанційне отримання даних робототехнічними засобами, суміщення

вимірювань із геометричною моделлю об'єкта, цифровий двійник як єдине інформаційне середовище, планування робіт із розрахунком дозових навантажень. Ключовою ланкою цієї схеми, від якої залежить достовірність усього ланцюга, є саме перетворення набору вимірювань на просторовий розподіл активності.

1.5.5 Узагальнення результатів аналізу

Огляд показує, що поняття «СППР у сфері радіаційної безпеки» об'єднує два класи систем, які істотно різняться за постановкою задачі. Перший — прогностичні системи, які за відомим або оціненим джерельним членом і метеорологічними полями розраховують перенесення радіонуклідів, дози та ефективність контрзаходів. Другий — системи оцінювання фактичного стану, які відновлюють просторовий розподіл забруднення за обмеженим набором вимірювань. Перший клас розвинений незрівнянно краще: саме до нього належать RODOS/JRODOS, ARGOS, NARAC і SPEEDI, тоді як задачі цифрового радіаційного картографування складних об'єктів спираються на значно бідніший математичний апарат.

Технологічна база при цьому сформована. Існують зрілі СППР аварійного реагування за межами майданчика, розвинені мережі автоматизованого контролю радіаційної обстановки, міжнародні платформи обміну даними та комерційні комплекси характеристики об'єктів. Україна інтегрована в цю базу: JRODOS експлуатується на всіх майданчиках АЕС і в зоні відчуження, об'єкт «Укриття» оснащено інтегрованою системою контролю параметрів ядерної та радіаційної безпеки, а наукові школи багатокритеріального аналізу та роботизованої радіаційної розвідки мають власний доробок.

Рекомендації міжнародних організацій і продуктивні пропозиції виробників сходяться на одній послідовності: дистанційне отримання даних робототехнічними засобами, суміщення вимірювань із геометричною моделлю

об'єкта, цифровий двійник як єдине інформаційне середовище, планування робіт із розрахунком дозових навантажень. Обмеження, які лишаються всередині цієї послідовності, та задачу, що з них випливає, розглянуто в підрозділі 1.6.

1.6 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз дає змогу локалізувати те місце в технологічному ланцюзі оцінювання радіаційного забруднення, де зосереджені основні обмеження. Узагальнену концепцію інформаційної технології оцінювання радіаційного забруднення об'єктів Чорнобильської АЕС за неповними даними подано на рисунку 1.1: вона відображає шлях від отримання вимірювань до рішення, що ухвалюється на їх основі.

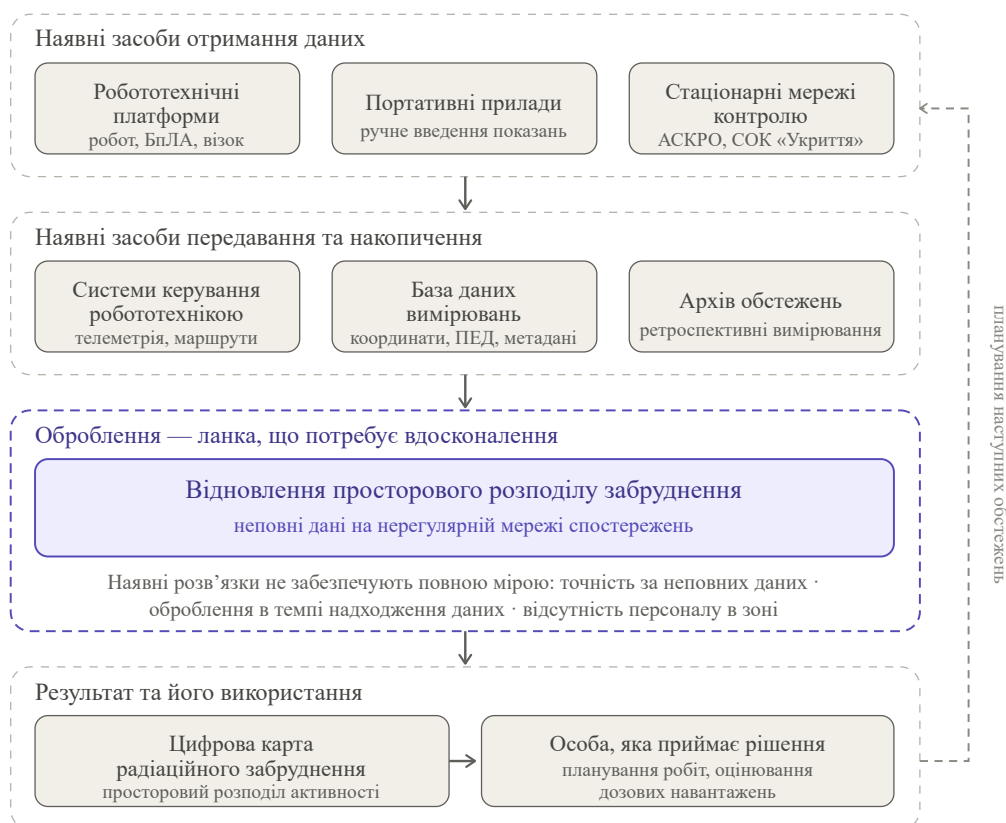


Рисунок 1.1 — Концепція інформаційної технології оцінювання радіаційного забруднення Чорнобильської АЕС за неповними даними

Два верхні шари схеми відповідають технологічній базі, розглянутій у підрозділах 1.1 та 1.5: робототехнічні платформи й портативні прилади забезпечують отримання даних у місцях, недоступних для персоналу, а системи керування, бази вимірювань і архіви обстежень — їх передавання та накопичення. Ці складники розвинені й упроваджені в практику, зокрема на майданчиках українських АЕС і в зоні відчуження.

Водночас математичний апарат, покладений в основу оцінювання просторового розподілу радіаційного забруднення (виділений блок на рисунку 1.1), істотно відстає від рівня інформаційної інфраструктури. Прогнозні системи потребують знання джерельного члена, який в умовах реальної аварії, як показав досвід Фукусіми, є невідомим [68]. Системи, що працюють з фактичними вимірюваннями, здебільшого спираються на класичні методи просторової інтерполяції, коректність яких обґрунтована лише за умови достатньо щільної та регулярної мережі спостережень. Методи, що розвиваються останніми роками на основі нейронних мереж і гаусових процесів, знімають частину обмежень, проте самі потребують значних обсягів рівномірної вибірки в усьому об'ємі, що є нереалізовним у реальному радіаційному полі складного об'єкта [82].

Показово, що обмеження стосуються не інфраструктури, а саме ланки оброблення. Засоби отримання даних, канали передавання та сховища розвинені достатньо, щоб забезпечити вимірювання там, де персонал не має доступу. Натомість перетворення розрідженого набору вимірювань на просторовий розподіл активності досі не задовольняє водночас трьох вимог, які й визначають доцільність застосування інформаційних технологій: точності за неповних вихідних даних, оброблення в темпі надходження вимірювань та відмови від виходу персоналу в зону. Наявні розв'язки задовольняють ці вимоги частково — за рахунок або спрощення фізичної моделі, або збільшення обсягу вимірювань, тобто ціною повернення персоналу в зону радіаційної небезпеки.

Саме ця розбіжність — між зрілістю інформаційної інфраструктури та обмеженістю апарату відновлення поля за неповними даними на нерегулярній мережі — визначає невирішену частину загальної проблеми, на розв'язання якої

спрямоване це дослідження. Відповідно до наведеного вище співвідношення понять результат дослідження позиціонується не як ще одна інформаційна система, а як інформаційна технологія, що становить ядро оброблення даних і може бути реалізована у складі існуючих СППР.

Отже, задача дослідження полягає в розробленні інформаційної технології оцінювання радіаційного забруднення складних об'єктів за даними дистанційного зондування, яка забезпечує відновлення просторового розподілу потужності експозиційної дози за неповними вимірюваннями на нерегулярній мережі спостережень без виконання вимірювань персоналом безпосередньо в зоні радіаційної небезпеки. Формалізацію відповідного методу, обґрунтування критеріїв оптимізації та експериментальну перевірку подано в наступних розділах.

1.7 Висновки до розділу 1

Аналіз літературних джерел показав, що останні десятиліття принесли інтенсивний розвиток технологій виявлення, локалізації та картографування випромінювання [14–17]. Аварія на АЕС «Фукусіма-Даїчі» (2011) значно прискорила цей процес — з'явилися безпілотні літальні та наземні платформи [18–22], розподілені сенсорні мережі [23], автономні мобільні детектори, здатні працювати за високих доз. Поєднання класичних принципів дозиметрії з досягненнями робототехніки, комп'ютерного зору та штучного інтелекту помітно розширило можливості радіаційного моніторингу [24–30].

Проте для складних середовищ — таких як об'єкт «Укриття» з його високими рівнями радіації, заплутаною архітектурою та браком стабільного зв'язку — ці технології мають суттєві обмеження. Тривале розгортання техніки всередині ОУ неможливе, що зумовлює потребу у відновленні радіаційних полів за непрямыми, історичними чи архівними даними.

У сфері тривимірного аналізу радіаційних полів активно розвиваються методи Scene Data Fusion [37, 38] та Projective Linear Reconstruction [39], які інтегрують детекторні вимірювання, дані лідару, візуальну інформацію та статистичні алгоритми реконструкції. Ці підходи виходять за межі лабораторних прототипів і поступово стають практичними інструментами аналізу об'єктів ядерної енергетики. Але всі вони передбачають можливість наблизити детектор до джерел або виконати серію сканувань з різних позицій.

Для об'єктів, де вимірювання зібрані вздовж єдиної технологічної траєкторії й не можуть бути доповнені, потрібен інший клас підходів. Еволюційні алгоритми оптимізації є методологічно обґрунтованою альтернативою для таких умов: вони дають змогу шукати в багатовимірних просторах параметрів і працювати з неповними даними, характерними для ОУ.

Огляд систем підтримки прийняття рішень показав, що технологічна база галузі сформована: діють зрілі системи аварійного реагування за межами майданчика [65–68], розвинені мережі автоматизованого контролю радіаційної обстановки [73], міжнародні платформи обміну даними [69] та комерційні комплекси характеристики об'єктів [71]. Україна інтегрована в цю базу [74, 75, 78]. Обмеження зосереджені не в інфраструктурі, а в ланці оброблення — апарат відновлення просторового розподілу за неповними даними на нерегулярній мережі відстає від рівня самої інфраструктури [68, 72]. Постановку задачі, що впливає з цієї розбіжності, наведено в підрозділі 1.6.

Отже, проведений огляд обґрунтовує доцільність розроблення інформаційної технології оцінювання радіаційного забруднення ОУ, яка поєднує фізичну модель переносу випромінювання з еволюційними алгоритмами оптимізації та позиціонується не як ще одна інформаційна система, а як ядро оброблення даних, здатне функціонувати у складі існуючих СППР.

Основні результати розділу викладено автором у публікаціях [8, 11–13].

РОЗДІЛ 2

ЕВОЛЮЦІЙНИЙ АЛГОРИТМ ОЦІНЮВАННЯ ГАММА- ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІД ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

2.1 Модель гамма-випромінювання від об'єкта «Укриття»

Для цілей цього дослідження тривимірну геометричну модель об'єкта «Укриття» (ОУ) навмисно спрощено. Це зумовлено обмеженою кількістю детальної інформації про складну багат шарову конфігурацію конструкції, яка поєднує первинну залізобетонну споруду, різноманітні внутрішні матеріали та зовнішню оболонку. Додатковою складністю є брак достовірних даних про джерело радіоактивного випромінювання, що міститься всередині структури.

Тому ОУ було змодельовано у вигляді сукупності ізотропних точкових гамма-джерел, розташованих із кроком 1 м на зовнішній оболонці конструкції ОУ (рис. 2.1). У моделі не враховано внутрішні джерела випромінювання або іншу наявну, але фрагментарну інформацію. Таке спрощення продиктовано тим, що створення повноцінної фізичної моделі ОУ супроводжується значними невизначеностями, головним чином через невідомий склад і структуру «середовища» між реальними множинними джерелами радіації та детекторами. Крім того, цей підхід виправданий практично: під час робіт зі зняття об'єкта з експлуатації персонал та обладнання перебувають переважно ззовні оболонки.

Тому для оцінювання дозового навантаження та просторового розподілу радіації не має значення, чи розташоване джерело безпосередньо на поверхні оболонки, чи за нею — на глибині 15 см бетону або уламків, чи навіть на відстані 30 м усередині конструкції. Отже, поверхнева модель є прийнятною й адекватною для подальших розрахунків.

Запропонована модель не враховує ефект повторного відбиття гамма-випромінювання від оболонки НБК, оскільки реальний детектор знаходиться під системою основних кранів НБК та екранований від подібного вторинного випромінювання.

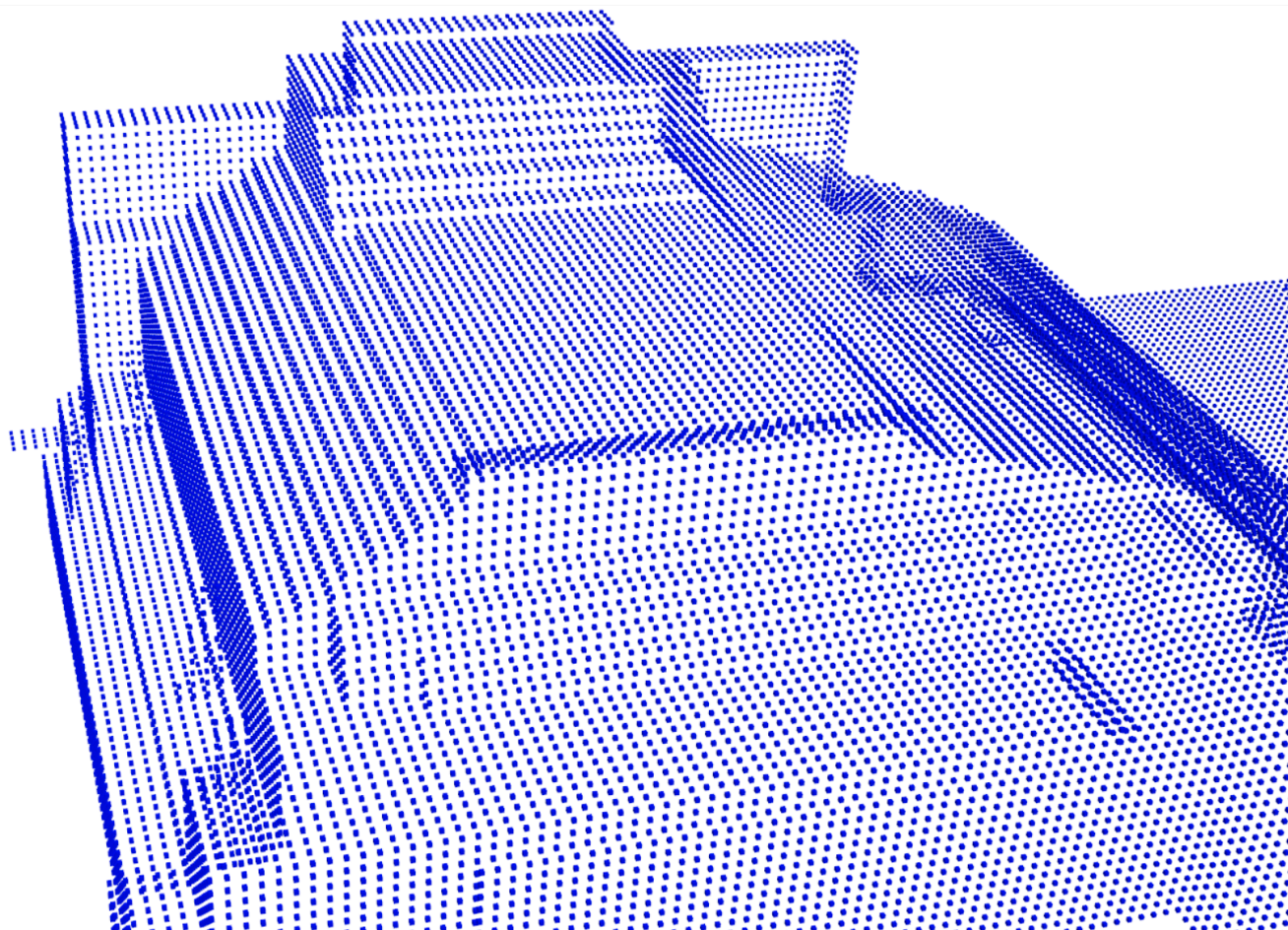


Рисунок 2.1 — Спрощена геометрична 3D-модель ОУ

У цьому спрощеному описі розраховують потік фотонів, який досягає всенаправленого детектора від кожного точкового джерела, з урахуванням зменшення інтенсивності відповідно до закону обернених квадратів відстані.

У формалізованому вигляді спрощена модель може мати такий вигляд:

$$S = F(a_1, \dots, a_{n \times m}; x_1, \dots, x_n), \quad (2.1)$$

де n — кількість точкових джерел на оболонці, m — кількість виконаних вимірювань.

Показання S_j , зареєстрована сенсором j , у координатах $(x, y, z)_j$, може бути подана як рівність:

$$S_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \times x_i + \varphi_j, \quad (2.2)$$

де x_i — активність джерела в точці i у координатах $(x, y, z)_i$, a_{ij} — коефіцієнт зменшення інтенсивності, який залежить від відстані між сенсором j та джерелом i , а φ_j — випадкова складова, що враховує похибку вимірювання та вплив інших стохастичних чинників.

Схематичне зображення цієї залежності наведено на рисунку 2.2.

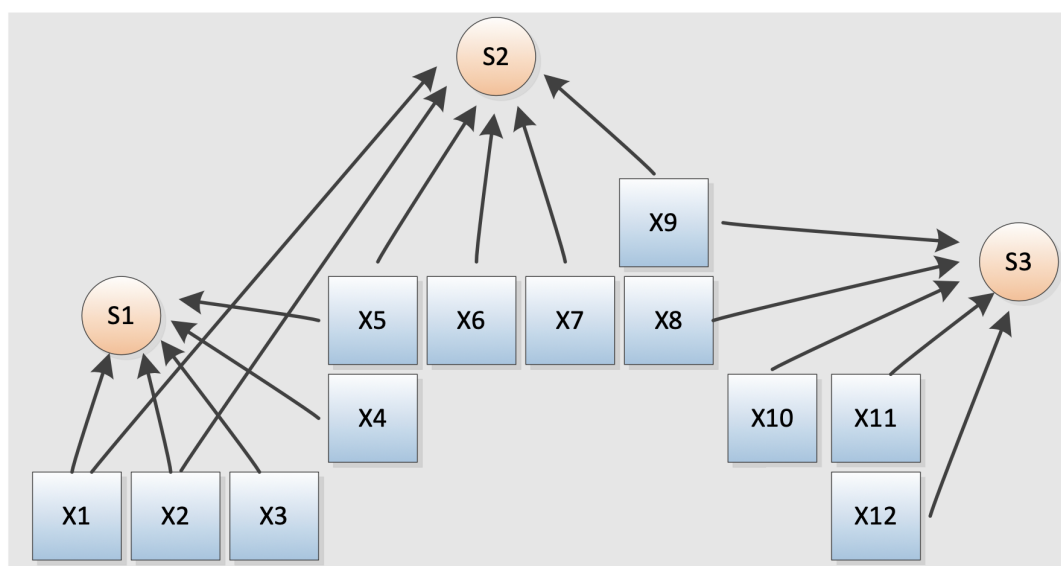


Рисунок 2.2 — Спрощена модель гамма-випромінювання від ОУ

Кожен вимір, виконаний над зовнішньою оболонкою ОУ, розглядається як «віртуальний детектор». Такий перехід правомірний, оскільки радіаційна обстановка протягом вимірювань залишається стаціонарною, і послідовні показання одного рухомого детектора можна розглядати як показання сукупності нерухомих детекторів у відповідних точках простору. Отже, для всіх «віртуальних детекторів» та всіх точкових джерел система може бути змодельована у вигляді невизначеної системи лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} S_1 = \sum_{i=1}^n a_{i1} \times x_i + \varphi_1 \\ \dots \\ S_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \times x_i + \varphi_j \\ \dots \\ S_m = \sum_{i=1}^n a_{im} \times x_i + \varphi_m \end{cases} \quad (2.3)$$

Коефіцієнти a_{ij} обчислюють за формулою (2.4):

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{якщо джерело } \mathbf{i} \text{ з координатами } (x, y, z)_i \text{ є екранованим} \\ & \text{від детектора } \mathbf{j} \text{ розташованого в координатах } (x, y, z)_j \\ \frac{1}{R_{ij}^2}, & \text{де } R_{ij}^2 = ((x)_i - (x)_j)^2 + ((y)_i - (y)_j)^2 + ((z)_i - (z)_j)^2 \end{cases} \quad (2.4)$$

У загальному випадку кількість невідомих n значно перевищує кількість вимірювань m ($n \gg m$), що зумовлює невизначеність системи та неєдиність її розв'язку [83].

Водночас вводять обмеження (2.5), що враховують фізичні властивості процесу: потік фотонів не може бути від'ємним і практично не може перевищувати розумно допустиме значення.

$$\forall i \in \overline{1, n}, j \in \overline{1, m} \mid V_{min} < x_i < V_{max}, a_{ij} \geq 0. \quad (2.5)$$

Тут величини V_{max} та V_{min} — це відповідно максимальне та мінімальне значення потужності дози у реальній системі.

Отже, побудова цифрової карти розподілу гамма-випромінювання зводиться до знаходження наближеного розв'язку цієї системи рівнянь з прийнятною практичною точністю.

2.2 Еволюційні алгоритми як метод розв'язання задач

Одним із перспективних напрямів теорії та практики оптимізації, який на сьогодні інтенсивно розвивається, є еволюційне моделювання, яке також називають еволюційними алгоритмами [84, 85].

Еволюційні алгоритми є класом прямих імовірнісних алгоритмів пошуку та оптимізації, запозичених з моделі органічної еволюції, для яких застосування класичних аналітичних або детермінованих чисельних методів є ускладненим або неможливим [86].

Формування еволюційного підходу пов'язане з роботами Інго Рехенберга, Ханса-Пауля Швевеля, Лоуренса Фогеля, Джона Холанда та ін., у яких уперше було запропоновано використовувати принципи природної еволюції для побудови адаптивних обчислювальних процедур. У подальшому цей підхід набув розвитку та був узагальнений у вигляді окремого напрямку — еволюційного моделювання.

Еволюційні алгоритми в загальному випадку ґрунтуються на популяційному принципі пошуку, відповідно до якого одночасно обробляється множина можливих розв'язків задачі. Кожен розв'язок оцінюється за допомогою функції пристосованості, яка відображає ступінь відповідності заданому критерію або сукупності критеріїв оптимізації. Такий підхід забезпечує паралельне дослідження різних областей простору розв'язків та зменшує ймовірність потрапляння алгоритму в локальні екстремуми [87].

У сучасній науковій літературі еволюційне моделювання найчастіше пов'язують із генетичними алгоритмами [84]. Узагальнену теоретичну модель еволюційних алгоритмів подано в працях Томаса Бека, де еволюційні алгоритми розглядаються як стохастичні методи глобальної оптимізації, що поєднують механізми випадкових змін і спрямованого відбору [86]. З формальної точки зору типовий еволюційний алгоритм включає такі основні компоненти: кодування розв'язків, функцію пристосованості, оператори еволюції (відбір, рекомбінація, мутація), механізм формування нових поколінь та критерії завершення пошуку.

За способом дії еволюційні алгоритми належать до евристичних методів. Вони не гарантують знаходження глобального оптимуму, однак дають змогу отримувати якісні наближені розв'язки за прийнятний обчислювальний час. Такий підхід є особливо ефективним у задачах великої розмірності та в умовах складної структури цільової функції, що підтверджують численні прикладні дослідження [88].

Важливою властивістю еволюційних алгоритмів є їхня універсальність. Один і той самий алгоритмічний каркас може бути адаптований до різних класів задач зміною способу кодування розв'язків, вибору функції пристосованості та налаштування параметрів еволюційних операторів. Саме ця властивість робить еволюційні алгоритми зручними для використання в задачах моделювання складних систем та прийняття рішень за умов невизначеності [89].

У вітчизняних наукових дослідженнях еволюційні алгоритми розглядаються як ефективний інструмент прикладної оптимізації. Віталій Євгенович Снитюк підкреслює доцільність використання генетичних алгоритмів як базової форми еволюційних методів у задачах планування, прогнозування та формування оптимальних структур за складних обмежень [84]. Такий підхід є обґрунтованим з огляду на здатність еволюційних алгоритмів адаптуватися до специфіки конкретної прикладної задачі.

У межах еволюційного моделювання розрізняють кілька історично сформованих напрямів, що відрізняються способом кодування розв'язку та роллю окремих операторів. Генетичні алгоритми традиційно оперують дискретним кодуванням і надають визначальної ваги оператору рекомбінації. Еволюційні стратегії, навпаки, орієнтовані на вектори дійсних чисел, а основним механізмом породження нових кандидатів у них є мутація з нормальним розподілом, тоді як рекомбінація відіграє допоміжну роль або не застосовується взагалі. Еволюційне програмування розвивалося як засіб адаптації структур поведінки, а генетичне програмування — як спосіб автоматичного синтезу програм. Задача, розглянута в підрозділі 2.1, оперує вектором дійсних невід'ємних величин, тому найближчою до неї за способом подання розв'язку є схема еволюційних стратегій.

Поряд з еволюційними методами до стохастичних алгоритмів глобальної оптимізації належать імітація відпалу [90], метод рою частинок [91] та диференціальна еволюція [92]. Імітація відпалу оперує єдиним поточним розв'язком і допускає прийняття погіршень з імовірністю, що знижується в ході пошуку. Метод рою частинок і диференціальна еволюція, навпаки, спираються на обмін інформацією між кандидатами: новий розв'язок формується з урахуванням положень інших членів популяції або їхніх різниць.

Для задачі, що розглядається, ці властивості виявляються несприятливими. Прийняття погіршень, покладене в основу імітації відпалу, за наявності жорстких обмежень (2.5) призводить до виходу за межі допустимої області та потребує окремого механізму повернення до неї. Методи, засновані на комбінуванні кількох кандидатів, стикаються з тією ж перешкодою, що й оператор рекомбінації: компоненти вектора відповідають просторово рознесеним джерелам, і поєднання фрагментів різних кандидатів дає поля, узгоджені з різними підмножинами вимірювань, а отже, фізично несумісні. Схема з локальною мутацією та елітарним відбором позбавлена обох недоліків: кожен новий кандидат відрізняється від попереднього обмеженою зміною значень і залишається в допустимій області на кожному кроці пошуку, а прийняття відбувається лише за умови покращення відповідності вимірюванням.

Зворотним боком такого вибору є посилена залежність результату від початкового наближення: за відсутності обміну інформацією між кандидатами пошук досліджує простір розв'язків локально й не виходить за межі області, окресленої стартовою точкою. Це переносить вагу з операторів еволюції на спосіб формування початкової популяції, розгляду якого присвячено підрозділ 2.4.

Отже, еволюційні алгоритми можуть розглядатися як універсальні методи розв'язання задач оптимізації та пошуку, що поєднують біологічно натхненні принципи з формальними обчислювальними моделями та забезпечують ефективний інструментарій для аналізу й оптимізації складних систем.

2.3 Опис еволюційного алгоритму реконструкції гамма-випромінювання від об'єкта «Укриття»

Задача, сформульована в підрозділі 2.1, належить до класу невизначених обернених задач, оскільки кількість невідомих параметрів істотно перевищує кількість доступних вимірювань $n \gg t$. Додаткову складність становить наявність фізичних обмежень на допустимий розв'язок: активності джерел мають бути невід'ємними, розрахована потужність дози має перебувати в межах від V_{min} до V_{max} , а внесок екранованих джерел має дорівнювати нулю.

За таких умов застосування класичних детермінованих методів обмежене. Пряме обернення системи неможливе через її невизначеність та наявність множини потенційних розв'язків. Метод найменших квадратів у базовій постановці не забезпечує однозначного фізично допустимого результату, а використання регуляризації потребує вибору додаткових параметрів і може призводити до розв'язку, який є математично стійким, але не повністю відповідає накладеним фізичним обмеженням [83]. Методи просторової інтерполяції, своєю чергою, відтворюють переважно поле вимірних значень, але не дають змоги безпосередньо оцінити розподіл активностей джерел, особливо за умов розрідженої та нерегулярної мережі спостережень.

З огляду на зазначені особливості задачі, еволюційний пошук можна розглядати як доцільний підхід до побудови фізично допустимого наближеного розв'язку [88]. Його застосування не потребує прямого обернення системи чи обчислення градієнтів цільової функції, а фізичні обмеження можна врахувати безпосередньо на рівні кодування індивіда, формування початкової популяції та операторів мутації [84]. Крім того, нерегулярність просторового розташування точок вимірювання не є принциповою перешкодою, оскільки якість кожного кандидата оцінюється за відповідністю розрахованих значень наявним експериментальним даним.

Отже, замість пошуку єдиного аналітичного розв'язку невизначеної системи еволюційний алгоритм застосовують для пошуку такого вектора активностей, який відтворює наявні вимірювання в межах допустимої похибки та водночас задовольняє задані фізичні обмеження.

Алгоритм 2.1 — Псевдокод еволюційного алгоритму

ПОЧАТОК

```

ІНІЦІАЛІЗУВАТИ популяцію;
ВИЗНАЧИТИ ФУНКЦІЮ Мутація();
ВИЗНАЧИТИ ФУНКЦІЮ Пристосованість();
ВИЗНАЧИТИ ФУНКЦІЮ Умова_завершення();
ПОВТОРЮВАТИ
    нова_популяція := Мутація(популяція);
    ЯКЩО (Пристосованість(нова_популяція)
        КРАЩА, НІЖ Пристосованість(популяції))
        ТО популяція := нова_популяція;
    КІНЕЦЬ_ЯКЩО
ДО Умова_завершення();
КІНЕЦЬ

```

У цьому алгоритмі:

- «популяція» — поточний набір індивідів, кожен з яких є повним кандидатним розв'язком задачі, тобто вектором активностей усіх джерел;
- «мутація» є функцією, що змінює властивості індивідів, породжуючи нове покоління;
- «функція пристосованості» (fitness function) приймає кандидатне рішення і повертає числове значення, що характеризує, наскільки воно відповідає цільовим вимогам задачі;
- «термінальна умова» визначає момент завершення роботи алгоритму — зазвичай тоді, коли знайдено рішення з прийнятною точністю або досягнуто обмеження за кількістю ітерацій, часом чи іншими параметрами.

Умовний перехід у наведеній схемі виконує роль оператора відбору: нова популяція заміщує поточну лише тоді, коли її пристосованість краща, інакше внесені зміни відкидаються. Такий відбір називають елітарним — найкращий зі знайдених розв'язків зберігається на кожній ітерації й не може бути втрачений через прийняття гіршого кандидата. На відміну від схем, які допускають прийняття погіршень задля виходу з локальних мінімумів, елітарний відбір гарантує монотонне незростання похибки апроксимації протягом усього пошуку.

Оператор схрещування в алгоритмі не використовується. Це зумовлено характером кодування розв'язку: компоненти вектора активностей відповідають просторово рознесеним джерелам, і обмін ділянками між двома кандидатами поєднував би фрагменти полів, узгоджені з різними підмножинами вимірювань, що породжувало б фізично несумісні комбінації. Мутація натомість змінює значення локально, зберігаючи узгодженість кандидата з прямою моделлю, тому саме її обрано єдиним оператором породження нових розв'язків.

Наведена схема є загальною: вона задає каркас еволюційного пошуку, а не його остаточну реалізацію. Конкретний вигляд функцій мутації та ініціалізації добирається під специфіку задачі — структуру джерел і апіорну інформацію про поле, — чому й присвячено наступні підрозділи.

Для розв'язання системи рівнянь (2.3) загальний метод еволюційного пошуку було модифіковано, а його схему подано в нотації візуальної мови програмування DRAKON [93], яка забезпечує наочніший та уніфікований опис логічних процесів (додаток В, рисунок В.1).

Індивідом у цій схемі є вектор активностей $(x'_1, \dots, x'_i, \dots, x'_n)$, компоненти якого відповідають джерелам на оболонці ОУ. Функція пристосованості визначається через евклідову відстань між двома векторами $(S_1, \dots, S_j, \dots, S_m)$ та $(S'_1, \dots, S'_j, \dots, S'_m)$, де $S'_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \times x'_i$. Отже, індивід $(x'_1, \dots, x'_i, \dots, x'_n)$ вважають кращим за індивід $(x''_1, \dots, x''_i, \dots, x''_n)$, якщо відстань між векторами $(S_1, \dots, S_j, \dots, S_m)$ та $(S'_1, \dots, S'_j, \dots, S'_m)$ менша за відстань між $(S_1, \dots, S_j, \dots, S_m)$ та $(S''_1, \dots, S''_j, \dots, S''_m)$.

Додатково слід зазначити, що в реальних задачах еволюційні алгоритми часто поєднують із методами стохастичної оптимізації, гібридними моделями або

адаптивним налаштуванням параметрів (наприклад, коефіцієнтів мутації чи розміру популяції). Такий підхід дає змогу підвищити стійкість алгоритму до локальних мінімумів і збільшити швидкість збіжності до оптимального рішення.

Отже, розглянута модифікація еволюційного методу не лише зберігає універсальність базового підходу, а й водночас враховує специфіку оберненої задачі радіаційного картографування. Подальші можливості її вдосконалення пов'язані насамперед зі способом формування початкового наближення та з адаптивним налаштуванням параметрів мутації, чому присвячено наступні підрозділи.

2.4 Методи формування початкової популяції

Вплив вибору початкової популяції на результати роботи еволюційних алгоритмів уже тривалий час привертає увагу дослідників. Зокрема, Реймонд Р. Гілл у статті [94] зазначає, що якісно сформована початкова популяція сприяє збіжності генетичного алгоритму до оптимальних розв'язків, тоді як невдала початкова популяція може істотно ускладнювати або уповільнювати процес збіжності.

Борхан Каземіпур та співавтори [95] зазначають, що початкова популяція фактично є апріорною оцінкою для еволюційного алгоритму й може як сприяти пошуку оптимального розв'язку, так і перешкоджати йому. Автори наголошують, що якісні початкові наближення позитивно впливають на ефективність алгоритму та покращують кінцеві результати оптимізації.

Т. Фрідріх та М. Вагнер [96], дослідивши 48 тестових задач для багатокритеріальних еволюційних алгоритмів, показали, що ефективність ініціалізації є задачезалежною та алгоритмозалежною: для одних класів задач якісна початкова популяція дає суттєвий виграш, для інших ефект менш виражений. Попри багатокритеріальну спрямованість цього дослідження, його

загальний висновок про залежність ефекту ініціалізації від конкретної задачі застосовний і до однокритеріальних методів, до яких належить запропонований у роботі алгоритм.

У статті [97] автори систематично досліджують вплив різних методів ініціалізації на поведінку та ефективність кількох евристичних алгоритмів, зокрема диференціальної еволюції (DE), алгоритму рою частинок (PSO), пошуку зозулі (CS), алгоритму колонії бджіл (ABC) та генетичного алгоритму (GA). Залежно від алгоритму та типу тестової функції ініціалізація істотно впливала на результат у 43–73 % випадків. Варто зауважити, що в систематичному огляді [95] методи ініціалізації класифіковано за випадковістю, композиційністю та загальністю, причому останній критерій розділяє методи загального призначення й ті, що враховують специфіку конкретної задачі. Водночас питання про використання фізичних закономірностей досліджуваного процесу як джерела апріорної інформації для побудови початкової популяції залишається малодослідженим.

Отже, для розглядуваної задачі реконструкції просторового розподілу гамма-випромінювання вибір методу формування початкової популяції не є другорядним етапом, а становить важливий елемент методики, що безпосередньо впливає на ефективність роботи еволюційного алгоритму. Це зумовлює потребу в розробленні спеціалізованих проблемно-орієнтованих методів ініціалізації, які враховують геометрію об'єкта, фізику процесу поширення випромінювання та наявні вимірювальні дані.

2.4.1 Випадкова ініціалізація

Найпростіший метод формування початкової популяції ґрунтується на припущенні про однакову активність усіх джерел на оболонці ОУ (у межах спрощеної моделі, описаної в підрозділі 2.1). У такому випадку початкова

популяція $(x_1^0, \dots, x_i^0, \dots, x_n^0)$ може бути задана одним значенням x^0 , де $x^0 = x_1^0 = \dots = x_n^0$, $x^0 \in [V_{min}, V_{max}]$, тобто як величина, що належить діапазону між мінімальним та максимальним значеннями потужності дози в реальній системі.

Узагальненням є випадкова ініціалізація, за якої активність кожного джерела задається незалежно випадковою величиною з рівномірного розподілу в межах фізичного діапазону: $x_i^0 \sim U(V_{min}, V_{max})$.

Перевагою такого способу є те, що він за побудовою задовольняє обмеження (2.5): усі згенеровані значення належать допустимому діапазону, тому результат не потребує додаткової корекції перед початком пошуку.

Слід зазначити, що жоден з цих методів не враховує інформацію, яка міститься в множині $S = (S_1, \dots, S_j, \dots, S_m)$ — доступних вимірювань. Тому такі методи виправдані лише для початкового налагодження алгоритму або як базовий варіант для подальшого порівняння з перспективнішими евристичними.

2.4.2 Ініціалізація на основі фізичних законів

На відміну від випадкової ініціалізації, цей метод будує початкове наближення, фізично узгоджене з даними вимірювань, і є ключовим з-поміж запропонованих у роботі.

Ідея полягає в наближеному оберненні моделі формування сигналу (підрозділ 2.1): оскільки кожне виміряне значення S_j складається з внесків довколишніх джерел, ослаблених обернено пропорційно квадрату відстані, то за вимірними значеннями можна оцінити активності x_i цих джерел. Оскільки коефіцієнт a_{ij} у (2.2) швидко спадає з відстанню, починаючи з деякого порогу R , внеском джерела у вимірний сигнал можна знехтувати. Припустимо додатково, що всі найближчі до сенсора джерела мають однакову активність. Це припущення застосовується лише на етапі побудови стартового наближення: подальший

еволюційний пошук уточнює співвідношення активностей усередині кожної околиці, тоді як роль початкового кроку — забезпечити правильний порядок величин і просторову локалізацію максимумів.

Для кожного точкового джерела i , розташованого на зовнішній поверхні ОУ, введемо індикатор:

$\text{fixed}[i] = \text{true/false}$ — індикатор того, чи зафіксоване значення x_i .

Упорядкуємо сенсори j за спаданням зареєстрованої потужності дози S_j , для подальшого перебору отриманої впорядкованої множини. Такий порядок обходу забезпечує, що джерела поблизу зон з найвищою зафіксованою дозою отримують оцінку насамперед, тоді як слабші показання лише уточнюють периферію. За зворотного порядку внесок потужних джерел був би розподілений між околицями слабких сенсорів, що спотворило б просторову локалізацію максимумів у початковому наближенні.

Під час перебору цієї множини для кожного «датчика» j , що відповідає рівнянню вигляду $S_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}x_i + \varphi_j$, визначимо множину «значущих» сусідів N_j , для яких виконується умова $1/R^2 \leq a_{ij}$.

У такому разі це рівняння можна подати у вигляді:

$$S_j = \sum_{i \in N_j} a_{ij} x_i + \sum_{i \notin N_j} a_{ij} x_i + \varphi_j. \quad (2.6)$$

Введемо позначення Φ_j як фонову складову, де $\Phi_j = \sum_{i \notin N_j} a_{ij} x_i + \varphi_j$. Тоді рівняння можна переписати у вигляді:

$$S_j = \sum_{i \in N_j} a_{ij} x_i + \Phi_j. \quad (2.7)$$

Оскільки фовою складовою в подальших обчисленнях можна знехтувати, отримаємо:

$$S_j \approx \sum_{i \in N_j} a_{ij} x_i. \quad (2.8)$$

Розіб'ємо отриману множину N_j на дві підмножини:

$K_j = \{i \in N_j: fixed[i] = true\}$ — вже відомі, тобто обчислені на попередніх ітераціях (на першій ітерації циклу $K_j = \emptyset$);

$U_j = \{i \in N_j: fixed[i] = false\}$ — ще невідомі.

Оскільки

$$\sum_{i \in K_j} a_{ij} x_i + \sum_{i \in U_j} a_{ij} x_i \approx S_j, \quad (2.9)$$

то значення активності для невідомих точок можна обчислити так:

$$\sum_{i \in U_j} a_{ij} x_i \approx S_j - \sum_{i \in K_j} a_{ij} x_i. \quad (2.10)$$

Позначимо залишок:

$$r_j = S_j - \sum_{i \in K_j} a_{ij} x_i. \quad (2.11)$$

Тоді значення «необчислених» x_i , $i \in U_j$ можна знайти за співвідношенням:

$$x_i \leftarrow \frac{r_j}{\sum_{k \in U_j} a_{kj}}, i \in U_j. \quad (2.12)$$

Позначимо множину U_j як $fixed=true$ та перейдемо до наступного «сенсора».

Описаний вище алгоритм можна подати у вигляді такого псевдокоду.

Алгоритм 2.2 — Псевдокод алгоритму генерації початкової популяції

ПОЧАТОК

ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ fixed: ДЛЯ кожного i fixed[i] := false

ВІДСОРТУВАТИ j за спаданням значень S_j

ДЛЯ кожного j :

ЗНАЙТИ множину N_j

РОЗВИТИ N_j на множини K_j та U_j

ОБЧИСЛИТИ залишок r_j

ЯКЩО U_j порожня

ТО перейти до наступного j

ІНАКШЕ призначити значення x_i за правилом:

$$x_i \leftarrow \frac{r_j}{\sum_{k \in U_j} a_{kj}}, i \in U_j$$

КІНЕЦЬ_ЯКЩО

ПОЗНАЧИТИ множину U_j як fixed=true

КІНЕЦЬ_ДЛЯ

КІНЕЦЬ

2.4.3 Початкова популяція як проєкція інтерполяції вимірювань

У розглядуваній предметній області «джерела» (точки з активністю x_i) розташовані на поверхні, тоді як «детектори» (S_j) — над нею на певній відстані. Спрощуючи, можна вважати, що маємо дві паралельні площини: на нижній площині Π_x точкові джерела з активністю x_i розміщені в області, обмеженій багатокутником $M \subset \Pi_x$, на верхній площині Π_s розташовані «детектори» S_j . Тоді для нульового кроку можна виконати інтерполяцію значень S_j на проєкції багатокутника M на поверхню площини $M' \subset \Pi_s$, а отриманий результат перенести (спроєкувати) на точки x_i із використанням коефіцієнта переходу.

Цей метод розглянуто в роботі як альтернативу до ініціалізації на основі фізичних законів. Він спирається на спрощувальне припущення: інтерпольоване значення дози в точці поверхні вважають активністю джерела під цією точкою. Проте згідно з прямою моделлю (підрозділ 2.1) доза в кожній точці є сумою внесків багатьох джерел, ослаблених обернено пропорційно квадрату відстані, а не активністю одного джерела. Тому таке наближення може вносити систематичне зміщення вже на нульовому кроці; його практичні наслідки розглянуто в підрозділі 4.3.

У цьому підході як «нульовий» крок, по суті, застосовують загальноприйнятий метод радіаційної розвідки із застосуванням безпілотних літальних апаратів [98]. Такий метод полягає у виконанні радіаційних вимірювань під час польоту БПЛА на заданій висоті з подальшою інтерполяцією отриманих значень у просторі та їх перенесенням (проекцією) на поверхню досліджуваної території [99, 100]. Зазначений підхід широко застосовують у сучасних системах радіаційного моніторингу та картографування, його детально описано у низці наукових публікацій і методичних рекомендацій [101, 102].

Конкретна реалізація цього методу залежить від вибору методу інтерполяції та від способу визначення «коефіцієнта перенесення» — лінійного або такого, що характеризується складнішою функціональною залежністю. Детальна оптимізація цих аспектів виходить за межі дослідження, а в роботі метод використано в базовому варіанті для порівняння з іншими підходами до формування початкової популяції (підрозділ 4.3).

Застосовність цього методу обмежена конфігураціями, у яких вимірювання утворюють поверхню, що проєктується на область розташування джерел. Для ділянок оболонки, над якими вимірювання не виконувалися, початкове наближення в такий спосіб не формується, і відповідні джерела залишаються поза розглядом.

2.5 Можливість використання історичних даних

Під час оцінювання радіаційного забруднення та реконструкції просторового розподілу гамма-випромінювання нерідко виникають ситуації, коли для певних точок простору вже наявні історичні вимірювання. Такі дані можуть бути отримані під час попереднього моніторингу, польових експериментів, автоматизованих вимірювань тощо. Наявність цих значень дає змогу частково визначити або уточнити шукані параметри x_i , які описують інтенсивність випромінювання у відповідних координатах.

Якщо для окремих точок простору значення x_i вже відоме, його можна використовувати як фіксовану складову системи рівнянь (2.3). Такий підхід зменшує розмірність задачі: кількість невідомих скорочується на число зафіксованих джерел, що звужує простір пошуку.

В еволюційних алгоритмах такий підхід можна реалізувати фіксацією окремих змінних у нових поколіннях, а також через часткову ініціалізацію початкової популяції заздалегідь визначеними величинами. Зафіксовані компоненти вектора не підлягають мутації й зберігають своє значення протягом усього пошуку, проте враховуються під час обчислення модельних показань S'_j , а отже, впливають на функцію пристосованості решти джерел.

Основною складністю у використанні таких історичних вимірювань є закон радіоактивного розпаду, який зумовлює зменшення інтенсивності випромінювання із часом у геометричній прогресії [103]. Тому, не врахувавши час отримання даних, можна припуститися систематичних похибок у розрахунках.

Одним із способів уточнення даних і мінімізації похибки є використання статистичних методів. У статті [10] показано застосування регресійного аналізу вимірювань потужності еквівалентної дози (ПЕД) гамма-випромінювання в підконтрольних приміщеннях об'єкта «Укриття» для подальшого прогнозування ПЕД без додаткового дозиметричного обстеження.

Отже, історичні дані можна інтегрувати в задачу реконструкції як фіксовані компоненти вектора розв'язку, зменшуючи розмірність простору пошуку шляхом часткової фіксації змінних. Обов'язковою умовою є актуалізація таких даних з урахуванням радіоактивного розпаду, яку виконують на підготовчому етапі алгоритму (додаток В).

2.6 Висновки до розділу 2

У цьому розділі сформовано методологічну основу реконструкції просторового розподілу гамма-випромінювання об'єкта «Укриття» на основі еволюційного підходу.

Показано, що за умов високої невизначеності внутрішньої геометрії ОУ, складу матеріалів та реального розташування джерел випромінювання доцільний перехід від фізично детальної моделі до поверхневої моделі у вигляді сукупності ізотропних точкових гамма-джерел, розміщених на зовнішній оболонці. Таке спрощення обґрунтоване метою дозиметричного контролю: персонал і вимірювальна апаратура перебувають поза оболонкою ОУ, тому практичне значення має лише поле випромінювання в зовнішньому просторі. Це поле можна відтворити еквівалентним розподілом джерел на зовнішній оболонці, не вдаючись до реконструкції фактичного розташування джерел усередині конструкції, яке за зовнішніми вимірюваннями однозначно не визначається.

Формалізація задачі у вигляді системи лінійних рівнянь із фізичними обмеженнями показала, що вона належить до класу невизначених обернених задач, для яких застосування класичних детермінованих методів ускладнене. Обґрунтовано вибір еволюційної схеми з дійснозначним кодуванням, локальною мутацією та елітарним відбором: на відміну від методів, що комбінують кількох кандидатів або допускають прийняття погіршень, така схема зберігає допустимість розв'язку на кожному кроці пошуку.

Розроблено модифікацію загального еволюційного алгоритму, адаптовану до задачі реконструкції гамма-поля, у якій функцію пристосованості визначають між вектором реальних вимірювань і вектором, обчисленим за поточним набором розв'язків.

Особливу увагу приділено питанню формування початкової популяції, яка в межах розглядуваної задачі істотно впливає на якість початкового наближення та кінцевого розв'язку. Розглянуто три методи ініціалізації: випадковий, що слугує базовим; фізичний, який послідовно оцінює внески джерел за законом обернених квадратів і є основним запропонованим; та інтерполяційний, що ґрунтується на геометричній відповідності джерел і датчиків на двох паралельних площинах і розглянутий як альтернатива. Два останні залучають інформацію з вимірювань уже на нульовому кроці. Порівняльне оцінювання цих методів за реальними даними наведено в підрозділі 4.3. Додатково обґрунтовано можливість залучення історичних дозиметричних даних як частково зафіксованих змінних, що зменшує розмірність простору пошуку за умови врахування радіоактивного розпаду й попередньої статистичної корекції.

Водночас обрана схема має відому межу застосовності: локальний характер пошуку робить результат залежним від стартового наближення, а для ділянок оболонки, над якими вимірювання не виконувалися, інформативна ініціалізація неможлива. Це підвищує вимоги до методу формування початкової популяції й зумовлює її окремий розгляд у роботі.

Отже, обґрунтовано застосовність еволюційного підходу до задачі реконструкції гамма-випромінювання ОУ, запропоновано адаптовану схему алгоритму та розроблено набір спеціалізованих методів ініціалізації, які враховують геометрію задачі, фізику процесу та доступну вимірювальну інформацію.

Основні результати розділу викладено автором у публікаціях [8, 10].

РОЗДІЛ 3

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ РАДІАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ЗА НЕПОВНИМИ ДАНИМИ НА ОСНОВІ ЕВОЛЮЦІЙНОГО АЛГОРИТМУ

У попередніх розділах дисертаційної роботи було розглянуто теоретичні основи задачі оцінювання радіаційного забруднення територій, проаналізовано наявні підходи до просторової інтерполяції дозиметричних даних, а також обґрунтовано доцільність застосування еволюційних алгоритмів для розв’язання задачі відновлення поля випромінювання.

Практична реалізація запропонованого підходу потребує створення спеціалізованого програмного забезпечення, здатного забезпечити повний цикл оброблення даних — від приймання експериментальних дозиметричних вимірювань до побудови просторово узгодженої карти радіаційного забруднення. Така програмна система має поєднувати алгоритмічний складник, пов’язаний з реалізацією еволюційного алгоритму оптимізації, та інженерні рішення, що забезпечують масштабованість, відтворюваність експериментів і наочність подання результатів.

У цьому розділі розглянуто питання проєктування та реалізації програмного забезпечення для побудови карти радіаційного забруднення на основі еволюційного алгоритму. Особливу увагу приділено вибору архітектури програмного забезпечення, структурі програмних модулів, організації обміну даними між ними, а також формалізації процесу оптимізації у вигляді послідовності взаємопов’язаних обчислювальних етапів. Для підвищення наочності та формалізованості опису в розділі використано діаграми архітектури, алгоритмічні схеми та UML-діаграми. Виклад побудовано за принципом послідовного уточнення: від функціональної моделі, що фіксує склад операцій, до структури класів і фізичного розміщення компонентів на обчислювальних вузлах.

3.1 Модель інформаційної технології

Перш ніж переходити до функціонального та об'єктно-орієнтованого проектування, запропоновану інформаційну технологію доцільно подати як цілісну сукупність процесів оброблення інформації. Така модель фіксує склад цих процесів, послідовність перетворення даних і межі самої технології. Розглянуті далі нотації розкривають ці аспекти лише частково: IDEF0 описує функції з їх керуванням і механізмами, UML — структуру та поведінку програмних компонентів, проте шлях даних від первинного вимірювання до рішення жодна з них не подає повністю.

Модель побудовано як послідовність шарів, кожен з яких об'єднує процеси одного типу; рух даних відбувається згори вниз — від отримання первинних вимірювань до використання результату.

Деталізовану модель із зазначенням складу даних на кожному шарі наведено в додатку Г (рисунок Г.1).

Поділ на шари виконано за типом перетворення, якого зазнають дані. Межа між шарами проходить там, де змінюється форма подання інформації: сукупність показань детектора стає впорядкованим записом у базі даних, запис — розподілом активності у вокселях розрахункової області, розподіл — цифровою картою, а карта — підставою для рішення. Такий поділ не залежить від конкретної програмної реалізації і зберігається за будь-якого складу технічних засобів.

Шар процесів збирання об'єднує три джерела, різні за фізичною природою та за роллю в подальшому обробленні. Дозиметричні вимірювання — робототехнічними засобами, безпілотними апаратами або технологічним візком — дають значення потужності експозиційної дози в точках траєкторії. Лідарна зйомка формує хмару точок поверхні, технічна документація постачає геометрію конструкцій і відомості про матеріали. Жодне з цих джерел саме по собі не визначає просторового розподілу активності: дозиметрія фіксує наслідок, а не причину, геометрія ж описує середовище, у якому цей наслідок виникає.

Отримані дані надходять до шару зберігання вхідної інформації. База даних вимірювань накопичує координати, значення ПЕД і метадані обстеження; архів обстежень зберігає ретроспективні вимірювання попередніх років, придатні для актуалізації з урахуванням радіоактивного розпаду. Розділення на поточні та архівні дані є принциповим: перші утворюють цільову функцію, другі — джерело апріорної інформації для формування початкового наближення. Повний склад шарів моделі та зв'язки між ними подано на рисунку 3.1.

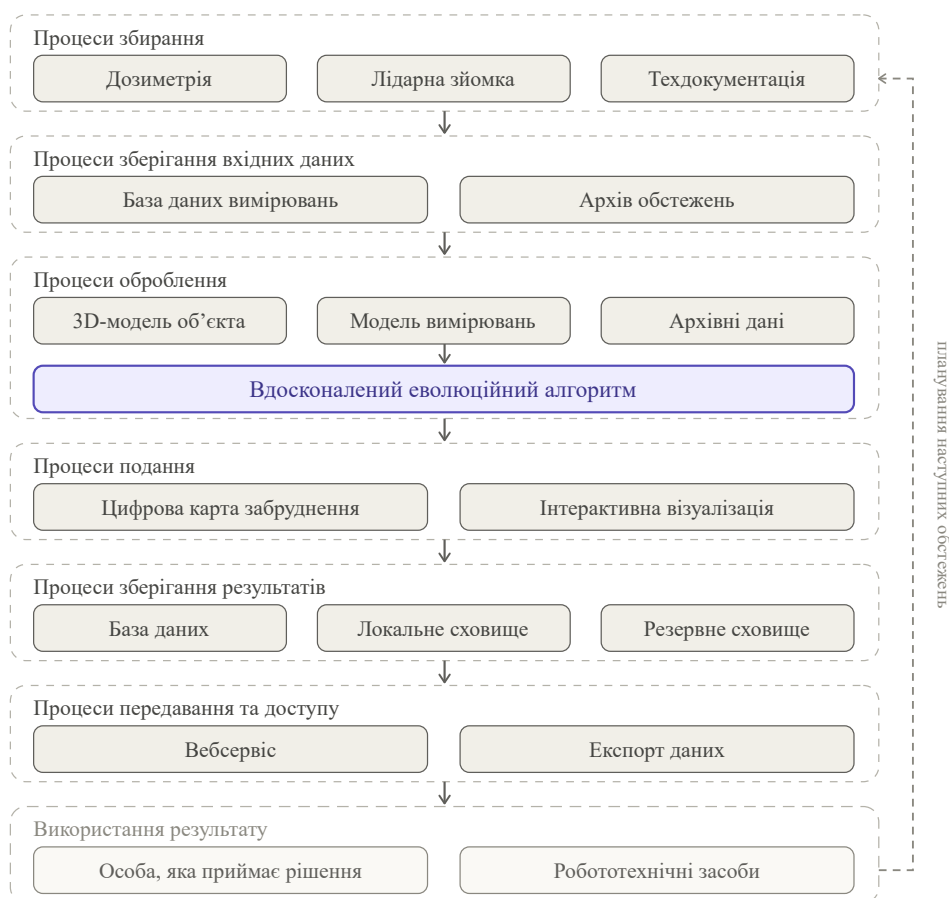


Рисунок 3.1 — Модель інформаційної технології оцінювання радіаційного забруднення на основі даних дистанційного зондування

Ядром моделі є шар оброблення. Три його складники готують дані до розв'язання оберненої задачі: тривимірна модель об'єкта задає воксельну сітку розрахункової області, модель вимірювань визначає видимість вокселів із позицій детектора та ослаблення за законом оберненого квадрата, регресійний аналіз

архівних даних дає оцінку розподілу активності на момент обстеження. На їх основі працює вдосконалений еволюційний алгоритм, який і виконує відновлення поля. Саме цей блок становить математичне забезпечення технології в тому розумінні, що подане в підрозділі 1.5, і саме він відрізняє запропоновану технологію від наявних рішень, що спираються на просторову інтерполяцію.

Результат оброблення переходить до шару подання. Цифрова карта радіаційного забруднення містить тривимірний розподіл активності, інтерактивна візуалізація дає змогу будувати перетини моделі та отримувати значення ПЕД у довільній точці, зокрема в тій, де вимірювань не виконували.

Процеси зберігання присутні в моделі двічі, і це не дублювання, а відображення двох різних за призначенням рівнів. Перший накопичує первинні вимірювання й архів, другий зберігає результати оброблення — цифрові карти з версіюванням, проміжні моделі та резервні копії. Розмежування має практичне значення: первинні дані незмінні й накопичуються, тоді як результати перераховуються щоразу, коли надходять нові вимірювання або змінюються параметри алгоритму.

Шар передавання та доступу забезпечує вебсервіс із програмним інтерфейсом REST для запитів користувача та засоби експорту в поширені формати даних і цифрових карт. Технічну реалізацію цього шару розглянуто в підрозділі 3.4.

Нижній шар — використання результату — лежить за межами інформаційної технології, але визначає вимоги до неї. Особа, яка приймає рішення, використовує цифрову карту для планування робіт, оцінювання дозових навантажень і обґрунтування аварійних дій. Робототехнічні засоби отримують карту як вхідні дані для планування маршрутів наступних обстежень, і саме цей зворотний зв'язок, показаний на рисунку 3.1, замикає контур: оцінювання радіаційної обстановки є не разовою процедурою, а безперервним процесом, у якому кожне наступне обстеження спирається на результат попереднього.

3.2 Функціональна модель інформаційної технології

3.2.1 Метод функціонального моделювання IDEF0

IDEF0 (ICAM Definition for Function Modeling) — це методологія функціонального моделювання, що подає систему як ієрархію взаємопов'язаних функцій; кожен функцію описують стандартним набором елементів ICOM (Input, Control, Output, Mechanism) і деталізують через функціональну декомпозицію — від контекстної діаграми (A-0) до субпроцесів нижчих рівнів [104, 105]. Метод не описує алгоритмічних чи часових аспектів роботи системи, натомість чітко фіксує склад функцій, їхні взаємозв'язки та потоки між ними, тому його застосовують на концептуальному етапі проектування.

Для проектованої системи саме ця властивість і визначила вибір IDEF0. На початковому етапі потрібно формалізувати слабоструктурований процес предметної області — оброблення дозиметричних вимірювань — ще до ухвалення рішень щодо реалізації. Розмежування ICOM лягає на цей процес природно: дані вимірювань відповідають входу (Input), фізичні та нормативні обмеження задачі — керуванню (Control), обчислювальні пристрої та сховища даних — механізмам (Mechanism), а цифрова карта радіаційного забруднення — виходу (Output). Поведінкові й структурні аспекти, які зручніше описувати засобами UML, на цьому етапі вторинні та розглядаються далі, коли функціональний склад системи вже зафіксовано.

Серед альтернативних нотацій функціонального опису розглядалися діаграми потоків даних та BPMN. Діаграми потоків даних фіксують перетворення й накопичення інформації, проте не розрізняють типів вхідних дуг: дані вимірювань і накладені на оброблення обмеження постають у них однорідними стрілками. Для задачі, що розглядається, це розрізнення істотне, оскільки межі ділянки картографування, координати контрольних точок і фізичні обмеження на допустимий розв'язок керують обробленням, а не є її предметом. Нотація BPMN, навпаки, орієнтована на послідовність виконання з подіями та розгалуженнями, а

отже, вимагає зафіксувати порядок дій уже на концептуальному етапі, коли він ще не визначений; поняття механізму, тобто ресурсу, яким виконується функція, у ній відсутнє. Метод IDEF0 позбавлений обох обмежень і додатково вимагає узгодження дуг між рівнями декомпозиції: кожна дуга діаграми верхнього рівня має знайти відповідність на нижчому, що діє як вбудована перевірка повноти опису.

Відповідно до цього IDEF0 використано для структурованого подання процесу оцінювання радіаційного забруднення: модель визначає, які дані надходять до системи, якими обмеженнями керується їх оброблення, які ресурси її реалізують і який результат вона дає. Це забезпечує логічну узгодженість та відтворюваність опису, на основі якого далі побудовано контекстну діаграму системи та її декомпозицію.

3.2.2 Контекстна діаграма

Розроблення програмного забезпечення (ПЗ) починається з системного аналізу задачі [106], а контекстна діаграма визначає межу між системою та зовнішнім світом. Вона відображає систему у вигляді єдиного процесу та ілюструє потоки даних між системою і зовнішніми сутностями. Для побудови контекстної діаграми необхідно визначити такі складові [105]:

- вхід: результати попередніх вимірювань (за їх наявності), методика розрахунку, реалізована у програмному забезпеченні, та схема (модель, карта) території для радіаційного картографування;
- керування: контрольні точки з відомою активністю та межі ділянки території, для якої будують цифрову карту;
- вихід: цифрова карта радіаційного забруднення;
- механізми: дозиметристи й дозиметричне оснащення для збирання первинних даних; обчислювальні пристрої для виконання розрахунку та побудови

карти; інженер з програмного забезпечення та/або науковець для контролю, оцінювання якості та коригування параметрів.

Наведений перелік складових відповідає нотації IDEF0, у якій система подається одним функціональним блоком, а стрілки входу, керування, виходу та механізмів описують її взаємодію із зовнішнім середовищем. Внутрішня структура на цьому рівні навмисно не деталізується — її декомпозицію подано в п. 3.2.3.

Контекстну діаграму наведено на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 — Контекстна діаграма

Визначення межі системи є основним змістом контекстної діаграми, тому доцільно вказати, що навмисно залишено поза нею. Система не виконує дозиметричних вимірювань: збір первинних даних здійснюють дозиметристи або автономні платформи, а їх оснащення подано як механізм, а не як складову системи. Поза межею залишається й ухвалення рішень за побудованою картою — планування робіт, визначення маршрутів та допустимого часу перебування персоналу в зонах підвищеного випромінювання. Система перетворює вимірювання на карту розподілу, тоді як рішення на її основі приймає фахівець,

що узгоджується з позиціонуванням розробки як засобу підтримки прийняття рішень.

Окремого пояснення потребує віднесення контрольних точок до дуг керування, а не до входів. За походженням вони не відрізняються від решти вимірювань, проте в процесі оброблення не перетворюються: їхні значення не беруть участі в розрахунку, а слугують для перевірки отриманого результату та ухвалення рішення про повторне виконання зі скоригованими параметрами. Так само межі ділянки картографування не обробляються, а обмежують область, у якій виконується розрахунок. Обидві дуги задають умови виконання функції, що їй відповідає означенню керування в нотації IDEF0.

3.2.3 Діаграма декомпозиції

Діаграма декомпозиції — це діаграма ієрархічного розбиття системи або процесу на підсистеми, функції чи підпроцеси для деталізації її структури та логіки роботи [105].

Перша функція — початкове збирання та підготовка вхідних даних. Використовують історичні вимірювання, за їх наявності, або збирають нові силами дозиметристів чи автономних платформ. Межі території, для якої будують карту, задають керування на цьому етапі. Вихід — набір вимірювань: координати точок і зафіксовані в них рівні потужності дози.

Друга функція розраховує рівні забруднення для всіх точок цифрової карти за еволюційним алгоритмом. На вхід надходять зібрані дані, програмна реалізація алгоритму та геометрична модель об'єкта; розрахунок виконує робоча станція. У середині цього блоку послідовно виконуються чотири дії: формування початкового наближення за обраним методом ініціалізації, обчислення модельних показань для поточного кандидата, порівняння їх із наявними вимірюваннями за функцією пристосованості та мутація з відбором кращого розв'язку. Останні три

дії повторюються циклічно до вичерпання заданої кількості ітерацій або до досягнення прийнятної розбіжності. Керуванням слугують межі ділянки та коригувальні параметри, що надходять із третьої функції. Результат етапу — попередні, ще не перевірені значення активностей джерел на оболонці.

Третя функція забезпечує контроль якості. Науковий співробітник зіставляє розраховані значення з вимірюваннями в контрольних точках і вирішує, чи вносити коригувальні параметри й повторювати розрахунок, чи передавати дані далі. Вихід — перевірені значення для побудови цифрової карти.

Четверта функція переносить обчислені значення на модель місцевості. Вхід — підтверджені значення та модель; побудову виконує робоча станція, а керуванням слугують межі означеної ділянки й параметри тонкого налаштування з наступного етапу. На виході — попередній варіант цифрової карти.

П'ята функція — перевірка побудованої цифрової карти. Науковий співробітник аналізує її, спираючись на вимірювання в контрольних точках і межі ділянки картографування. Результат — готова цифрова карта радіаційного забруднення.

На діаграмі помітні дві петлі зворотного зв'язку. Коригувальні параметри з третьої функції повертаються на вхід керування другої, а коригування параметрів або координат із п'ятої — на вхід четвертої. Побудова цифрової карти через це не є лінійним процесом: розрахунок і візуалізація повторюються доти, доки розбіжність з вимірюваннями в контрольних точках не стане прийнятною.

Людина втручається лише у третій і п'ятій функціях — решта етапів виконується автоматично. Обсяг ручної роботи залежить не від розміру ділянки, а від кількості ітерацій, потрібних для узгодження результату з контрольними вимірюваннями. Першу функцію можна пропустити, якщо придатні вимірювання вже зібрано раніше — саме такий сценарій реалізовано в експериментальній частині роботи (розділ 4), де використано дані, отримані під час введення НБК в експлуатацію.

Глибшої декомпозиції не виконано. Внутрішню логіку другої функції описано в розділі 2, тому повторне подання засобами IDEF0 не додало б нової

інформації. Решта блоків не має самостійної алгоритмічної складності: перший і третій виконує людина, четвертий зводиться до перенесення значень на модель місцевості. Програмну реалізацію розглянуто в підрозділі 3.3 засобами UML, які краще передають структуру класів і взаємодію компонентів.

Механізмами для другої й четвертої функцій є робоча станція з розробленим програмним забезпеченням, для третьої та п'ятої — науковий співробітник, для першої — дозиметристи або автономні платформи з вимірювальним обладнанням.

Усі дуги контекстної діаграми розподілено між п'ятьма функціями без втрат, що відповідає вимозі узгодженості суміжних рівнів декомпозиції (додаток Г, рисунок Г.2).

3.3 Детальне проєктування програмних компонентів

На етапі проєктування програмного забезпечення важливим є формалізований опис як процесів оброблення даних, так і архітектурної структури системи. Для цього доцільно застосовувати поєднання UML-діаграм та архітектурних моделей, що дає змогу узгоджено представити логіку функціонування системи, взаємодію її компонентів і рух інформації між ними.

Перехід від функціональної моделі до детального проєктування означає зміну питання, на яке відповідає опис. Модель підрозділу 3.2 фіксує, що саме система робить — які дані надходять, які обмеження керують обробленням і що утворюється на виході. Подання цього підрозділу відповідають на інше питання — як це реалізовано: якими компонентами, в якій послідовності вони взаємодіють і де виконуються.

Поведінкові UML-діаграми — прецедентів і послідовностей — застосовують для відображення сценаріїв роботи системи та порядку виконання

операцій. Архітектурні діаграми описують структуру програмної системи, її підсистеми, компоненти та механізми їхньої взаємодії.

Ролі та сценарії використання зафіксовано першими, за ними йдуть обмін повідомленнями між компонентами, структура класів і розміщення компонентів на обчислювальних вузлах. Такий порядок відповідає руху від зовнішнього погляду на систему до її внутрішньої будови й фізичного розміщення. Кожне наступне подання уточнює попереднє, не суперечачи йому, тому послідовність підрозділів водночас є послідовністю кроків проєктування.

Кожен компонент, що з'являється в цих поданнях, реалізує одну або кілька функцій, зафіксованих у декомпозиції підрозділу 3.2; нових функцій на етапі детального проєктування не вводиться.

3.3.1 Моделювання архітектури обчислювальних систем

Моделювання архітектури обчислювальних систем є ключовим етапом проєктування програмних та програмно-апаратних комплексів, оскільки дає змогу формалізувати структуру системи, принципи взаємодії її складових та загальні закономірності функціонування. Зі зростанням складності сучасних обчислювальних систем, зокрема розподілених і багаторівневих, актуальним є застосування узагальнених підходів до архітектурного моделювання, які не залежать від конкретних нотацій або мов опису [107, 108].

У науковій та інженерній практиці сформувалося декілька базових підходів до моделювання архітектури, що відрізняються рівнем абстракції та аспектами системи, які вони відображають. Функціональний підхід розглядає обчислювальну систему як сукупність функцій або процесів, що виконують перетворення інформації. Такий підхід дає змогу зосередитися на логіці оброблення даних і є доцільним на початкових етапах аналізу предметної області [109].

За структурного підходу архітектуру системи описують через склад і взаємозв'язки її компонентів. У цьому випадку увага приділяється ідентифікації підсистем, модулів та інтерфейсів взаємодії між ними, що створює основу для подальшого детального проєктування і реалізації системи [107].

Для зменшення складності опису багатокomпонентних систем широко застосовується ієрархічний (рівневий) підхід, відповідно до якого архітектура поділяється на декілька рівнів абстракції. Така декомпозиція дає змогу розглядати апаратні, системні та прикладні аспекти незалежно один від одного, забезпечуючи узгодженість архітектурних рішень [110].

Окрему групу становлять поведінкові підходи до моделювання, орієнтовані на опис динамічних аспектів функціонування системи. У межах цих підходів аналізуються сценарії роботи, послідовності подій і взаємодія компонентів у часі, що є особливо важливим для розподілених та паралельних обчислювальних систем [111].

У сучасних дослідженнях значну увагу приділяють багатоподанному опису архітектури, коли систему розглядають з різних поглядів залежно від зацікавлених сторін і цілей аналізу. Такий підхід закріплено в міжнародному стандарті ISO/IEC/IEEE 42010, який визначає загальні принципи опису архітектури систем без прив'язки до конкретних мов або діаграм [112].

Розподіл подань за зацікавленими сторонами такий: функціональна модель адресована замовникові та фахівцям предметної області, які визначають склад етапів оброблення й точки експертного контролю; діаграми прецедентів і послідовностей — користувачам системи, для яких істотні сценарії роботи та порядок взаємодії компонентів; діаграми класів і розгортання — розробникам, відповідальним за реалізацію та супровід. Кожне подання відповідає на питання своєї групи й не дублює решту, чим і досягається повнота опису без надлишковості.

Для розроблюваної інформаційної технології застосовано поєднання підходів: функціональне подання реалізовано засобами IDEF0 (підрозділ 3.2), рівневу декомпозицію відображено тришаровою архітектурою системи, а

структурні та поведінкові аспекти описано засобами UML — діаграмами прецедентів, класів і послідовностей. Конкретні нотації архітектурного опису розглянуто в наступних пунктах.

3.3.2 Діаграма прецедентів

Діаграма прецедентів є одним із базових інструментів мови уніфікованого моделювання (UML) і використовується для формалізованого опису функціональних вимог до програмної системи з погляду зовнішніх користувачів [113, 114]. Вона дає змогу визначити основні сценарії використання системи, встановити межі її функціональності, а також ідентифікувати взаємодію між системою та зовнішніми акторами.

На відміну від функціональних моделей типу IDEF0, що орієнтовані на перетворення вхідних ресурсів у вихідні результати, діаграма прецедентів відображає поведінковий аспект системи, зосереджуючись на варіантах її використання в контексті взаємодії із зовнішнім середовищем [109, 112]. Такий підхід дає змогу узгодити функціональні вимоги із реальними сценаріями експлуатації програмного забезпечення та забезпечити цілісність архітектурного опису системи.

У межах розроблюваної інформаційної технології радіаційного картографування було виділено чотири основні типи акторів:

- користувач, який ініціює оброблення даних, задає параметри формування цифрової карти та здійснює перегляд результатів;
- науковий співробітник, який виконує аналіз якості отриманих результатів, вносить коригувальні параметри та приймає рішення щодо повторного виконання обчислень;
- дозиметрист, який забезпечує надання первинних вимірювальних даних;

— адміністратор, відповідальний за налаштування та супровід програмної системи.

Актори «користувач» і «адміністратор» належать до рівня експлуатації програмного забезпечення, тоді як функціональна модель процесу (підрозділ 3.2) деталізує ролі, безпосередньо задіяні в обробленні даних, — дозиметриста та наукового співробітника.

Основні прецеденти системи охоплюють повний цикл оброблення даних радіаційного моніторингу — від введення вимірювальної інформації до отримання та аналізу карти радіаційного забруднення. Зокрема, користувач здійснює завантаження вхідних даних, задає параметри формування цифрової карти та ініціює запуск оброблення даних. Результатом виконання відповідного сценарію є побудова карти радіаційного забруднення, яка може бути переглянута або експортована для подальшого використання.

Окрему роль у системі відіграє науковий співробітник, який забезпечує контроль якості отриманих результатів. На цьому етапі здійснюється аналіз сформованої цифрової карти з урахуванням вимірювань у контрольних точках. У разі необхідності вносяться коригувальні параметри, після чого виконується повторне оброблення даних. Такий підхід відповідає ітераційній природі задачі відновлення поля випромінювання та забезпечує підвищення точності отриманих результатів.

Важливим елементом моделі є взаємозв'язки між прецедентами. Зв'язки типу «include» використовуються для відображення обов'язкових підпроцесів, що виконуються в межах основного сценарію, зокрема завантаження даних і задання параметрів перед запуском оброблення. Зв'язки типу «extend» застосовуються для моделювання опційних або умовних сценаріїв, таких як експорт результатів або повторне оброблення даних після внесення коригувань [113].

Побудована діаграма прецедентів узгоджується з результатами функціонального моделювання, отриманими за допомогою IDEF0, а також із діаграмами декомпозиції системи. Зокрема, основні прецеденти відповідають виділеним функціональним етапам: збору та підготовці даних, їхньому

обчислювальному опрацюванні, контролю якості результатів та формуванню цифрової карти радіаційного забруднення. Крім того, діаграма узгоджується з розробленими діаграмами послідовностей, які деталізують внутрішню взаємодію програмних компонентів під час реалізації відповідних сценаріїв.

Відповідність між прецедентами та функціями моделі IDEF0 не є взаємно однозначною. Прецедент «Надати дані вимірювань» відповідає функції A1, прецеденти «Завантажити вхідні дані», «Задати параметри формування цифрової карти» і «Запустити оброблення даних» разом покривають функцію A2, «Перевірити та скоригувати результати» — функції A3 і A5, а «Переглянути карту радіаційного забруднення» та «Експортувати карту та результати» спираються на результат функції A4. Один функціональний блок розгортається в кілька сценаріїв: IDEF0 описує перетворення даних, а прецеденти — дії, які виконує людина.

Прецедент «Перевірити та скоригувати результати» єдиний замикає цикл. Він відповідає двом петлям зворотного зв'язку на діаграмі декомпозиції (додаток Г, рисунок Г.2) і робить роботу з системою ітераційною: науковий співробітник повертається до нього доти, доки розбіжність із контрольними точками не стане прийнятною. Решта сценаріїв виконується один раз за прохід.

Поділ на «користувача» і «наукового співробітника» відображає ролі, а не окремих осіб. На практиці обидві ролі може виконувати одна людина; розмежування потрібне, щоб відокремити рутинні операції із запуску розрахунку від рішень, які вимагають фахової оцінки радіаційної обстановки. Так само прецедент «Надати дані вимірювань» описує передавання результатів зйомки до системи, а не роботу дозиметриста з приладом — саме вимірювання лишається поза межами програмної системи.

Використання діаграми прецедентів дає змогу формалізувати функціональні можливості розроблюваної системи, визначити ролі користувачів і сценарії їх взаємодії із програмним забезпеченням, а також забезпечити узгодженість між різними рівнями архітектурного та функціонального опису системи.

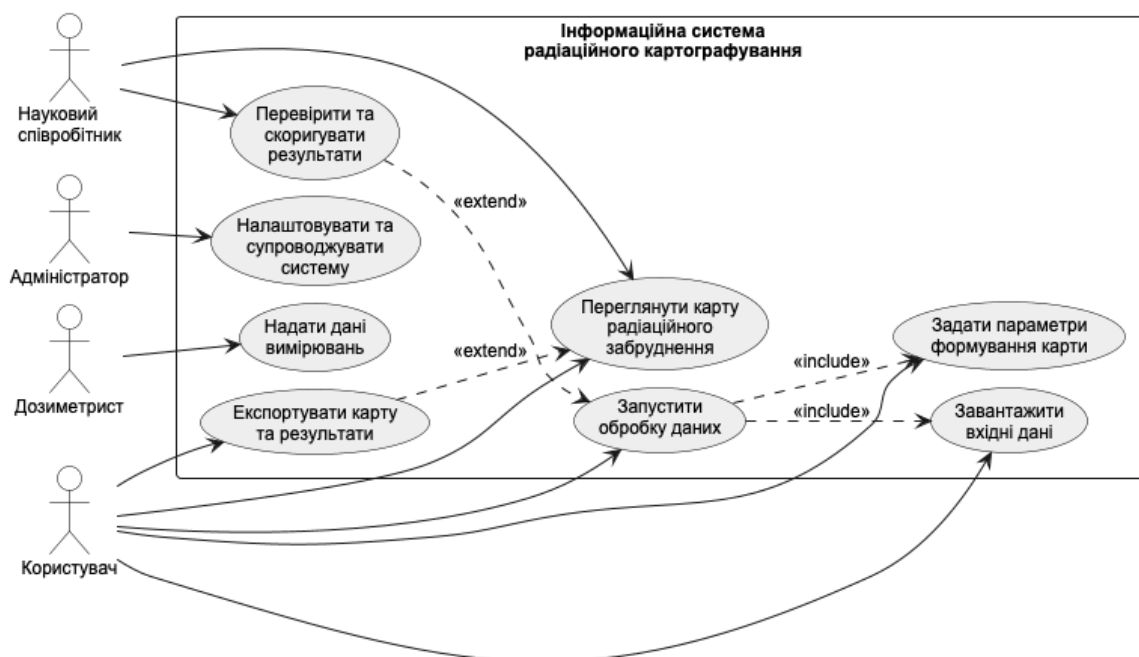


Рисунок 3.3 — Діаграма прецедентів

3.3.3 Діаграма послідовностей

Діаграма послідовностей описує взаємодію програмних компонентів та рух інформації між ними під час оброблення запитів користувача. На відміну від функціональних діаграм типу IDEF0, зосереджених на перетворенні ресурсів, тут основну увагу приділено послідовності обміну повідомленнями між компонентами програмного забезпечення.

Такий підхід відповідає сучасному розумінню архітектурного опису, згідно з яким архітектуру системи можна описати кількома поданнями, кожне з яких відображає окремі аспекти функціонування системи та орієнтоване на конкретні задачі аналізу [112]. Для опису взаємодії компонентів доцільно застосовувати діаграми послідовностей, які дають змогу наочно відобразити обмін повідомленнями в часовій послідовності [109, 111].

Розроблені діаграми послідовностей (додаток Г, рисунки Г.3 і Г.4) охоплюють два сценарії роботи технології:

1. формування та оновлення цифрової карти на основі вхідних даних (POST-запит);
2. відображення раніше згенерованого результату користувачеві (GET-запит).

Обидва сценарії відповідають прецедентам, визначеним у п. 3.3.2. POST-запит реалізує прецедент «Запустити оброблення даних» разом із включеними до нього «Завантажити вхідні дані» та «Задати параметри формування цифрової карти», а GET-запит — «Переглянути цифрову карту радіаційного забруднення». Для прецеденту «Перевірити та скоригувати результати» окремої діаграми не наведено: з погляду обміну повідомленнями він повторює перший сценарій зі зміненими параметрами.

Показано лише успішний перебіг сценаріїв. Оброблення помилкових ситуацій — відхилення некоректних вхідних даних та повторну доставку завдання після відмови обчислювального вузла — на них не показано, аби не перевантажувати опис; відповідні механізми розглянуто в п. 3.3.5.

Діаграми побудовано за допомогою інструмента PlantUML, який забезпечує текстоорієнтований опис UML-діаграм і автоматичну генерацію графічних подань, що спрощує супровід архітектурної документації та її інтеграцію з програмним кодом [115, 116].

Обидві діаграми оперують одним набором учасників взаємодії. Nginx і Gunicorn утворюють транспортну частину: перший приймає зовнішні з'єднання та віддає статичні ресурси, другий утримує пул робочих процесів Django. Сам Django перевіряє вхідні дані й формує завдання, не виконуючи обчислень. За чергою RabbitMQ починається обчислювальний компонент, який реконструює поле та будує цифрову карту, а результат лишається у файловому сховищі — спільній точці для обох рівнів.

У першому сценарії користувач ініціює HTTP POST-запит через клієнтський інтерфейс. Запит проходить через зворотний проксі-сервер Nginx, сервер застосунку Gunicorn та надходить до вебзастосунку Django, де виконують первинну валідацію даних. Подальше оброблення виконують асинхронно,

публікуючи завдання в чергу повідомлень RabbitMQ. Обчислювальний компонент, реалізований мовою Python, отримує завдання з черги та виконує оброблення даних із використанням бібліотек NumPy та Pandas. На основі оброблених даних формується інтерактивна цифрова карта у форматі HTML (HyperText Markup Language) за допомогою бібліотеки Plotly, після чого результат зберігається у файловому сховищі. Така організація потоку дає змогу відокремити вебрівень від ресурсомістких обчислень і підвищити масштабованість системи [107, 108].

Реконструкція поля еволюційним алгоритмом триває тисячі ітерацій і забирає хвилини, тоді як HTTP-з'єднання та робочий процес Gunicorn обмежені таймаутом у десятки секунд. Якби обчислення виконувалися в тому самому процесі, що й оброблення запиту, з'єднання розірвалося б раніше, ніж алгоритм завершить роботу. Тому Django лише реєструє завдання в черзі й повертає відповідь одразу, а готову цифрову карту користувач отримує окремим запитом.

Другий сценарій описує процес відображення результатів оброблення. Користувач ініціює HTTP GET-запит, який проходить аналогічний ланцюг компонентів (Nginx → Gunicorn → Django). Вебзастосунок отримує доступ до збереженого HTML-файлу та повертає його клієнту у вигляді HTTP-відповіді. Асинхронного оброблення на цьому етапі немає, тому затримки під час відображення результатів мінімальні.

Різниця між двома сценаріями зводиться до наявності черги. Результат оброблення зберігається як готовий HTML-файл, тому повторний перегляд не потребує ні звернення до RabbitMQ, ні перерахунку — вебзастосунок віддає вже сформований файл. Цифрова карта лишається доступною й тоді, коли обчислювальний компонент зупинено або перезапущено.

Такий розподіл обов'язків проводить межу між вебрівнем і обчислювальним рівнем. Вебрівень жодним чином не взаємодіє з еволюційним алгоритмом, а обчислювальний компонент не залежить від того, як саме надійшли дані — через вебінтерфейс, завантаження файлу чи потік від роботизованої платформи. Компоненти по різні боки черги можна замінювати незалежно: Plotly

на іншу бібліотеку візуалізації, Unicorn на інший сервер застосунків. Ця властивість визначила й вибір технологічного стеку, обґрунтований у підрозділі 3.4.

Формат результату також впливає з наведених діаграм. Обчислювальний компонент не повертає дані у відповідь на запит, а лишає готовий файл у сховищі, тому формат має бути самодостатнім — таким, що відкривається без додаткового програмного забезпечення на боці користувача. Інтерактивна цифрова карта, згенерована Plotly, цій умові відповідає: файл містить і самі дані, і засоби навігації ними.

Діаграма послідовностей забезпечує наочне подання робочих процесів системи, взаємодію її компонентів і рух даних між ними. Архітектурні та реалізаційні аспекти програмного забезпечення розглянуто в наступних пунктах розділу.

3.3.4 Діаграма класів

Діаграма класів є одним із ключових інструментів мови уніфікованого моделювання UML і використовується для опису статичної структури програмної системи, зокрема її основних класів, атрибутів, методів і взаємозв'язків між ними [113, 114]. Вона дає змогу формалізувати внутрішню організацію програмного забезпечення та слугує основою для подальшої реалізації й супроводу системи.

Побудова діаграми класів вимагає попереднього визначення рівня її деталізації, оскільки одна й та сама система може бути описана з різним ступенем наближення до програмного коду. Розрізняють концептуальне подання, яке оперує поняттями предметної області без урахування особливостей реалізації, рівень специфікації, що фіксує інтерфейси та зобов'язання класів, і рівень реалізації, на якому діаграма відтворює структуру коду з усіма службовими елементами [114]. У цій роботі використано рівень специфікації. Такий вибір

зумовлений характером розробки: обчислювальне ядро системи уточнювалося ітеративно протягом усього дослідження, і подання, прив'язане до конкретної реалізації, втрачало б відповідність коду вже після кількох циклів налаштування моделі. Рівень специфікації зберігає стійкість до подібних змін, оскільки описує розподіл зобов'язань, який залишається незмінним навіть за суттєвого перероблення внутрішньої логіки окремих класів.

На відміну від діаграми прецедентів, яка відображає взаємодію користувачів із системою, та діаграм послідовностей, що описують динаміку обміну повідомленнями, діаграма класів зосереджена на структурному аспекті системи та відображає її склад як сукупність взаємопов'язаних об'єктів [109].

У межах розроблюваної інформаційної технології радіаційного картографування структура програмного забезпечення подана у вигляді трьох логічних рівнів: предметної моделі, модулів оброблення даних та допоміжних компонентів.

Підставою для такого поділу слугує відмінність у характері змінності складових системи. Предметна модель відтворює фізичні сутності задачі — поверхню об'єкта «Укриття», множину дозиметричних вимірювань, шукані інтенсивності випромінювання — і залишається стабільною, доки не переглядається сама постановка задачі реконструкції. Модулі оброблення даних, навпаки, є основною областю експериментування: саме тут змінювалися методи формування початкової популяції, налаштовували оператори мутації та критерії зупинки, причому кожна така зміна не повинна була зачіпати подання предметної області. Допоміжні компоненти утворюють інфраструктурний шар, що обслуговує обидва попередні рівні, — зберігання результатів, конфігурування, візуалізацію та експорт. Групування класів за швидкістю їх зміни, а не за формальною функціональною ознакою, дало змогу локалізувати наслідки доопрацювань у межах одного рівня.

Залежності між рівнями мають односторонню спрямованість. Модулі оброблення даних звертаються до класів предметної моделі, тоді як зворотні посилання відсутні: предметна модель не має відомостей ані про еволюційний

алгоритм, ані про спосіб формування початкового наближення. Допоміжні компоненти не залежать від логіки обчислень і надають решті системи узагальнені операції збереження, конфігурування та подання результатів. Дотримання цього правила має практичний наслідок, істотний для дослідницької системи: обчислювальне ядро можна запускати ізольовано, без підсистеми візуалізації та бази даних, що використовувалося під час серійних розрахунків із різними значеннями параметрів моделі.

Нижче кожен із виділених рівнів розглядається окремо — від класів предметної області до інфраструктурних компонентів, — після чого аналізуються взаємозв'язки між ними та рішення, що забезпечують розширюваність структури.

3.3.4.1 Предметна модель даних

Основу системи становлять класи предметної області, що описують фізичну структуру задачі. Виділення цих класів впливає з формальної постановки, наведеної в підрозділі 2.1. Об'єкт «Укриття» подано там як сукупність ізотропних точкових гамма-джерел, розміщених на зовнішній оболонці конструкції, кожному з яких відповідає невідома активність; вимірювання утворюють скінченну множину «віртуальних детекторів» із зареєстрованими значеннями потужності дози, а зв'язок між цими множинами задають коефіцієнти ослаблення, що визначаються відстанню та наявністю екранування. Кожній зі складових математичного опису поставлено у відповідність окремий клас, завдяки чому програмна структура зіставляється зі співвідношеннями (2.2)–(2.4) безпосередньо, без проміжних шарів перетворення.

До складу предметної моделі системи входять три класи:

- клас Point представляє просторову точку (воксель) розрахункової області та містить координати (зокрема висоту, потрібну для перенесення

активності з площини сенсорів на поверхню об'єкта), значення активності, а також допоміжні параметри, що використовуються під час обчислень (додаток Д);

- клас `Sensor` описує дозиметричний сенсор: його координати, вимірює значення потужності дози та зв'язки з точками, які він «спостерігає» (додаток Е);

- клас `Surface` виконує роль агрегуючого контейнера, що об'єднує множину точок і сенсорів, а також забезпечує формування внутрішнього подання даних для подальшого оброблення (додаток Ж).

Клас `Point` відповідає точковому джерелу моделі й розрізняє два значення активності. Ця відмінність є принциповою для організації розрахунку. Реконструйована оцінка відповідає шуканій величині x_i системи (2.3). Атрибут `Activity` зберігає еталонне значення, відоме з незалежних джерел і незмінне протягом усього циклу обчислень, тоді як `ComputedActivity` містить поточну реконструйовану оцінку, що змінюється на кожній ітерації. Для переважної більшості точок еталонне значення відсутнє й дорівнює нулю — саме ці точки утворюють вектор шуканих величин. Додатково зберігається значення попередньої ітерації, необхідне для обчислення напрямку останньої успішної зміни, посилання на найближчий сенсор і унікальний ідентифікатор точки. Для економії пам'яті клас оголошено з фіксованим переліком атрибутів: за великої кількості точок розрахункової області відмова від динамічного словника атрибутів дає відчутне скорочення обсягу займаної пам'яті без втрати функціональності.

Координата висоти виділена як самостійний атрибут через особливість вихідних даних. Дозиметричні вимірювання виконано на фіксованому рівні покрівлі, тоді як реконструкція охоплює просторову область зі складним рельєфом, отриману з бінарних зрізів зображень. Наявність висоти в явному вигляді дає змогу коректно обчислити відстань від кожної точки до кожного сенсора, яка входить у знаменник співвідношень прямої моделі, а також виконати перенесення активності між рівнями. Координати зберігаються як цілі числа, оскільки розрахункова область є регулярною сіткою з одиничним кроком; наслідком такого подання є квантування відстаней, що для близько розташованих

пар точка — сенсор становить помітну частку самої відстані й враховується під час інтерпретації результатів.

Клас *Sensor* відповідає «віртуальному детектору» моделі й зберігає зареєстроване значення S_j як незмінну величину, чим принципово відрізняється від класу *Point*, де активність є шуканою. Попри збіг атрибутного складу — обидва класи містять просторові координати та числове значення — семантика цих величин у задачі протилежна, і об'єднання класів з розрізненням за ознакою типу приховало б цю відмінність, ускладнивши контроль за тим, які саме значення алгоритм має право змінювати. Крім координат і показань, кожен сенсор утримує перелік точок, що перебувають у межах його видимості, та перелік найближчих до нього точок. Зберігання переліку видимих точок для кожного сенсора замість повної матриці видимості істотно скорочує обсяг пам'яті: за прийнятого порогу видимості частка видимих пар становить незначну частину від їх загальної кількості.

На клас *Surface* покладено операції, що стосуються всієї сукупності даних і не можуть бути віднесені до окремої точки чи сенсора. Крім накопичення множин точок і сенсорів, він формує табличне подання задачі, у якому для кожної пари точка — сенсор обчислено масштабовану відстань та ознаку видимості, а для кожної точки визначено найближчий сенсор і його показання. Побудова цієї структури виконується одноразово, після завершення завантаження геометрії та вимірювань, і саме її результат надалі використовують модулі реконструкції. Перехід від об'єктного подання до табличного зумовлений вимогами до швидкодії: обчислення прогнозованих показань сенсорів повторюється на кожній ітерації еволюційного алгоритму, і виконання його над стовпцями числових масивів замість послідовного обходу сукупності об'єктів істотно скорочує час розрахунку. Об'єктне подання при цьому зберігається, оскільки воно залишається зручнішим для завантаження, перевірки та інтерпретації даних.

Визначення видимості реалізовано як наближення трасування променів, побудоване на групуванні точок за напрямками. Вектори зміщення від сенсора до кожної точки нормуються та дискретизуються, після чого точки, що потрапили в

один напрямковий інтервал, вважаються розташованими на одній лінії спостереження, і видимою серед них визнається лише найближча. Додатковою умовою є обмеження на квадрат відстані: точки, віддалені понад установлений поріг, виключаються з розгляду як такі, що вносять знехтувано малий внесок. Такий підхід поступається точному трасуванню за строгістю, проте його обчислювальна складність не залежить від складності геометрії об'єкта, що є визначальним за розмірності задачі, яка розглядається. Ознака видимості, що обчислюється для кожної пари джерел — детектор, безпосередньо реалізує розрізнення випадків у формулі (2.4): для екранованих джерел коефіцієнт ослаблення приймається нульовим, для решти — обернено пропорційним квадрату відстані.

Жоден із класів предметної моделі не містить відомостей про спосіб розв'язання задачі. Вони описують геометрію об'єкта, вимірювання та відношення між ними — тобто те, що залишається незмінним при заміні алгоритму реконструкції. Завдяки цьому предметну модель можна застосувати як з іншим методом відновлення розподілу, так і самостійно, для підготовки та перевірки вихідних даних без запуску розрахунку.

Між зазначеними класами встановлюються відношення композиції та асоціації: клас Surface містить множину об'єктів Point і Sensor, а кожна точка може бути пов'язана з найближчим сенсором. Така організація відображає просторову структуру задачі та забезпечує зручне представлення даних для чисельних методів.

3.3.4.2 Модулі оброблення та реконструкції

Алгоритмічна частина системи реалізована як окремі логічні компоненти, що відповідають за різні етапи реконструкції поля радіоактивності.

Межу між цими компонентами проведено за ознакою змінності. Етап формування початкового наближення був основним предметом експериментування в цій роботі: у підрозділі 2.4 розглянуто три різні методи його реалізації, і кожна з них потребувала самостійної перевірки на однакових вхідних даних. Обчислювальне ядро, навпаки, залишалося незмінним, оскільки зміна алгоритму пошуку одночасно зі зміною початкового наближення унеможливила б коректне зіставлення результатів. Виділення ініціалізації в окремий компонент із фіксованим інтерфейсом зробило таке зіставлення можливим: методи замінюють без втручання в логіку еволюційного пошуку, а всі відмінності в результатах пояснює саме спосіб побудови стартового наближення.

Початковий етап ініціалізації поля реалізується модулем Step0Init, який оцінює початковий розподіл активності на основі апіорної інформації про фізичний закон спадання інтенсивності з відстанню (обернення прямої моделі переносу). Цей етап формує стартове наближення для подальшої оптимізації і не замінює основного алгоритму реконструкції.

Компонент ініціалізації надає єдину операцію — формування вектора початкових активностей за наданим поданням задачі. Конкретний спосіб обчислення задає параметр конфігурації і відповідає методам, розглянутим у пунктах 2.4.1–2.4.3: випадковому заповненню в межах допустимого діапазону, оцінюванню на основі фізичного закону спадання інтенсивності та проєкції інтерполяційної карти вимірювань на поверхню моделі. Чинну реалізацію визначає значення параметра конфігурації на етапі запуску, тому заміна методу не потребує змін ані в обчислювальному ядрі, ані в предметній моделі.

Незалежно від обраного методу результат ініціалізації приводять до діапазону, заданого обмеженнями (2.5): від’ємні оцінки, що можуть виникати як побічний наслідок обчислень, обнулюють, а решта значень обмежується згори та знизу. Виконання цієї умови на виході компонента ініціалізації, а не на вході обчислювального ядра, звільняє ядро від перевірок, які довелося б повторювати на кожній ітерації, і водночас гарантує, що еволюційний пошук стартує з допустимої точки простору розв’язків.

Основний обчислювальний процес реалізується у модулі EvolutionaryReconstruction, який об'єднує функції оброблення даних, зокрема згладжування просторового розподілу, перерахунок значень у точках, оцінювання похибок і формування кінцевого результату. Важливою особливістю є ітераційний характер оброблення, що дає змогу поступово уточнювати розподіл активності на основі порівняння з вимірювальними даними.

Внутрішня будова обчислювального ядра відтворює структуру еволюційного циклу, наведену в алгоритмі 2.1. Кожній операції загальної схеми відповідає окрема функція: збурення поточного вектора активностей, обчислення прогнозованих показань детекторів за співвідношенням (2.2), оцінювання пристосованості як евклідової відстані між вектором прогнозованих і вектором зареєстрованих значень, прийняття або відкидання отриманого варіанта. Такий поділ дає змогу змінювати окремі складові пошуку — насамперед функції збурення — не зачіпаючи керуючої логіки циклу.

Підготовчий етап, що передує входженню в цикл, формує для кожного детектора масив індексів видимих йому точок та масив відповідних коефіцієнтів ослаблення. Ці структури не змінюються протягом усього розрахунку, оскільки геометрія задачі є сталою, а обчислення прогнозованого показання зводиться до підсумовування відношень активностей до коефіцієнтів за готовим набором індексів. Винесення вибірки за ознакою видимості за межі циклу є визначальним для швидкодії: за кількості ітерацій, що обчислюється тисячами, повторне формування цих вибірок на кожному кроці становило б основну частку часу розрахунку.

Стан обчислення описується трьома векторами однакової розмірності: поточним варіантом, до якого застосовано збурення, останнім прийнятим варіантом і різницею між двома послідовними прийнятими варіантами. Останній вектор фіксує напрямок останнього успішного покращення й використовується однією з функцій збурення для надання пошуку спрямованості: зміни, що раніше приводили до покращення, з більшою ймовірністю повторюються в тому самому напрямку. Зберігання прийнятого варіанта окремо від поточного дає змогу

повернутися до попереднього стану після відкинутого збурення без повторного обчислення. Збуренню підлягають лише компоненти з ненульовою активністю, що обмежує пошук областю, визначеною на етапі ініціалізації.

Окремою складовою ядра є механізм подолання застою. Послідовні відкидання збурень підраховуються, і при досягненні встановлених порогових значень виконуються дії, спрямовані на вихід з околу локального мінімуму: просторове згладжування розподілу різної інтенсивності та переміщення поточного варіанта в напрямку останнього успішного покращення. Логіку переходів між цими станами винесено окремо від обчислювальної частини циклу, що дає змогу змінювати порогові значення й перелік дій без його перебудови. Просторове згладжування реалізоване як самостійна операція над тривимірним розподілом і застосовується не лише в межах цього механізму, а й одноразово перед початком пошуку — для згладжування розривів, властивих результату ініціалізації, — та після його завершення, для усунення високочастотних коливань, що виникають унаслідок випадкового характеру збурень.

Обчислення показників якості реконструкції та журналювання ходу збіжності відокремлені від основного циклу й вмикаються параметрами конфігурації. Коли журналювання вимкнене, цикл виконується без додаткових операцій, тому наявність діагностичних засобів не впливає на швидкодію в робочих запусках. Записані значення показників на послідовних інтервалах ітерацій утворюють ряд, за яким побудовано графіки збіжності, наведені в підрозділі 4.3. Відтворюваність запусків забезпечується фіксацією початкового значення генераторів псевдовипадкових чисел, що задається в конфігурації: за однакового значення послідовність збурень повторюється точно, і різні методи ініціалізації порівнюються за ідентичних умов.

Критерій завершення пошуку реалізовано як обмеження за кількістю ітерацій, що задається конфігурацією. Такий вибір зумовлений характером збіжності — у міру наближення до межі, визначеної похибкою вхідних вимірювань, покращення стають настільки малими, що зупинка за порогом приросту спрацьовувала б випадково, залежно від конкретної послідовності

збурень. Значення обмеження визначено за результатами аналізу збіжності, наведеного в підрозділі 4.3.

Таке розділення на окремі модулі відповідає принципу розподілу відповідальності та сприяє підвищенню модульності й повторного використання програмного коду [109]. Практичним підтвердженням правильності проведених меж є те, що додавання третього методу ініціалізації звелось до реалізації однієї функції та внесення відповідного значення в конфігурацію, тоді як обчислювальне ядро й предметна модель залишилися без змін.

3.3.4.3 Допоміжні компоненти та подання даних

Для подання та оброблення чисельних даних у системі застосовано табличне подання у вигляді об'єктів типу `DataFrame`, що забезпечує ефективну роботу з багатовимірними наборами даних та інтеграцію з бібліотеками чисельних обчислень. Крім того, передбачено допоміжні компоненти для завантаження геометричної моделі та даних сенсорів, які формують вхідні дані для алгоритму.

Вибір табличного подання як основної структури для обчислень зумовлений характером операцій над даними. Реконструкція потребує багаторазового повторення однотипних дій над усією множиною точок: збурення активностей, обчислення прогнозованих показань, порівняння з попереднім станом. Об'єктне подання, зручне для завантаження та інтерпретації даних, вимагало б послідовного обходу сукупності екземплярів на кожній ітерації, тоді як табличне дає змогу виконати ту саму дію однією операцією над стовпцем. Числові стовпці таблиці зберігаються як однорідні масиви, тому операції над ними виконують засобами бібліотек чисельних обчислень без поелементного обходу.

У системі застосовано дві таблиці, що відповідають двом множинам предметної моделі. Таблиця точок містить просторові координати, еталонне

значення активності там, де воно відоме, поточну реконструйовану оцінку, останнє прийняте значення та різницю між двома послідовними прийнятими значеннями. Крім цього, для кожного детектора в ній зберігаються два похідні стовпці: коефіцієнт ослаблення для пари точка — детектор і логічна ознака видимості, що відповідає розрізненню випадків у формулі (2.4). Таблиця детекторів містить ідентифікатор, зареєстроване значення та поточне прогнозоване значення, обчислене за співвідношенням (2.2). Зв'язок між таблицями встановлюється через ідентифікатор детектора, що дає змогу зіставляти кожную точку з найближчим до неї детектором засобами самої таблиці.

Формування вхідних даних покладено на два незалежні компоненти. Перший відновлює геометрію об'єкта з набору бінарних зображень-зрізів, у яких зайняті ділянки простору позначено відповідним значенням пікселя. Отриманий тривимірний масив проріджується: точки, всі сусіди яких також є зайнятими, вважаються внутрішніми та вилучаються з подальшого розгляду, оскільки випромінювання від них не досягає зовнішніх детекторів і їхнє збереження лише збільшувало б розмірність задачі без впливу на результат. Додатково передбачено відсіювання рівнів, вертикальна відстань від яких до площини вимірювань сама по собі перевищує поріг видимості, — такі точки не можуть увійти до множини видимих для жодного детектора незалежно від їхнього горизонтального розташування.

Другий компонент відповідає за отримання дозиметричних вимірювань із зовнішнього джерела та їх приведення до внутрішнього подання системи. На нього покладено приведення координат із зовнішньої системи відліку, у якій виконувалися вимірювання, до системи координат моделі, перерахунок одиниць вимірювання, вилучення записів, визнаних недостовірними за результатами попереднього аналізу, а також упорядкування вимірювань за спаданням зареєстрованих значень. Останнє дає змогу обмежити розрахунок заданою кількістю детекторів, зберігши найбільш інформативні з них — ті, що відповідають ділянкам з найвищими рівнями випромінювання.

Обране подання має особливість, яку слід зазначити окремо. Для кожного детектора в таблиці точок відводяться два власні стовпці, а обсяг обчислень на кожній ітерації визначається кількістю пар точка — детектор, що перебувають у відношенні видимості. Оскільки цикл пошуку повторюється тисячі разів, саме ця величина, а не розмірність окремих структур даних, визначає тривалість розрахунку. Цим пояснюється доцільність згаданого вище обмеження підмножиною найбільш інформативних вимірювань: детектори з низькими зареєстрованими значеннями вносять незначну частку в цільову функцію, але збільшують вартість кожної ітерації нарівні з рештою.

Параметри системи зосереджено в єдиному модулі конфігурації, який є джерелом усіх числових величин, порогів і шляхів до наборів даних. Значення можуть бути перевизначені через зовнішній файл налаштувань або змінні середовища, що дає змогу змінювати умови обчислювального експерименту без внесення правок у код. Таке рішення має пряме відношення до відтворюваності результатів розділу 4: кожен запуск однозначно описується набором значень конфігурації, а не станом окремих модулів.

Окрему групу утворюють компоненти перевірки та діагностики. Перед початком обчислень виконується контроль узгодженості даних — належність координат точок межах розрахункової області та наявність усіх похідних стовпців для кожного детектора. Під час і після розрахунку обчислюються показники якості реконструкції, зокрема відхилення прогнозованих показань від зареєстрованих у розрізі окремих детекторів та за групами, виділеними за кількістю видимих точок. Виділення групи детекторів із недостатнім покриттям є істотним для коректної інтерпретації результатів: узагальнений показник по всій множині приховує той факт, що основний внесок у похибку дають детектори, розташовані на межі розрахункової області. Результати оброблення зберігаються у вигляді набору значень активності з прив'язкою до координат, журналу збіжності та інтерактивного тривимірного подання відновленого поля.

3.3.4.4 Взаємозв'язок компонентів

Зв'язки між класами відображають логіку оброблення даних. Геометрична модель і дані сенсорів використовуються для формування об'єкта Surface, який трансформується у табличне подання для подальшого оброблення. Модуль початкової ініціалізації (Step0Init) використовує ці дані для формування початкового наближення, після чого основний алгоритм (EvolutionaryReconstruction) виконує ітераційне уточнення розподілу активності.

Відношення, встановлені між класами, належать до трьох типів нотації UML.

Композицією подано зв'язок класу Surface із множинами точок і детекторів. Точки та детектори не мають самостійного існування поза сукупністю, якій вони належать: просторові координати кожного елемента набувають сенсу лише у спільній системі відліку, а обчислення коефіцієнтів ослаблення можливе тільки за наявності обох множин одночасно. Агрегуючий об'єкт створюється порожнім і наповнюється в міру завантаження вихідних даних, чим і зумовлена нижня межа кратності, що допускає відсутність елементів.

Асоціацією подано зв'язок точки з найближчим до неї детектором. Він встановлюється одноразово, під час формування табличного подання, і надалі залишається незмінним, оскільки визначається виключно геометрією задачі. Відношення є спрямованим: точка зберігає посилання на детектор, тоді як зворотне посилання на рівні структури класів не потрібне, бо перелік точок, доступних для спостереження, зберігається в самому детекторі як його властивість.

Відношення залежності утворюють чотири групи. Перша пов'язує компоненти завантаження з предметною моделлю: модуль відновлення геометрії формує агрегуючий об'єкт із набору вихідних зрізів, а модуль завантаження вимірювань створює детектори. Друга група пов'язує програмні компоненти з табличним поданням: агрегуючий клас будує його на основі наявних множин,

компонент ініціалізації заповнює в ньому початкові значення активності, а обчислювальне ядро виконує над ним ітераційне уточнення. Третя група відображає координуючу роль обчислювального ядра, яке звертається до решти компонентів у послідовності: завантаження геометрії та вимірювань, побудова табличного подання, ініціалізація, ітераційний пошук, оцінювання якості та збереження результату. Четверту групу утворюють залежності від модуля конфігурації, спільні для всіх компонентів оброблення та завантаження: кожен з них отримує звідти значення параметрів виконання, не залежачи від нього структурно.

Узагальнення в структурі класів не застосовується. Варіативність способу побудови початкового наближення реалізована параметризацією: компонент `Step0Init` надає єдину операцію ініціалізації, а конкретний метод з числа розглянутих у пунктах 2.4.1–2.4.3 задається значенням її параметра. Такий вибір зумовлений тим, що методи відрізняються лише способом обчислення початкових значень, маючи однакові вхідні дані та однакову форму результату, і не потребують власного стану. Введення ієрархії класів не додало б виразності опису, збільшивши кількість сутностей.

Табличне подання відіграє роль спільного посередника в обміні даними між компонентами. Замість безпосередніх зв'язків між модулем ініціалізації, обчислювальним ядром і предметною моделлю всі вони звертаються до єдиної структури, що містить поточний стан задачі. Наслідком є зменшення кількості прямих залежностей: компонент ініціалізації не потребує відомостей про алгоритм пошуку, а обчислювальне ядро не звертається до окремих точок і не залежить від внутрішнього подання предметної моделі.

Засоби діагностики й подання результатів винесено за межі обчислювального ядра. Оцінювання якості реконструкції, перевірка узгодженості вихідних даних, експорт відновленого поля та перерахунок активності на інший рівень висоти не беруть участі в ітераційному пошуку й можуть застосовуватися незалежно від нього — зокрема, для аналізу результатів, отриманих у попередніх запусках. Обчислювальне ядро звертається до них у визначених точках свого

виконання, проте зворотних залежностей не існує, тому склад цих засобів можна розширювати без впливу на алгоритм.

Перелік відношень із зазначенням їх типів і кратностей подано в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 — Відношення між класами системи

Джерело	Ціль	Тип відношення	Кратність
Surface	Point	Композиція	1 — 0..*
Surface	Sensor	Композиція	1 — 0..*
Point	Sensor	Асоціація (nearestSensor)	* — 0..1
GeometryModel	Surface	Залежність (формує)	—
SensorDataLoader	Sensor	Залежність (завантажує)	—
Surface	DataFrame	Залежність (будує подання)	—
Step0Init	DataFrame	Залежність (ініціалізує)	—
Step0Init	Sensor	Залежність (використовує вимірювання)	—
EvolutionaryReconstruction	Surface	Залежність (використовує)	—
EvolutionaryReconstruction	Step0Init	Залежність (викликає ініціалізацію)	—
EvolutionaryReconstruction	DataFrame	Залежність (обробляє)	—
EvolutionaryReconstruction	GeometryModel	Залежність (завантажує геометрію)	—
EvolutionaryReconstruction	SensorDataLoader	Залежність (завантажує детектори)	—
EvolutionaryReconstruction	Diagnostics	Залежність (оцінює якість)	—
EvolutionaryReconstruction	ResultProcessing	Залежність (зберігає результат)	—
Компоненти оброблення та завантаження	Configuration	Залежність (параметри)	—

Жодна з наведених залежностей не утворює циклу — граф зв'язків між компонентами є ациклічним. Це дає змогу створювати й перевіряти компоненти послідовно, від предметної моделі до обчислювального ядра, а кожен з них тестувати незалежно від тих, що від нього залежать.

Розподіл залежностей має однобічний характер: обчислювальне ядро є єдиним компонентом, обізнаним про склад системи в цілому, тоді як решта компонентів не має відомостей про нього. Предметна модель не залежить ані від способу ініціалізації, ані від алгоритму пошуку; компонент ініціалізації не залежить від обчислювального ядра, яке використовує його результат; модулі завантаження не залежать від жодного з компонентів оброблення. Наслідком є можливість самостійного використання нижніх рівнів: предметну модель разом із компонентами завантаження можна застосувати для підготовки й перевірки вихідних даних без запуску реконструкції.

Побудовану відповідно до наведеного опису діаграму класів подано в додатку Г (рисунок Г.5).

На діаграмі класи згруповано в три пакети відповідно до рівнів, розглянутих у пунктах 3.3.4.1–3.3.4.3. Належність класу до пакета визначає його роль у системі, а лінії, що перетинають межі пакетів, показують, які саме рівні взаємодіють безпосередньо.

Структура класів узгоджується з моделлю інформаційної технології, поданою на рисунку 3.1, та з функціональною моделлю додатка Г. Блокам оброблення відповідають виділені на діаграмі класів групи: підготовка вихідних даних забезпечується модулями відновлення геометрії та завантаження вимірювань разом з агрегуючим класом, формування початкового наближення — компонентом ініціалізації, ітераційне уточнення розподілу — обчислювальним ядром, а контроль якості та подання результатів — компонентами діагностики й оброблення результатів. Керуючі дуги функціональної моделі, що задають умови виконання, реалізовані як залежності від модуля конфігурації. Взаємодія об'єктів у часі, показана на діаграмах послідовностей у п. 3.3.3, спирається на ті самі

відношення: кожне повідомлення відповідає зв'язку, наявному в структурній моделі, і не потребує додаткових каналів обміну.

Діаграма класів відображає не лише статичну структуру програмної системи, а й логічну організацію обчислювального процесу, що узгоджується з функціональною моделлю, діаграмою декомпозиції та діаграмами послідовностей. Вона забезпечує формалізоване уявлення про склад програмного забезпечення та взаємодію її компонентів, що є важливим для обґрунтування архітектурних рішень і подальшої реалізації програмного забезпечення.

3.3.5 Діаграма розгортання

На діаграмі розгортання (рис. 3.4) наведено розподіл програмних компонентів за вузлами виконання. Виділено три вузли — вебсервер, обчислювальний вузол та сховище. Таку сегментацію зроблено свідомо: кожен із вузлів виконує функцію, яку можна масштабувати або замінювати незалежно. Вебсервер відповідає за мережеве приймання запитів і маршрутизацію (Nginx), їх оброблення на рівні застосунку (Gunicorn і Django, що надає REST API) та передачу завдань у чергу. Обчислювальний вузол несе на собі ресурсомістку частину — Python-процес, у якому працюють модулі Step0Init та EvolutionaryReconstruction, а також локальний брокер RabbitMQ, через який вебрівень ставить завдання у чергу. Сховище поєднує два складники: реляційну базу даних PostgreSQL для метаданих завдань (запит, статус виконання, часові мітки, довідники) та файлову систему для вхідних вимірювань (каталог measurements/, формати CSV (comma-separated values) або JSON (JavaScript Object Notation)) і згенерованих результатів оброблення (каталог results/, формати JSON та HTML).

Зовнішня взаємодія з системою відбувається за єдиною точкою входу — вебсервером. Фахівець працює через браузер, отримуючи інтерактивне подання

результатів; зовнішня інформаційна система (наприклад, платформа радіаційного моніторингу, у складі якої систему використано як обчислювальний модуль) взаємодіє тим самим REST API, але обмінюється структурованими даними. Такий розподіл відповідальності безпосередньо реалізує архітектурне позиціонування, обґрунтоване далі в підрозділі 3.4: обчислювальне ядро не знає, хто саме — людина-оператор чи інша система — ініціював запит, та не нав'язує конкретного способу подання результатів.

Ключовою особливістю наведеної схеми є асинхронний характер взаємодії між вебрівнем і обчислювальним вузлом. Тривалість реконструкції, що визначається кількістю ітерацій еволюційного пошуку, вимірюється хвилинами й унеможливорює оброблення запиту в межах одного з'єднання. Вебзастосунок формує завдання, публікує його в черзі та повертає клієнтові ідентифікатор, за яким той згодом отримує статус виконання й посилання на результат. Обчислювальний вузол споживає завдання з черги у власному темпі, а вебрівень залишається доступним для нових запитів незалежно від кількості поточних розрахунків.

Черга виконує ще дві функції, крім передавання завдань. Вона згладжує нерівномірність надходження запитів у періоди пікового навантаження і забезпечує їх збереження при відмові обчислювального вузла: завдання вважається виконаним лише після отримання підтвердження від робочого процесу, а за втрати з'єднання до цього моменту повертається в чергу для повторної доставки. Розміщення брокера на обчислювальному вузлі зумовлене тим, що обмін між ним і робочим процесом є найбільш інтенсивним каналом схеми, і локальне з'єднання виключає мережеві затримки на цій ділянці.

Асинхронна схема допускає збільшення пропускну здатності системи додаванням обчислювальних вузлів, що споживають ту саму чергу. Йдеться саме про одночасне опрацювання кількох незалежних завдань, а не про прискорення окремого розрахунку.

Поділ сховища на реляційну базу даних і файлову систему відповідає відмінності в характері даних, що зберігаються. Метадані завдань — параметри

запуску, статус, часові позначки, посилання на вихідні набори — мають регулярну структуру й потребують вибірки за умовами, для чого призначена система керування базами даних. Результати реконструкції є об’ємними масивами значень, до яких звертаються цілком; їх зберігання у файловій системі позбавляє базу даних зайвого навантаження, не даючи натомість переваг у швидкості доступу. Такий поділ спрощує й перенесення системи: набори вимірювань і результати копіюються засобами файлової системи, без вивантаження та відновлення бази даних.

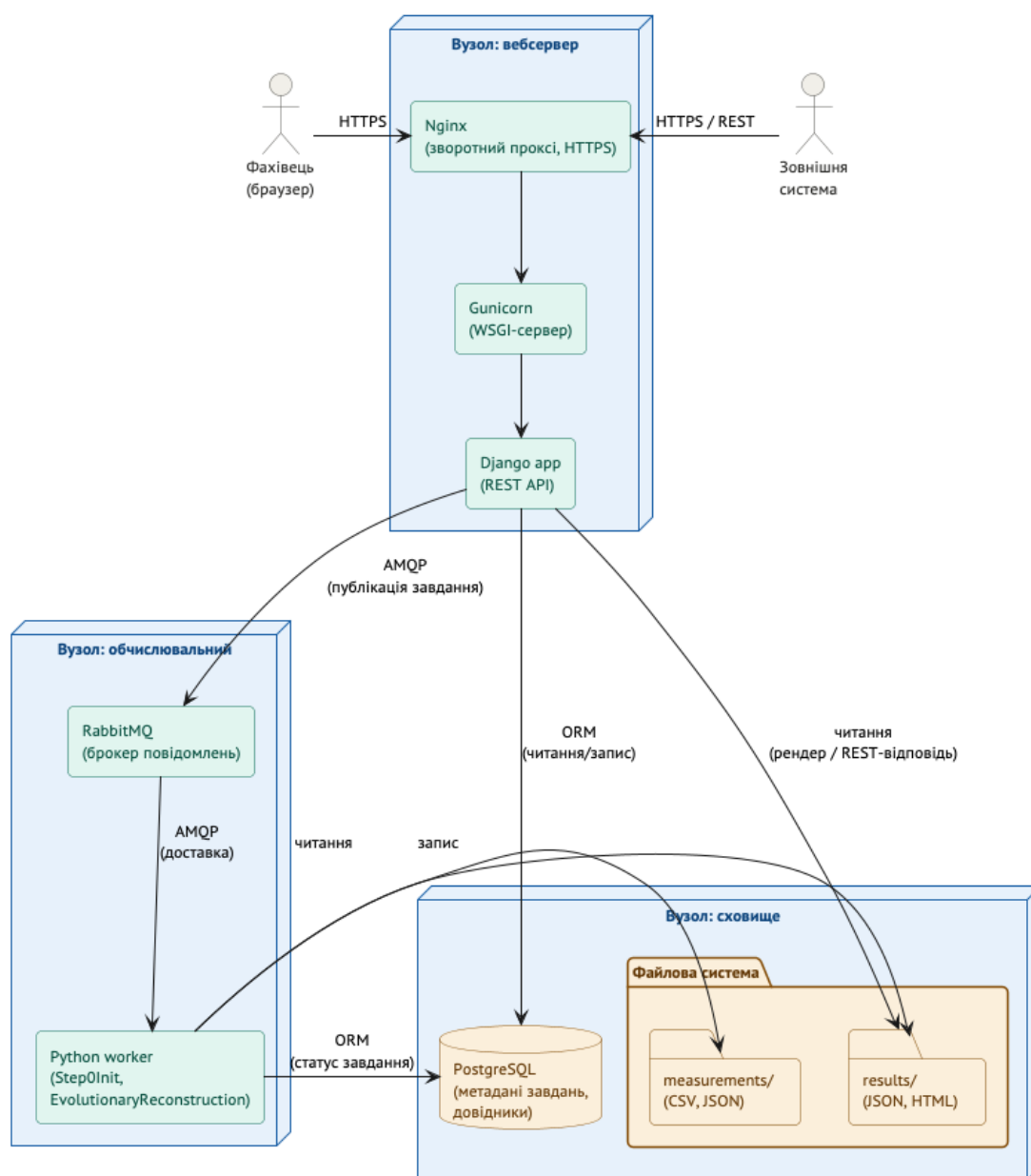


Рисунок 3.4 — Діаграма розгортання

3.4 Обґрунтування вибору технологічного стеку

Після визначення загальних підходів до моделювання архітектури обчислювальних систем доцільно розглянути технологічний стек, обраний для реалізації програмної системи. Вибір конкретних програмних компонентів і платформ безпосередньо впливає на архітектурні рішення, способи взаємодії між компонентами та можливість подальшого масштабування системи.

Добір компонентів здійснювався за кількома критеріями. Насамперед враховувалася відповідність характеру задачі, яка поєднує ресурсомісткі чисельні обчислення з мережевою взаємодією, а ці складові висувають різні вимоги до середовища виконання. Не менш істотними виявилися зрілість технології та наявність документації, оскільки супровід системи після завершення дослідження здійснюватиметься персоналом установи, яка її експлуатуватиме. Враховувалися також умови ліцензування, які мають допускати використання в державній установі без придбання комерційних ліцензій, і можливість точно зафіксувати версії компонентів та параметри запуску — без цього відтворення обчислювальних експериментів неможливе.

Вибір мови та середовища виконання є визначальним для решти рішень. Основне навантаження створює ітераційний цикл реконструкції, що потребує багаторазового виконання однотипних операцій над великими масивами чисел. Мова C++ забезпечує найвищу швидкість такого циклу, проте не має готових засобів для мережевої складової системи й істотно збільшує трудомісткість розробки та супроводу. Середовище MATLAB зручне для прототипування чисельних методів, але його комерційне ліцензування та обмежені можливості інтеграції з вебрівнем робили б систему замкненою. Мова Julia створювалася саме для подолання розриву між зручністю високорівневого запису та швидкістю компільованого коду [117], однак її екосистема вебзастосунків і засобів асинхронного оброблення поступається за зрілістю. Обрано мову Python, для якої критичні операції над масивами виконуються засобами бібліотек, реалізованих

компільованим кодом [118, 119], тому інтерпретатор не є вузьким місцем за умови векторизованого запису обчислень. На користь цього варіанта свідчить і те, що обчислювальний та мережевий складники реалізовано в одному середовищі. Це усуває передавання даних між компонентами, розробленими різними мовами, а разом із ним — і джерело помилок, пов'язаних із перетворенням форматів на межі між ними. Порівняння розглянутих варіантів наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Порівняння середовищ виконання обчислювальної частини

Варіант	Переваги	Обмеження щодо задачі
C++	Найвища швидкодія обчислювального циклу; повний контроль над використанням пам'яті	Відсутність готових засобів вебвзаємодії; висока трудомісткість розробки та супроводу
MATLAB	Розвинені засоби чисельних методів і візуалізації; швидке прототипування	Комерційне ліцензування; ускладнена інтеграція з вебрівнем і брокером повідомлень
Julia	Швидкодія, близька до компільованих мов, за високорівневого запису [117]	Менш зріла екосистема вебзастосунків і засобів асинхронного оброблення
Python + NumPy, Pandas	Векторизовані операції виконуються компільованим кодом [118, 119]; єдине середовище для обчислень і вебрівня; відкрита ліцензія	Втрата швидкодії на невекторизованих ділянках коду

Сучасні веборієнтовані обчислювальні системи, що виконують оброблення даних і формування результатів у вигляді інтерактивних візуалізацій, як правило, будуються на основі багаторівневої архітектури з розподілом відповідальності між рівнями доступу, прикладної логіки та обчислювального оброблення [107]. Такий підхід дає змогу ізолювати користувацький інтерфейс від ресурсомістких

обчислень. Програмна система реалізується з використанням стеку технологій, що включає вебсервер Nginx, сервер застосунку Gunicorn, вебфреймворк Django та брокер повідомлень RabbitMQ. Подібна архітектура відповідає загальноприйнятим підходам до побудови масштабованих серверних застосунків і широко використовується в промислових системах [108, 109]. Вебсервер Nginx використовується як зворотний проксі-сервер, що забезпечує приймання HTTP-запитів, маршрутизацію трафіку та взаємодію з сервером застосунку. Архітектура Nginx базується на подієво-орієнтованій моделі оброблення запитів, що забезпечує ефективну роботу з великою кількістю одночасних з'єднань і зменшує накладні витрати на оброблення мережевого трафіку [120, 121]. Для реалізації асинхронного оброблення даних у системі застосовується брокер повідомлень RabbitMQ, який реалізує модель обміну повідомленнями між програмними компонентами через черги. Використання брокера повідомлень відокремлює вебрівень від ресурсомістких обчислювальних процесів, підвищує стійкість системи до пікових навантажень та забезпечує масштабування обчислювальних компонентів [108, 122, 123].

Вибір саме брокера повідомлень, а не інших засобів організації асинхронного оброблення, зумовлений вимогами до гарантій доставки. Задача реконструкції виконується тривало, і втрата завдання внаслідок відмови обчислювального вузла означала б необхідність повторного введення вихідних даних оператором. Порівняльний аналіз RabbitMQ та Apache Kafka показує, що ці системи орієнтовані на різні класи задач: Kafka призначена для неперервних потоків подій із високою пропускнуою здатністю та збереженням історії повідомлень, тоді як RabbitMQ ефективніший у сценаріях розподілу окремих завдань між виконавцями з підтвердженням оброблення кожного з них [124]. Задача, що розглядається, належить саме до другого класу. Обмін між компонентами здійснюється за протоколом AMQP, специфікація якого є відкритою й підтримується кількома незалежними реалізаціями, тому прив'язка системи до конкретного продукту відсутня. Наявність механізму маршрутизації за окремими чергами додатково дає змогу розділити потоки завдань різного типу —

зокрема, повний розрахунок і попередній перегляд результату ініціалізації — та призначити для їх оброблення різні обчислювальні вузли. Розглянуті альтернативи наведено в таблиці 3.3.

Для збереження метаданих завдань і довідкової інформації використано реляційну базу даних PostgreSQL; взаємодія реалізована через Django Object-Relational Mapping (ORM), що усуває залежність коду прикладної логіки від конкретного діалекту SQL та дає змогу при потребі мігрувати на іншу сумісну СКБД.

Таблиця 3.3 — Порівняння засобів організації асинхронного оброблення

Варіант	Переваги	Обмеження щодо задачі
Виконання в окремому потоці вебзастосунку	Простота реалізації; відсутність додаткових компонентів	Втрата завдання при перезапуску вебсервера; конкуренція за ресурси з обробленням запитів
Redis як черга завдань	Мінімальні затримки; простота розгортання	Орієнтованість на кешування та структури даних у пам'яті; слабші гарантії доставки
Apache Kafka	Висока пропускна здатність; збереження історії повідомлень [124]	Надмірна складність для одиничних тривалих завдань; орієнтованість на неперервні потоки
RabbitMQ	Підтвердження оброблення та повторне надсилання; маршрутизація за чергами; незалежність вузлів [124]	Додатковий компонент, що потребує адміністрування

Вебрівень системи реалізовано з використанням фреймворку Django, архітектура якого базується на чіткому розподілі відповідальності між обробленням запитів, прикладною логікою та представленням результатів.

Оброблення HTTP-запитів здійснюється відповідно до стандарту Web Server Gateway Interface (WSGI), що дає змогу використовувати сервер застосунку Gunicorn у зв'язці зі зворотним проксі-сервером Nginx. Така архітектура є типовою для сучасних Python-орієнтованих вебзастосунків і рекомендується у сучасних практичних керівництвах та офіційній документації [125–128].

Оброблення вхідних даних і формування результатів у системі здійснюються з використанням бібліотек Python для чисельних обчислень і аналізу даних, зокрема NumPy та Pandas, які забезпечують ефективну роботу з багатовимірними масивами, табличними структурами та векторизованими операціями [119, 129]. Візуалізація результатів реалізується шляхом формування інтерактивних HTML-сторінок за допомогою бібліотеки Plotly, що підтримує побудову динамічних графіків і карт та дає змогу представити результати обчислень у зручному для користувача веборієнтованому вигляді [130]. Згенеровані результати зберігаються у файловому сховищі, що дає змогу повторно використовувати підготовлені візуалізації без повторного виконання ресурсомістких обчислень і зменшує час відповіді системи.

На етапі дослідницької розробки для збереження проміжних результатів застосовувалася вбудована база даних SQLite, що не потребує окремого сервера. Такий варіант виявився непридатним для цільової конфігурації, у якій до сховища одночасно звертаються вебзастосунок і обчислювальні вузли. SQLite допускає необмежену кількість одночасних читачів, але лише одного записувача в кожен момент часу, а розміщення бази даних на вузлі, відмінному від вузла застосунку, прямо не рекомендується розробниками [131]. Перехід до системи керування базами даних клієнт-серверного типу усуває це обмеження й додатково надає засоби контролю цілісності даних, що є істотним за наявності зв'язків між завданнями, наборами вихідних даних і результатами.

Обрана архітектура забезпечує модульність системи на рівні, що виходить за межі внутрішньої організації програмного коду. Модуль еволюційної реконструкції відокремлений від вебрівня через брокер повідомлень і не містить прив'язки до конкретного джерела вхідних даних або способу подання

результатів. На вхід приймається набір вимірювань із просторовими координатами у стандартному форматі, а на виході формується масив пар «координата — значення», які відповідають відновленому розподілу (за потреби перерахованому в ПЕД для побудови цифрової карти). Такий масив може бути далі трансформованим як в інтерактивну HTML-візуалізацію (базовий сценарій, реалізований у системі), так і у структуровану відповідь для зовнішніх клієнтів. Взаємодія з вебрівнем побудована за REST-принципом: POST-запит для надсилання вхідних даних та GET-запит для отримання результатів оброблення (додаток Г, рисунки Г.2 і Г.3). Таке розмежування обчислювального ядра й рівня подання створює два незалежні сценарії використання системи — як автономного інструмента з власним користувацьким інтерфейсом і як обчислювального компонента у складі зовнішніх систем радіаційного моніторингу.

Засоби візуалізації добиралися з урахуванням того, що результатом реконструкції є розподіл значень у тривимірному просторі, аналіз якого потребує обертання сцени та вибіркового перегляду окремих ділянок. Бібліотека Matplotlib дає зображення, придатне для друку [132], але не забезпечує такої взаємодії. Пакети наукової візуалізації VTK та ParaView переважають за можливостями роботи з великими обсягами просторових даних [133], проте потребують встановлення клієнтського програмного забезпечення на робочому місці користувача, що суперечить веборієнтованому характеру системи. Обране рішення формує самодостатню сторінку, яка відкривається у браузері без додаткових компонентів і зберігає інтерактивність після завантаження, що дає змогу передавати результати зовнішнім користувачам одним файлом.

Обраний технологічний стек забезпечує реалізацію багаторівневої архітектури програмного забезпечення та підтримує асинхронне оброблення даних, що узгоджується з функціональними та архітектурними моделями, поданими у підрозділах 3.2–3.3.

3.5 Висновки до розділу 3

У розділі описано проектування та реалізацію інформаційної технології радіаційного картографування, яка забезпечує повний цикл оброблення дозиметричних даних — від приймання вимірювань до побудови просторової цифрової карти радіаційного забруднення.

Запропоновану інформаційну технологію подано у вигляді багат шарової моделі, яка фіксує склад процесів оброблення інформації та послідовність перетворення даних — від первинних дозиметричних вимірювань до цифрової карти радіаційного забруднення і рішення, що ухвалюється на її основі. Межі між шарами визначено за типом перетворення, якого зазнають дані, тому модель не залежить від конкретної програмної реалізації та зберігається за будь-якого складу технічних засобів. Ядром моделі є шар оброблення, у якому вдосконалений еволюційний алгоритм виконує відновлення просторового розподілу активності за неповними вимірюваннями; решта шарів забезпечують його вхідними даними та доводять результат до споживача. Зворотний зв'язок від використання результату до планування наступних обстежень замикає контур і відображає безперервний характер оцінювання радіаційної обстановки.

Функціональну структуру інформаційної технології формалізовано за допомогою методу IDEF0. Контекстна діаграма визначає межі інформаційної технології та її зовнішні зв'язки; діаграма декомпозиції деталізує п'ять основних етапів оброблення: збір та підготовку даних, розрахунок рівнів забруднення еволюційним алгоритмом, контроль якості результатів, перенесення значень на модель місцевості та верифікацію побудованої цифрової карти. Передбачено зворотні зв'язки між етапами — зокрема, за результатами контролю якості можливе повторне виконання розрахунку зі скоригованими параметрами, що відповідає ітераційній природі задачі реконструкції.

Поведінковий аспект системи розкрито через діаграму прецедентів, яка ідентифікує чотири типи акторів (користувач, науковий співробітник,

дозиметрист, адміністратор) та відповідні сценарії взаємодії із системою. Діаграми послідовностей деталізують два ключові робочі процеси: асинхронне оброблення вхідних даних (POST-запит із публікацією завдання в чергу RabbitMQ) та відображення раніше підготовлених результатів (GET-запит). Відокремлення обчислювального рівня від вебрівня через брокер повідомлень забезпечує гарантовану доставку завдань за відмови обчислювального вузла та дає змогу нарощувати пропускну здатність системи додаванням обчислювальних вузлів. Такий приріст стосується кількості незалежних завдань, тоді як тривалість окремого розрахунку визначається ітераційною природою еволюційного пошуку й від кількості вузлів не залежить.

Статичну структуру програмного забезпечення відображено в діаграмі класів, де виділено три логічні рівні: предметну модель (класи Point, Sensor, Surface), модулі оброблення й реконструкції (Step0Init для початкового наближення, EvolutionaryReconstruction для ітераційного уточнення розподілу активності) та допоміжні компоненти — завантаження геометрії й вимірювань, табличне подання задачі, засоби діагностики та оброблення результатів. Діаграму побудовано на рівні специфікації, який фіксує зобов'язання класів і зв'язки між ними, залишаючи поза розглядом деталі реалізації, що змінювалися протягом дослідження. Варіативність способу побудови початкового наближення реалізовано параметризацією компонента Step0Init, який об'єднує методи, розглянуті в підрозділі 2.4, тому їх заміна не потребує змін в обчислювальному ядрі та предметній моделі. Табличне подання відіграє роль спільного посередника в обміні даними між компонентами, завдяки чому кількість прямих залежностей між ними залишається мінімальною.

Розподіл компонентів за вузлами виконання подано на діаграмі розгортання, де виділено вебсервер, обчислювальний вузол і сховище. Взаємодія між вебрівнем і обчислювальним вузлом побудована асинхронно: тривалість реконструкції унеможливорює оброблення запиту в межах одного з'єднання, тому завдання публікується в черзі, а клієнт отримує ідентифікатор для подальшого звернення за результатом. Сховище розділено за характером даних — метадані

завдань, що мають регулярну структуру й потребують вибірки за умовами, зберігаються в реляційній базі даних, тоді як об'ємні масиви значень відновленого поля розміщуються у файловій системі.

Обґрунтовано вибір технологічного стеку: Nginx як зворотний проксі-сервер, Gunicorn як WSGI-сервер, Django для прикладної логіки, RabbitMQ для асинхронного оброблення, PostgreSQL для зберігання метаданих завдань, NumPy і Pandas для чисельних обчислень, Plotly для інтерактивної візуалізації результатів. Кожен компонент обрано за результатами порівняння з альтернативами за критеріями відповідності характеру задачі, зрілості технології, умов ліцензування та відтворюваності обчислювальних експериментів. Усі складові стеку розповсюджуються на умовах відкритих ліцензій, що знімає обмеження як на впровадження системи в установі, так і на відтворення отриманих результатів сторонніми дослідниками. Така архітектура відповідає загальноприйнятим підходам до побудови багаторівневих веборієнтованих обчислювальних систем [107, 108] і забезпечує відтворюваність обчислювальних експериментів, що досягається зосередженням усіх параметрів запуску в модулі конфігурації та фіксацією стану генераторів псевдовипадкових чисел, а також наочність представлення результатів.

За функціональним призначенням розроблена інформаційна технологія становить обчислювальне ядро систем підтримки прийняття рішень: вона не замінює експерта з радіаційної безпеки, а надає йому кількісно обґрунтовану картину розподілу гамма-поля для планування робіт, маршрутизації робототехнічних систем і мінімізації дозових навантажень на персонал. Архітектурне розмежування між обчислювальним ядром і рівнем подання даних дає змогу використовувати інформаційну технологію у двох режимах: як самостійну СППР з власним вебінтерфейсом та як обчислювальний модуль, що інтегрується до складу інших інформаційних систем радіаційного моніторингу та підтримки прийняття рішень.

Основні результати розділу викладено автором у публікаціях [5, 134, 135].

РОЗДІЛ 4

ВЕРИФІКАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ НА РЕЗУЛЬТАТАХ ГАММА-ВИМІРЮВАНЬ НА ПОКРІВЛІ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

4.1 Отримання первинних даних для дослідження

Первинні дані для дослідження було отримано за допомогою системи основних кранів (СОК) НБК. СОК складається з двох мостових кранів, кожен з яких обладнаний двома візками з підйомними механізмами вантажопідйомністю 50 тонн — стандартним і «безпечним». Другий візок додатково оснащено аварійною лебідкою: вона гарантує утримання або контрольоване опускання вантажу у разі відмов, що критично важливо з огляду на обмежений доступ для ремонтних робіт усередині НБК. За синхронної роботи двох кранів можливі маніпуляції з вантажами масою до 100 тонн. Третій, додатковий візок несе мобільну технологічну платформу (МТП). У перспективі її планується оснастити роботизованим маніпулятором зі змінним інструментом для виконання ремонтних і демонтажних операцій.

Керування кранами та підйомними візками здійснюється спеціалізованою автоматизованою системою управління, яка забезпечує їхню узгоджену роботу в межах НБК. Довжина кожного мостового крана становить близько 96 м; кран переміщується по рейковій колії довжиною 150 м, прокладений під дахом будівлі НБК — безпосередньо над ОУ на висоті приблизно 80 м.

Детекторний прилад гамма-випромінювання вимірювального комплексу, розроблений групою дослідників за безпосередньої участі автора цієї роботи [5, 136], було розміщено саме на «безпечному» візку СОК. Його закріплено під підлогою візка з північного боку, з невеликим зміщенням відносно центральної осі руху, на рівні нижньої площини переміщення СОК. Така конфігурація екранує детектор конструкційними елементами крана згори, що зменшує вплив зовнішніх джерел випромінювання та мінімізує ефект відбиття гамма-променів від внутрішніх поверхонь НБК.

Вимірювальний комплекс, змонтований на СОК, включає інтелектуальний детектор гамма-випромінювання БДБГ-09 компанії ECOTEST® Group. Прилад інтегровано з одноплатним комп'ютером на базі ARM-процесора, який забезпечує збір, попереднє оброблення та збереження даних, а також обмін інформацією через захищений Wi-Fi-інтерфейс [5, 136].

Детектор БДБГ-09 дає змогу вимірювати ПЕД у діапазоні від 0,05 мкЗв/год до 10 Зв/год із відносною похибкою близько 17 % [136]. Завдяки своїй герметичності, широкому діапазону вимірювання, високій термостійкості та низькому енергоспоживанню, прилад широко застосовується на ядерних об'єктах України, Франції, Болгарії та Південної Кореї.

Зазначена відносна похибка визначає нижню межу точності, якої може досягти будь-який метод відновлення за цими даними, і надалі використовується як орієнтир при оцінюванні якості реконструкції.



Рисунок 4.1 — Розміщення приладу на безпечному візку СОК

Програмне забезпечення, розроблене спеціально для цього застосування, забезпечує інтерфейс взаємодії з інтелектуальним детектором, оброблення первинної інформації, накопичення даних у локальній базі (на випадок розриву

зв'язку), а також синхронізацію з інтегрованою системою радіаційного моніторингу НБК через зашифрований Wi-Fi-канал [5, 7]. Така архітектура гарантує безперервність отримання даних навіть у разі короточасних збоїв у роботі системи.

З метою усунення ризику втрати даних унаслідок нестабільного зв'язку з приладом усі вимірювання потужності дози дублювалися у внутрішню пам'ять пристрою та були доступні для зчитування після відновлення зв'язку. Безпосередню синхронізацію роботи пристрою з архівним сервером даних Інтегрованої системи керування (ІСК) НБК було забезпечено за допомогою єдиного NTP-сервера для пристрою та ІСК НБК (точного сервера часу з підтримкою мережевого протоколу синхронізації внутрішнього годинника комп'ютера в мережах зі змінною затримкою) [7].

Після встановлення пристрою персонал ЧАЕС переміщував безпечний візок СОК відповідно до запланованої програми випробувань. Траєкторію переміщення та часову діаграму експерименту наведено на рис. 4.2 та 4.3 відповідно.

Траєкторія відображає фактичні переміщення візка під час виконання програми випробувань, а не спеціально спланований маршрут радіаційного обстеження. Відповідно до цієї програми візок переміщувався між заданими позиціями, зупинявся для перевірки роботи механізмів і повертався до вихідного положення, тому щільність покриття площі виявилася істотно нерівномірною: над окремими ділянками візок проходив багаторазово, тоді як значні частини поверхні залишилися поза зоною його руху. Тривалість перебування над різними ділянками також відрізняється, що позначається на кількості показань, усереднених для кожного вузла сітки. Часова діаграма показує розподіл вимірювань у часі та дає змогу співвіднести окремі ділянки траєкторії з відповідними інтервалами спостереження. Саме ця нерегулярність і неповнота покриття, зумовлені підпорядкованістю рухів СОК технологічним завданням, а не потребам радіаційного обстеження, визначають характер вихідних даних, з якими надалі працюють методи відновлення просторового розподілу.

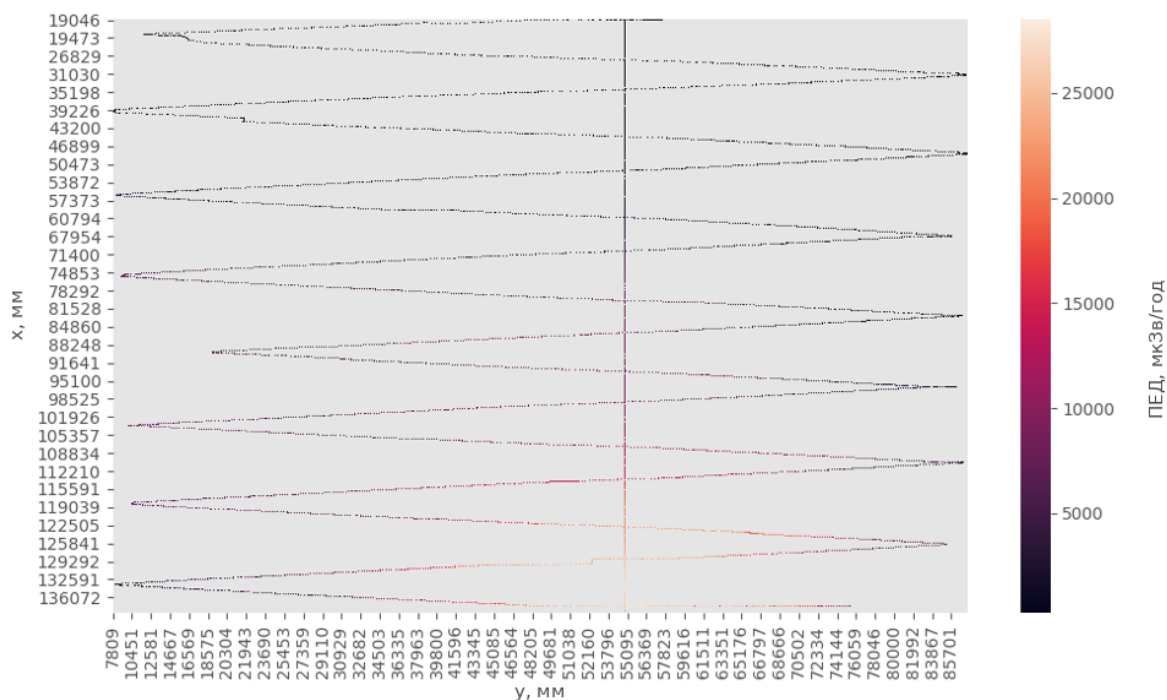


Рисунок 4.2 — Траєкторія переміщення сенсора над об'єктом «Укриття»

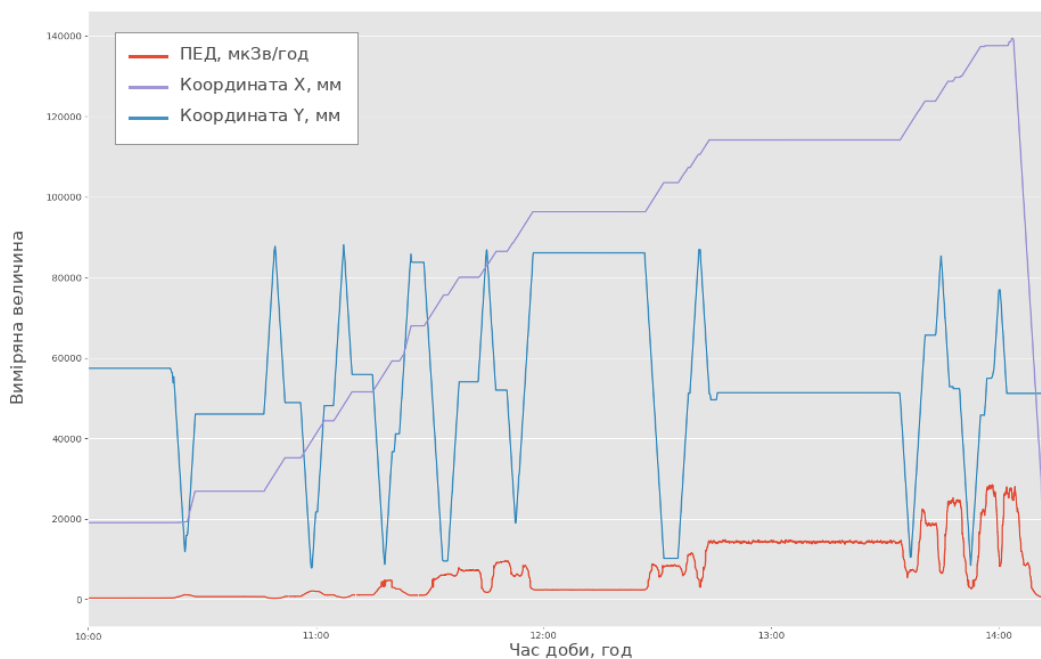


Рисунок 4.3 — Часова діаграма експерименту

Під час штатної роботи СОК детектор безперервно фіксував координати руху візка та відповідні значення потужності дози гамма-випромінювання. Отримані значення коливалися у межах від 230 мкЗв/год до 28 490 мкЗв/год. Ці

дані надходили до інтегрованої системи керування (ІСК) НБК і зберігалися в архіві історичного сервера.

Усі вимірювання проводилися в одній горизонтальній площині, що відповідає рівню розміщення кранів над об'єктом «Укриття».

Наслідком цього є двовимірний характер вихідного набору: безпосередньо спостережуваним є розподіл потужності дози на рівні переміщення візка, тоді як розташування джерел на поверхні об'єкта, що лежить нижче, залишається невідомим. Перехід від однієї величини до іншої засобами інтерполяції неможливий і потребує моделі формування поля, побудованої в розділі 2.

На основі отриманих даних було розроблено програмний модуль мовою Python, який дав змогу побудувати карту просторового розподілу потужності еквівалентної дози (ПЕД) над об'єктом «Укриття». Безпосередню візуалізацію виконано з використанням модуля Seaborn. Дані, одержані в описаний спосіб, було оброблено так:

1. Прямокутний сегмент у площині під СОК було поділено на квадрати зі стороною 1 метр. Кожному квадрату було надано координати (x, y) , що відповідають цілочисельній кількості метрів від початку системи координат СОК. Отримані точки розглядаються як вузли змодельованої сітки розподілу потужності дози над об'єктом «Укриття».

2. Якщо візок перебував над певним квадратом із координатами (x, y) протягом одного або кількох часових інтервалів t_i , то значення потужності дози для цього квадрата (D_{xy}) визначалося як середнє арифметичне показань детектора, отриманих на об'єднанні всіх зазначених часових інтервалів. Квадрат площею один квадратний метр із обчисленим значенням потужності дози в координатах (x, y) і розглядається як вузол інтерполяції, а пари $((x, y), D_{xy})$ — як базові точки даних.

3. За допомогою методів білінійної інтерполяції значення в інших вузлах змодельованої сітки обчислюються на основі відомих базових точок даних.

У результаті роботи алгоритму було отримано такі дані (рис. 4.4).

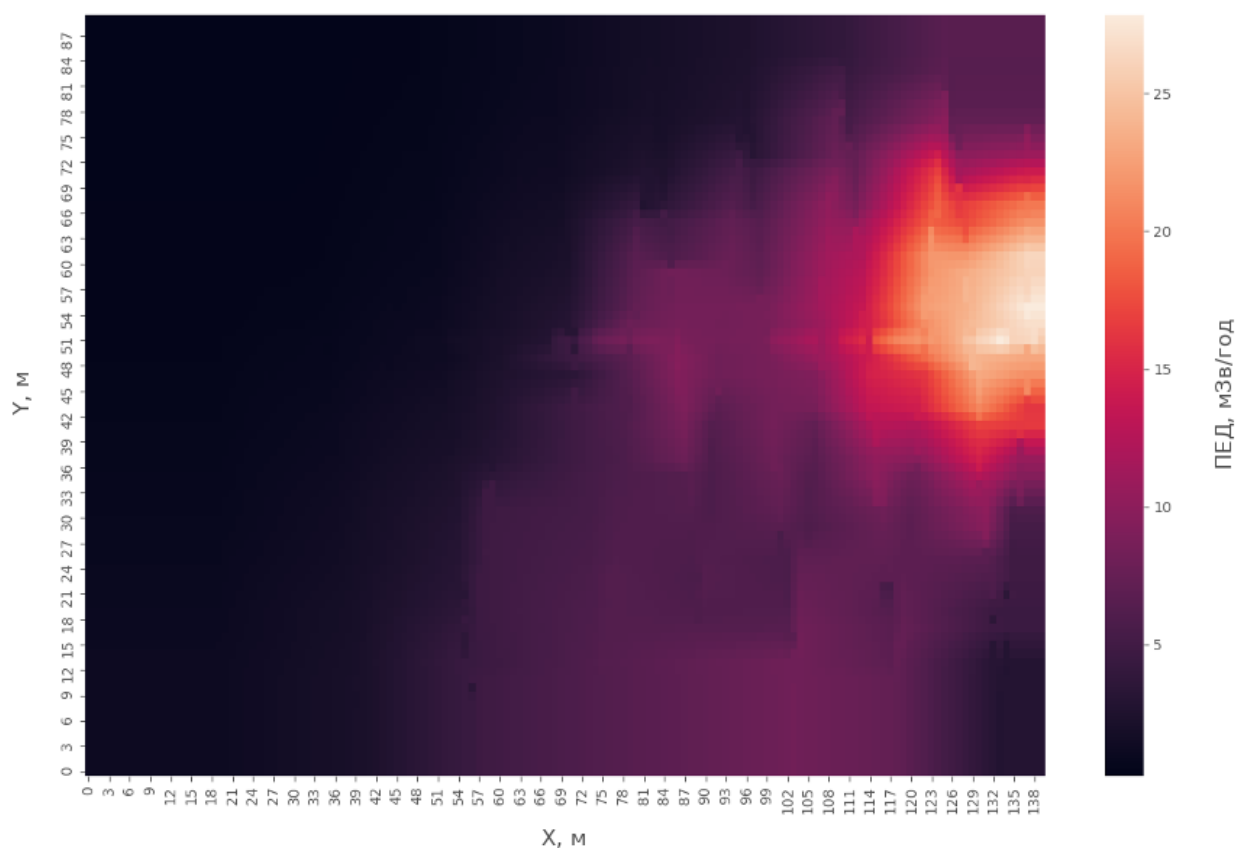


Рисунок 4.4 — Результати оброблення

Як видно з рисунка, розрахований розподіл потужності еквівалентної дози (ПЕД) має виражену форму у вигляді коливного «полум'я», причому контури коливань чітко пов'язані з траєкторією руху візка.

Детальний аналіз первинних результатів показав наявність 8-секундної затримки у показаннях детектора ПЕД типу БДБГ-09 [136]. Це призводить до того, що під час переміщення візка з «гарячої» зони в «холодну» «теплова» картина зміщується у «холодну» зону і навпаки. Така затримка є типовою для всіх детекторів із мікропроцесорним обробленням сигналу та зумовлена затримками оброблення сигналу і застосуванням числових фільтрів. Слід зазначити, що ефект запізнювання для штатного детектора системи радіаційного моніторингу НБК — GIM-204 — є більш суттєвим (близько 30 секунд за низької активності).

Кількісно ефект запізнювання виражається через просторове зміщення — показання, зареєстроване в певний момент, фактично відповідає положенню, яке візок займав вісьмома секундами раніше. Величина цього зміщення пропорційна

швидкості переміщення. Про те, що воно є співмірним із кроком сітки, свідчить сама наявність спостережуваного артефакту — за зміщення, меншого за розмір комірки, слід траєкторії на карті не проявився б. Показання «гарячої» зони приписуються при цьому ділянкам, які візок уже минув, що й формує контури «полум'я». Корекція зводиться до зсуву кожного показання назад за часом на величину затримки перед його прив'язкою до координат.

На підставі результатів довготривалих спостережень під час введення в експлуатацію за допомогою стаціонарних датчиків системи радіаційного моніторингу НБК, які свідчать про те, що ПЕД під покрівлю НБК перебуває у стабільному стані, а її зміни пов'язані лише з ефектом екранування під час переміщення СОК, було прийнято рішення об'єднати результати всіх «історичних» вимірювань. Об'єднаний результат вимірювань разом із траєкторією руху наведено на рис. 4.5.

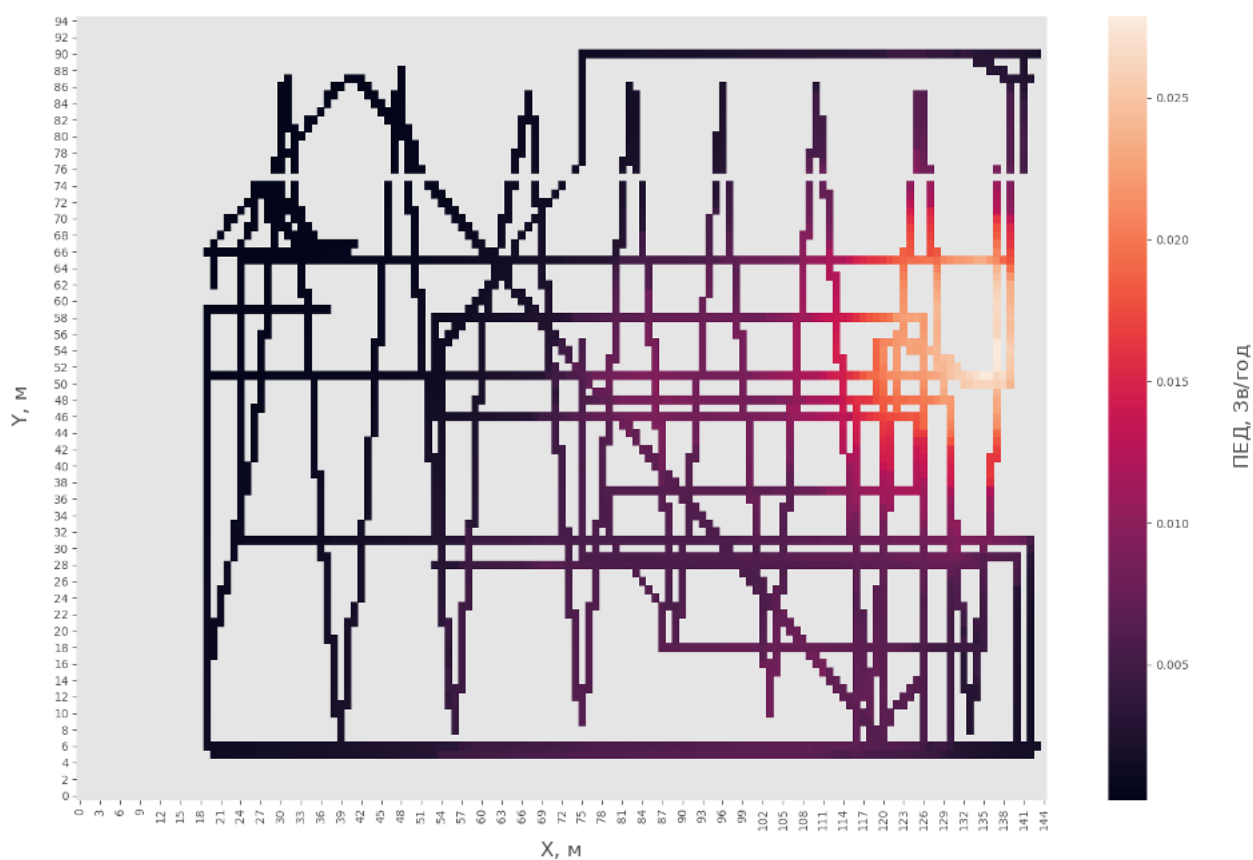


Рисунок 4.5 — Сумарна траєкторія датчика ПЕД за всі спостережувані часові інтервали

У такий спосіб було сформовано новий набір даних, до якого застосовано скоригований алгоритм побудови цифрової карти просторового розподілу ПЕД. Сутність змін алгоритму порівняно з описаним вище зводиться до корекції часу затримки показань ПЕД відносно фактичного положення візка та застосування різних методів інтерполяції відсутніх даних. При цьому слід зазначити, що обговорення «найкращого» методу інтерполяції виходить за межі цього дослідження.

Інтерполяція виконується методом ітеративного відновлення відсутніх даних із використанням найближчих сусідів, розташованих на однаковій відстані від точки, що відновлюється. Сутність методу інтерполяції зводиться до такого алгоритму:

1. Здійснюється пошук усіх точок, значення яких необхідно відновити.
2. Для кожної такої точки визначаються найближчі сусіди, розташовані на заданій відстані. Сусідами точки вважаються 8 комірок, що оточують її у вікні розміром 3×3 (квадратна матриця з 9 комірок, де центральна — відновлювана точка). Ці значення утворюють вибірку для подальшого оброблення.
3. Значення відновлюваної точки обчислюється як статистика її вибірки залежно від кількості наявних сусідів: якщо сусідів не менше 7, береться медіана вибірки; якщо від 3 до 6 — середнє арифметичне. Якщо сусідів менше ніж три, точка пропускається до наступної ітерації.
4. Алгоритм повторюється доти, доки не буде відновлено всі відсутні точки.
5. Після відновлення всіх відсутніх точок до всієї цифрової карти застосовується фільтр гаусівського розмиття з радіусом 1.

Підсумкова розрахована теплова карта розподілу ПЕД над ОУ після насування НБК наведена на рис. 4.6.

Порівняно з первинним результатом на цифровій карті відсутні сліди траєкторії руху візка: корекція часу запізнювання усунула зміщення показань відносно фактичного положення детектора, а ітеративне відновлення відсутніх значень із подальшим згладжуванням дало неперервний розподіл. Водночас

ділянки, над якими візок не проходив, відновлено виключно інтерполяційно, тому достовірність значень на них нижча, ніж у зоні безпосередніх вимірювань.

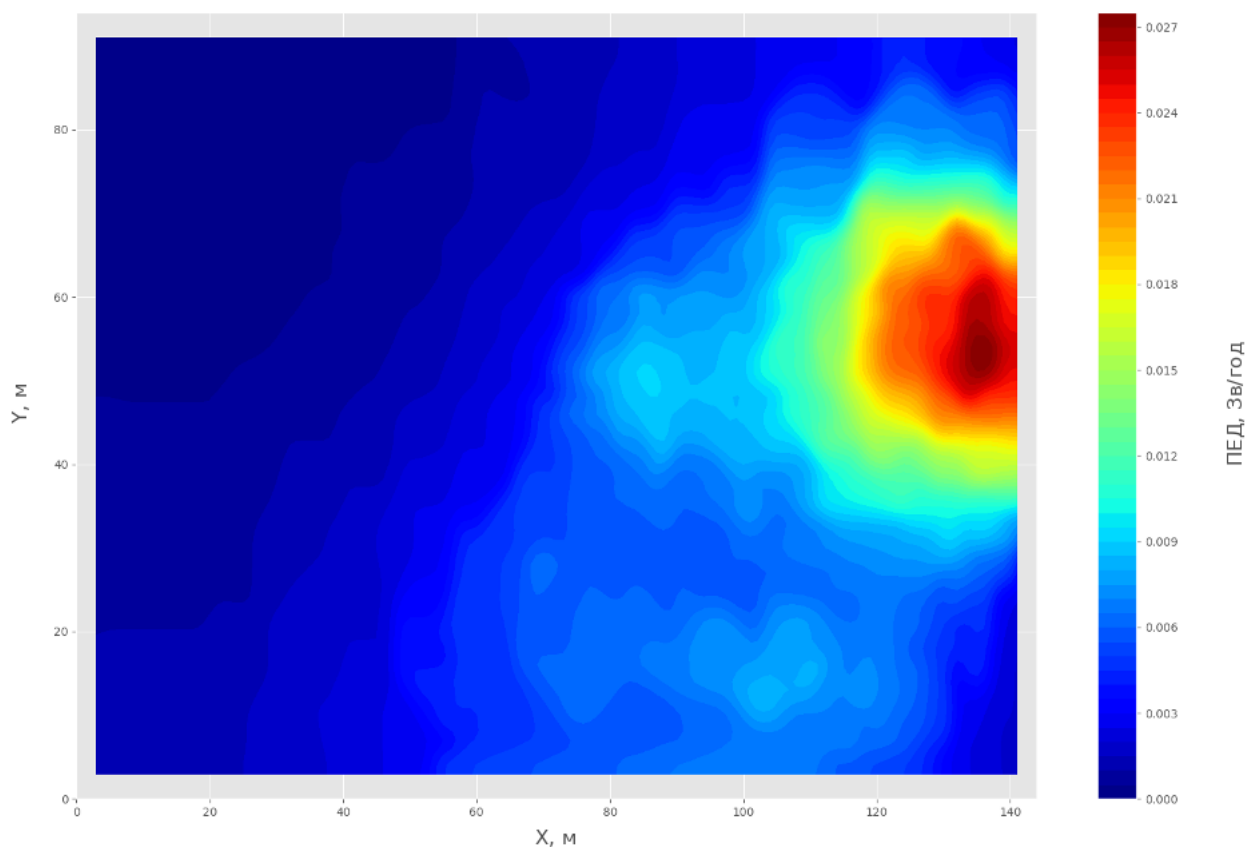


Рисунок 4.6 — Розрахована «теплова карта» розподілу ПЕД над ОУ після насування НБК відповідно до наведеного вище алгоритму

Слід зазначити, що існують різні типи інтерполяції, а сама проблема вибору «найкращого» способу інтерполяції даних ПЕД за вимірюваннями у хаотичній мережі моніторингу потребує окремих досліджень.

Отриманий результат було інтегровано з наявною 3D-моделлю системи ОУ–НБК. Результат такої візуалізації наведено на рис. 4.7. Як і очікувалося, зона з найбільшою потужністю гамма-випромінювання розташована поблизу західної частини ОУ.

Це легко пояснюється найменшою відстанню між датчиком і конструкціями ОУ під час проведення вимірювань, а також тим, що під час очищення покрівлі ЧАЕС одразу після аварії найбільші та найбільш радіоактивно забруднені (понад

1 000 Р/год, 1 Р/год $\approx 8,7$ мЗв/год) фрагменти активної зони реактора, виявлені на покрівлі, були скинуті в розлом 4-го енергоблока саме з цього боку.

Можна зазначити, що отримані результати якісно узгоджуються з наявними дослідженнями розподілу ПЕД на покрівлях ОУ, датованими 2002 роком [137].

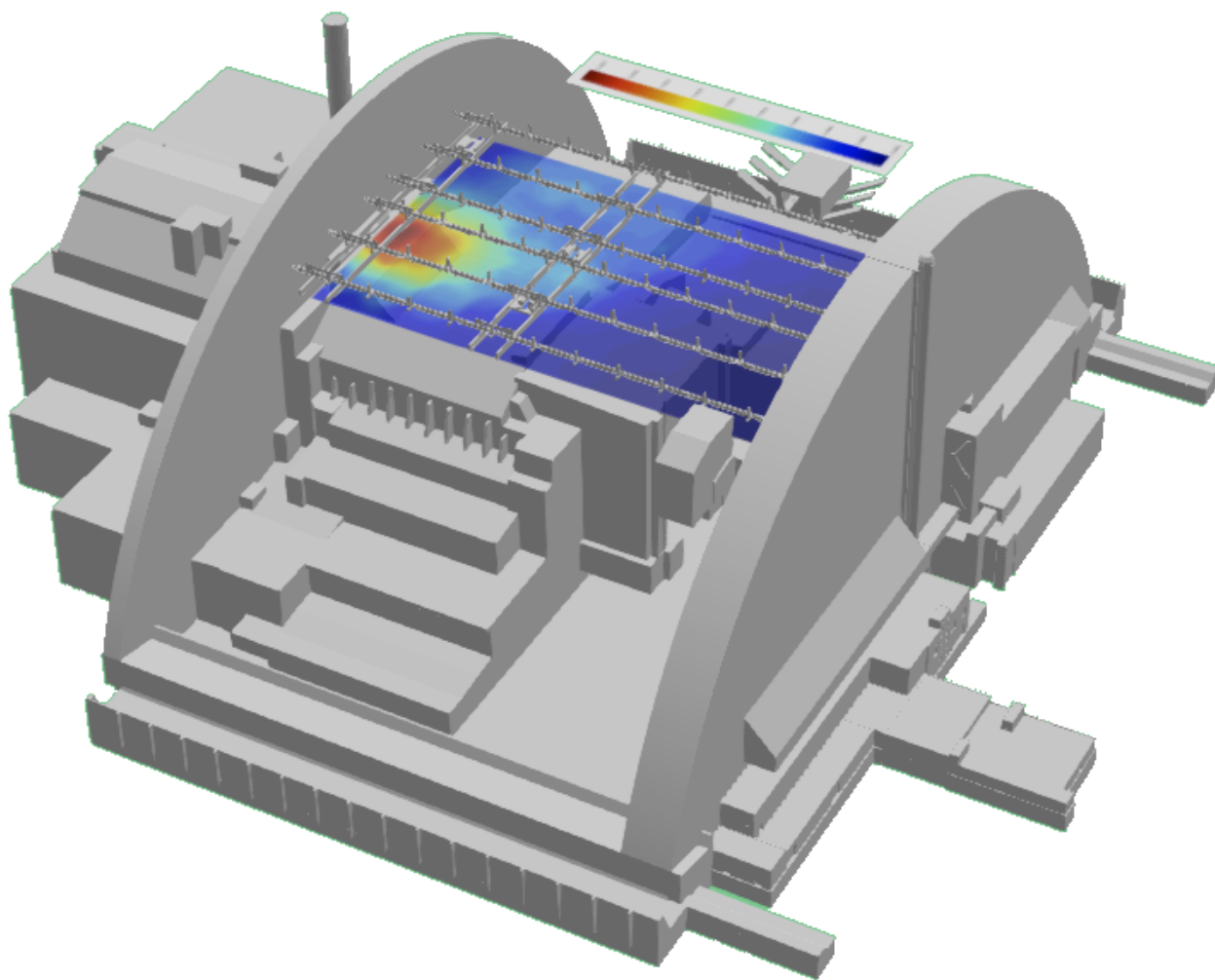


Рисунок 4.7 — Розрахована «теплова карта» розподілу ПЕД над ОУ, накладена на 3D-модель системи ОУ–НБК

Отже, було сформовано просторовий розподіл ПЕД на рівні обладнання СОК [5].

4.2 Реконструкція радіаційного фону на покрівлі ОУ згідно з ініціалізацією початкової популяції на основі фізичних законів

Як зазначено в розділі 2, гамма-випромінювання від об'єкта «Укриття» представлено у вигляді спрощеної моделі, як сукупність ізотропних точкових гамма-джерел, розташованих на зовнішній оболонці ОУ з однаковим просторовим кроком 1 м, а сам детектор — неколімований і всеспрямований. Моделювання не враховує складний ефект повторного відбиття гамма-квантів від зовнішньої оболонки НБК, оскільки реальний детектор екранований від такого вторинного випромінювання конструкцією крана.

Поверхнева модель, описана в розділі 2, охоплює всю зовнішню оболонку ОУ, проте в цьому експерименті реконструкцію виконано для покрівлі. Такий обсяг зумовлений геометрією вимірювань: дані збиралися детектором, що переміщувався під СОК у горизонтальній площині над дахом, і відновлюють розподіл джерел саме на покрівлі. Контрольні наземні точки, за якими результат можна перевірити (підрозділ 4.3), наявні лише в цій зоні, тому покрівля є областю верифікації методу, а не межею його застосовності.

Для кожного квадратного метра у зазначеній площині руху СОК було призначено координати (x, y) , де обидві координати є цілими числами, що відповідають відстані в метрах від початку координат системи СОК. Якщо візок СОК проходив через певну комірку з координатами (x, y) , усі значення ПЕД, зафіксовані в цій точці, зберігалися. Потім для кожної такої точки обчислювалося середнє арифметичне значення, позначене як γ_{xy} .

Кожне середнє значення γ_{xy} розглядалося як показник «віртуального детектора» $S_j(x, y)$, який характеризує гамма-фон у цій позиції.

Рисунок 4.8 ілюструє результат 7000 ітерацій описаного вище алгоритму з візуалізацією за допомогою бібліотеки тривимірної візуалізації Mayavi для мови програмування Python [138]. Кожне змодельоване точкове джерело на оболонці об'єкта «Укриття» подано у вигляді віртуальних кубів із довжиною ребра 1 м.

Колір куба відображає значення активності в діапазоні від синього (низьке) до червоного (високе).

«Віртуальні детектори» зображені у формі сфер з умовним діаметром 0,75 м, при цьому колір сфери також кодується в діапазоні від синього до червоного відповідно до зростання потужності дози.

Якість реалізації запропонованого алгоритму оцінювали, порівнюючи виміряні датчиком значення ПЕД S_j у координатах (x, y) із відповідними значеннями $\widehat{S}_j$, обчисленими за відновленим розподілом активності джерел. Порівняння виконували як для окремих точок, так і для масивів вимірювань у цілому.

Як показники якості для масивів значень активності використовувалися: похибка апроксимації σ_{approx} (4.1), середня абсолютна відсоткова похибка (САВП) (4.2), надійність апроксимації $R_{S_j, \widehat{S}_j}^2$ (4.3):

$$\sigma_{approx} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (S_j - \widehat{S}_j)^2}{(n - m)}}, \quad (4.1)$$

де n — обсяг досліджуваного масиву, а m — кількість параметрів у моделі (2.2).

$$\text{САВП} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{S_j - \widehat{S}_j}{S_j} \right| \times 100\%, \quad (4.2)$$

$$R_{S_j, \widehat{S}_j}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (S_j - \widehat{S}_j)^2}{\sum_{j=1}^n (S_j - \bar{S}_j)^2}, \quad (4.3)$$

де $\bar{S}_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j$ — середнє арифметичне значень активності, виміряних датчиком.

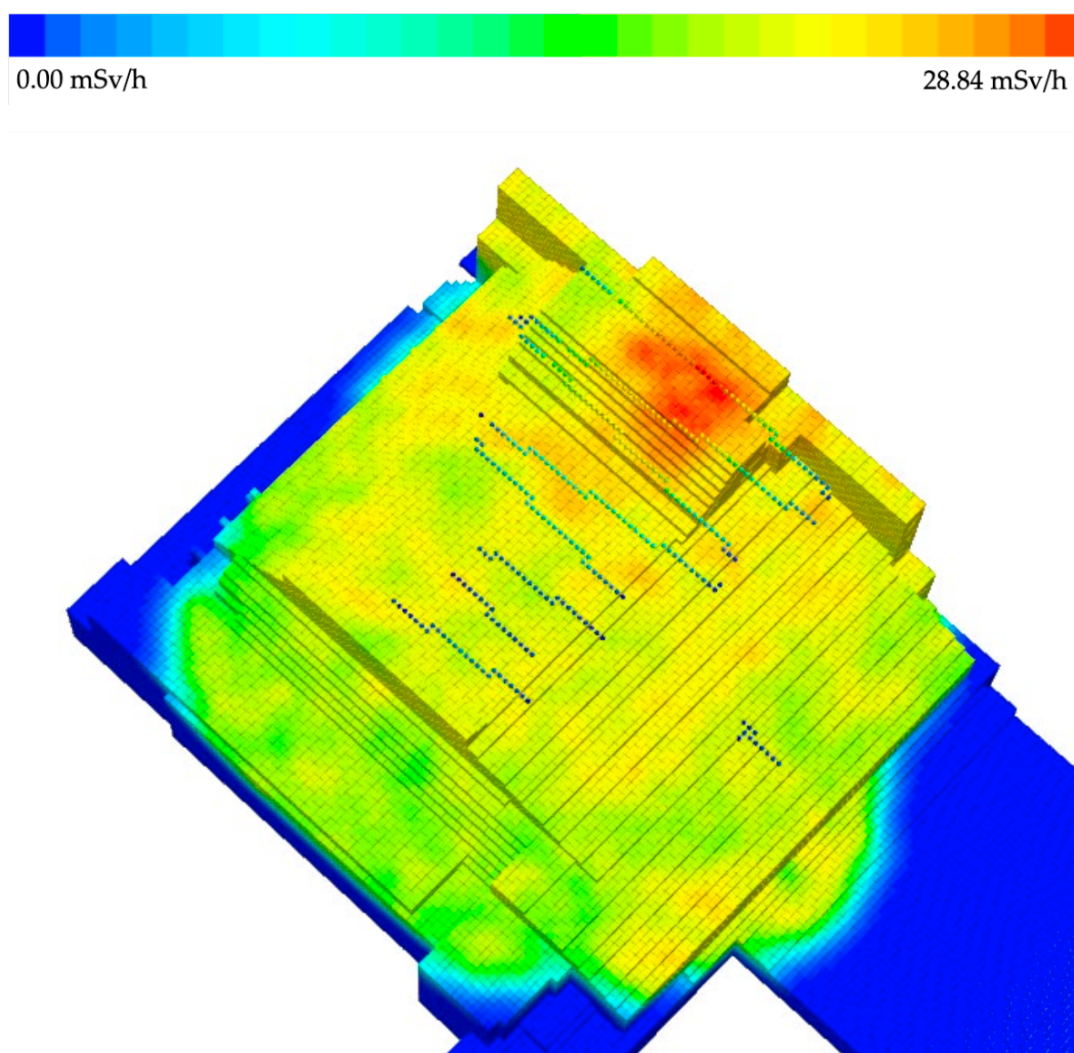


Рисунок 4.8 — Результат 7000 ітерацій еволюційного алгоритму, що формує кольорову цифрову карту рівнів радіації на покрівлі об'єкта «Укриття»

Для оцінювання збіжності та якості реконструкції у цьому підрозділі використано показники узгодженості обчислених і вимірених значень — σ_{approx} , САВП і R^2 . САВП обрано як основний: він простий для інтерпретації, має усталену шкалу оцінювання якості та не залежить від масштабу вимірюваних величин, на відміну від абсолютних оцінок. Показник σ_{approx} характеризує абсолютну нев'язку між виміреними та обчисленими значеннями, а R^2 — частку поясненої дисперсії.

Метрики похибки на незалежній вибірці контрольних наземних точок — середню абсолютну похибку (САП), середньоквадратичну похибку (СКП) та

систематичне зміщення (СЗ), — за якими виконано остаточну верифікацію методу й порівняння методів ініціалізації, розглянуто в підрозділі 4.3.

Залежність трьох показників якості — похибки апроксимації σ_{approx} , САВП та надійності апроксимації R^2 — від кількості ітерацій наведено на рисунку 4.9. Похибку апроксимації використано не лише як показник якості моделі, а й для контролю кількості ітерацій: стабілізація похибки свідчить про завершення роботи алгоритму. Усі три показники обчислюються на однакових інтервалах ітерацій і за тією самою множиною «віртуальних детекторів», тому криві збіжності, побудовані для різних методів ініціалізації, є безпосередньо зіставними — це зіставлення використано в підрозділі 4.3.

Показник R^2 характеризує, наскільки модель реконструкції краще відтворює виміряні значення порівняно з тривіальною моделлю, що містить лише константу (середнє). У цій роботі R^2 показує частку дисперсії вимірянних значень, відтворену моделлю.

Спільне використання трьох показників зумовлене тим, що кожен із них має власні обмеження. САВП, спираючись на відносні відхилення, надає надмірної ваги вимірюванням із малими значеннями, для яких навіть незначне абсолютне відхилення дає високий відсоток похибки. Похибка апроксимації, навпаки, визначається переважно ділянками з високими рівнями випромінювання. Надійність апроксимації залишається високою й за наявності систематичного зміщення, однакового для всіх точок.

Слід підкреслити, що всі три показники обчислюються за тією самою множиною «віртуальних детекторів», яка формує цільову функцію, і характеризують узгодженість відновленого розподілу з вихідними даними, а не його відповідність фактичному радіаційному полю. Розрізнення цих властивостей є принциповим: висока узгодженість із вимірюваннями може досягатися розв'язком, який відтворює показання детекторів, не відповідаючи дійсному розташуванню джерел. Тому остаточну перевірку методу винесено на незалежну вибірку контрольних наземних точок, розглянуту в підрозділі 4.3.

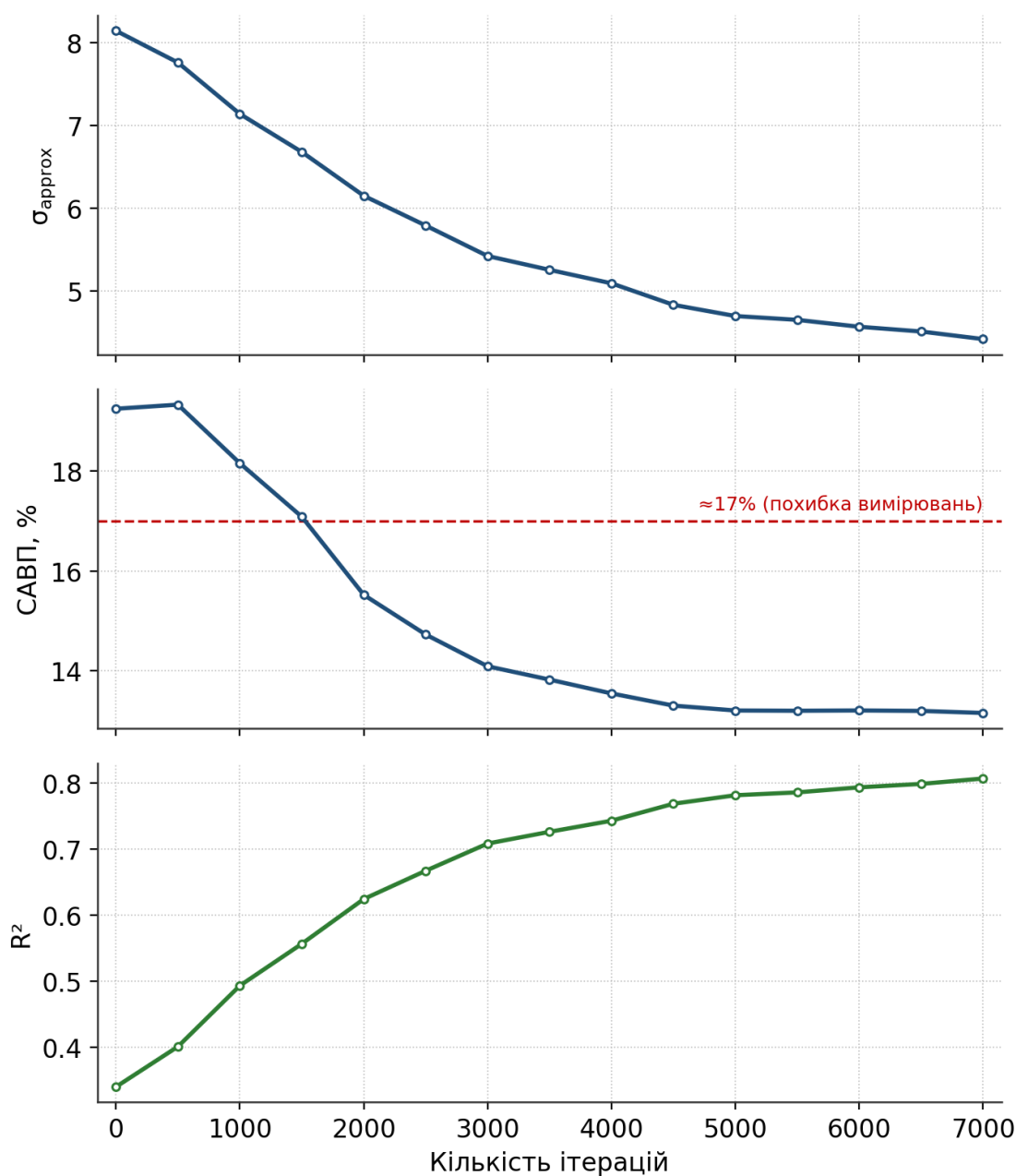


Рисунок 4.9 — Збіжність еволюційного методу з ініціалізацією на основі фізичних законів (пунктир — рівень власної похибки вимірювань, близько 17 %)

За критерієм мінімальної похибки апроксимації, розглянутим вище, алгоритм збігається за 7000 ітерацій: значення САВП зменшується з близько 19% на початковій ітерації до близько 13% наприкінці, що відповідає рівню власної відносної похибки дозиметричних вимірювань (близько 17 %). Тобто апроксимація досягає точності, обмеженої похибкою вхідних даних, а подальше зменшення похибки втрачає сенс.

Середня абсолютна відсоткова похибка (рисунок 4.9) відображає якість апроксимації: якщо $САВП \leq 10\%$ — точність апроксимації є відмінною; $10\% < САВП \leq 20\%$ — точність є доброю; $20\% < САВП \leq 50\%$ — точність є задовільною; якщо ж $САВП > 50\%$ — розв’язок вважається незадовільним. Досягнуте значення близько 13 % відповідає добрій точності апроксимації.

Загалом результати аналізу роботи алгоритму показують, що зі збільшенням кількості ітерацій зростає надійність апроксимації. Це узгоджується зі значеннями САВП, яка зменшується зі зростанням кількості ітерацій алгоритму. Спільне використання трьох наведених вище метрик дає змогу оцінити результати моделювання з позиції реалізації алгоритму, а також з урахуванням кількісних і якісних характеристик отриманих результатів.

4.3 Порівняння з класичним методом та аналіз ефективності еволюційного алгоритму

Щоб об’єктивно оцінити, наскільки запропонований підхід переважає альтернативні, було виконано порівняльний аналіз класичного методу та еволюційного алгоритму (ЕА) з трьома методами ініціалізації початкової популяції:

- класичний метод просторової інтерполяції;
- ЕА з випадковою ініціалізацією;
- ЕА з інтерполяційною ініціалізацією;
- ЕА з ініціалізацією на основі фізичних законів (запропонований метод).

Традиційні (класичні) підходи до радіаційного картографування, розглянуті в матеріалах МАГАТЕ [48, 49], переважно ґрунтуються на інтерполяції вимірних значень і найкраще застосовуються за наявності регулярної чи квазірегулярної сітки спостережень. Вони не враховують фізичної природи радіаційного поля —

лише математично згладжують значення між точками вимірювання. У цій роботі класичний підхід реалізовано саме як інтерполяцію виміряних значень з подальшим перерахунком на поверхню об'єкта.

Еволюційний алгоритм натомість розв'язує обернену задачу: за вимірними значеннями потужності дози відновлює параметри джерел випромінювання, спираючись на фізичну модель залежності дози від відстані до джерела. Методи ініціалізації різняться лише тим, з якого наближення стартує популяція — випадкового, отриманого інтерполяцією вимірів, чи побудованого з урахуванням фізичного закону спадання інтенсивності з відстанню.

Для кількісного порівняння методів залучено всі 91 контрольну точку наземних вимірювань, виконаних фахівцями Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України під час введення НБК в експлуатацію [139]. Ці вимірювання проводилися за програмою робіт, не пов'язаною з цим дослідженням, і не використовувалися у формуванні цільової функції, тому утворюють незалежну верифікаційну вибірку. У кожній такій точці обчислювалося відношення:

$$K_i = \frac{D_{\text{розрах}}(r_i)}{D_{\text{вим}}(r_i)}, \quad (4.4)$$

де K_i — кратність відхилення у i -й контрольній точці; $D_{\text{розрах}}(r_i)$ — розрахункове значення потужності дози в точці r_i ; $D_{\text{вим}}(r_i)$ — дозиметричне вимірювання в тій самій точці. Значення $K_i = 1$ відповідає повному збігу розрахунку з вимірюванням; $K_i > 1$ означає завищення, а $K_i < 1$ — заниження розрахункових значень відносно реальних.

Оцінювання якості виконувалося для величини K за сукупністю метрик — середньої абсолютної похибки (САП), середньоквадратичної похибки (СКП) та систематичного зміщення (СЗ), — а також за двома частками контрольних точок — з відносним відхиленням не більше 20 % ($|K_i - 1| \leq 0,2$) і з грубим відхиленням понад 50 % ($|K_i - 1| > 0,5$).

Отримані результати наведено в таблиці 4.1.

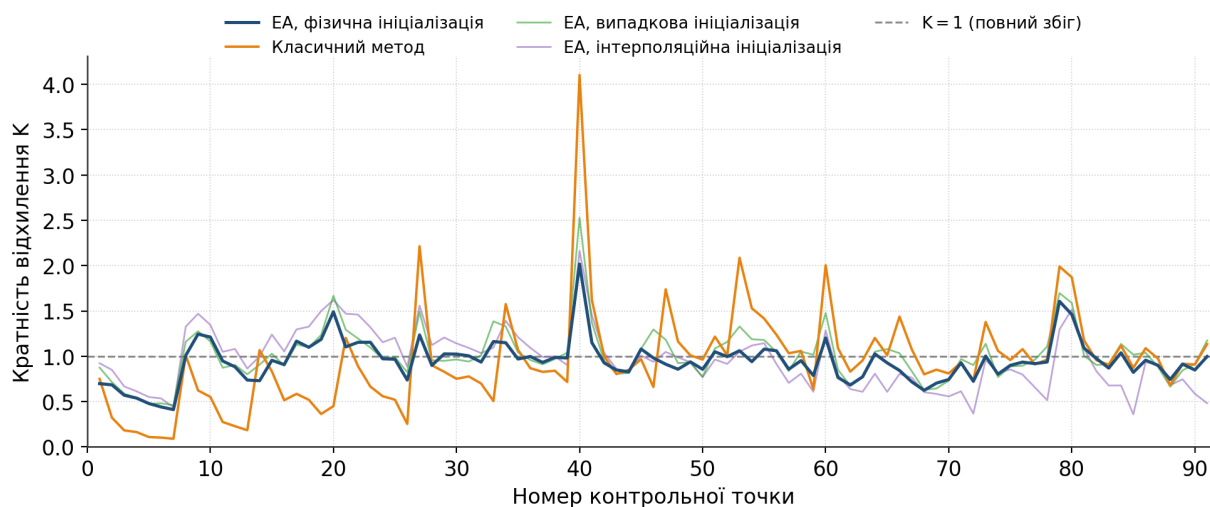


Рисунок 4.10 — Кратність відхилення K у 91 контрольній точці для порівнюваних методів

Таблиця 4.1 — Результати порівняння методів

Метод	САП	СКП	СЗ	$\leq 20 \%$	$> 50 \%$
Класичний	0,360	0,551	-0,05	48,4 %	24,2 %
EA (випадкова ініціалізація)	0,199	0,291	0,015	69,2 %	7,7 %
EA (інтерполяційна ініціалізація)	0,257	0,322	-0,035	46,2 %	8,8 %
EA (з урахуванням фізичних законів)	0,173	0,237	-0,054	69,2 %	6,6 %

Наведені показники, обчислені за поточковими значеннями з додатка І, дають підстави для кількох висновків.

Найвиразніший результат — перевага всіх варіантів еволюційного алгоритму над класичною інтерполяцією. Класичний метод дає прийнятну локальну точність: у 48,4 % контрольних точок похибка не перевищує 20 %. Та поза цими ділянками він нестабільний — СКП сягає 0,551, а майже кожне четверте значення (24,2 %) є грубою помилкою; помітне й систематичне заниження ($СЗ = -0,05$). Будь-який з еволюційних методів знижує СКП у 1,7–2,3

рази, що підтверджує доцільність переходу від згладжування вимірів до розв'язання оберненої задачі.

Серед самих еволюційних методів найкращі інтегральні показники дає ініціалізація на основі фізичних законів: САП = 0,173, СКП = 0,237, частка грубих помилок становить 6,6 %. Випадкова ініціалізація їй поступається (СКП = 0,291), а інтерполяційна виявляється найслабшою з еволюційних варіантів (СКП = 0,322, грубі помилки становлять 8,8 %) — навіть гіршою за випадкову. Це, на перший погляд, парадоксально: проєкція реальних вимірів мала б бути кращим стартом, ніж випадковий. Причина в тому, що інтерполяція переносить двовимірний розподіл дози на поверхню як активність джерел, хоча вимірювана доза в кожній точці — це сума внесків багатьох джерел, а не активність джерела під цією точкою. Такий старт зміщує розв'язок до фізично неузгодженого поля, якого алгоритм повністю не компенсує. Це загострює суть запропонованого методу: цінність не в наявності будь-якої апіорної інформації, а саме у фізично коректному наближенні.

Систематичне зміщення лишається невеликим в усіх методах і не є тим показником, за яким вони суттєво різняться (від +0,015 у випадкової до −0,054 у фізичної ініціалізації). Вирішальна різниця — у загальній точності та частці грубих відхилень, і саме остання має найбільшу практичну вагу: у задачах радіаційної безпеки поодинокі багатократні розбіжності небезпечніші за помірне зростання середньої похибки, бо ведуть або до недооцінки небезпеки, або до невиправдано жорстких обмежень. За цим критерієм запропонований метод (6,6 % проти 24,2 % у класичного) переважає найвідчутніше.

Порівняння фізичної та випадкової ініціалізацій показове й щодо динаміки збіжності (рисунк 4.11). Темп збіжності в обох методах близький — криві майже паралельні, і обидві виходять на плато приблизно за однакову кількість ітерацій. Перевагу дає не швидший спад, а нижчі стартова й кінцева похибки: фізично обґрунтований старт починається з меншого значення САВП ($\approx 19\%$ проти $\approx 22\%$) і виходить на нижче плато (13,2 % проти 14,7 %). Саме завдяки нижчому плато фізична ініціалізація перетинає рівень похибки вимірювань за меншу кількість

ітерацій — близько 2 000 проти $\approx 2\,500$ для випадкової. На самих вимірах детектора обидва методи зрештою дають близьку якість, проте на незалежних контрольних точках фізична ініціалізація точніша (СКП 0,237 проти 0,291). Фізично узгоджений старт скеровує пошук до розв'язку, що краще відповідає реальному розподілу.

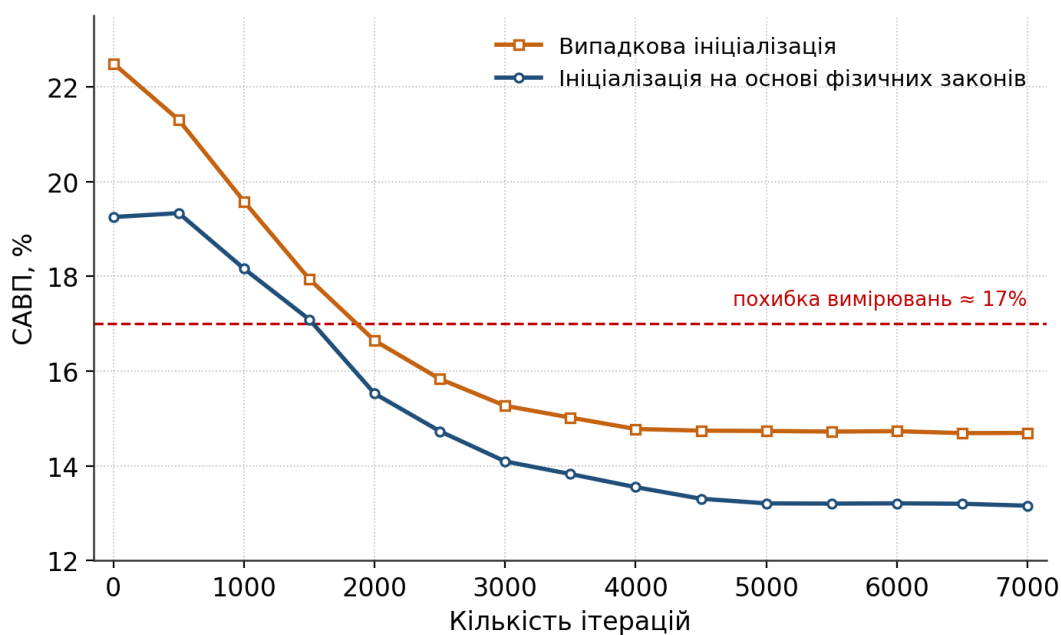


Рисунок 4.11 — Збіжність САВП для ініціалізації на основі фізичних законів та випадкової ініціалізації

Фізичне пояснення цієї різниці досить просте. Еволюційний підхід вбудовує модель переносу випромінювання безпосередньо в процедуру реконструкції — вона виступає обмеженням, яке «дисциплінує» розв'язок. Інтерполяція ж залишається суто математичною операцією над значеннями в точках спостереження і не бере до уваги закономірності формування радіаційного поля.

Щоб оцінити, наскільки досягнутий рівень точності близький до можливої межі, слід розглянути склад похибок, що його формують. Джерела похибки в задачі, яка розглядається, мають різну природу, і лише частина з них піддається зменшенню засобами алгоритму реконструкції.

Перша складова пов'язана з вимірювальним каналом. Заявлена відносна похибка детектора становить близько 17 %, і жоден метод відновлення не може

дати результат, узгоджений із вимірюваннями точніше, ніж самі вимірювання узгоджені з дійсністю. Ця величина утворює нижню межу досяжної точності на множині «віртуальних детекторів» і пояснює, чому криві збіжності виходять на плато, а не прямують до нуля. До цієї ж групи належить просторова невизначеність прив'язки показань: кожне значення є середнім за час перебування візка над коміркою розміром один метр, а скінченний час відгуку детектора додає зміщення показань відносно фактичного положення, яке коригується лише наближено.

Друга складова зумовлена дискретизацією моделі. Джерела розміщено з кроком один метр, координати задано цілими числами, тому відстані між джерелом і детектором визначаються з точністю до одного метра. Для віддалених пар це не має значення, проте для близько розташованих така неточність становить помітну частку самої відстані, а внесок у прогнозоване показання обернено пропорційний її квадрату. Зменшення кроку сітки підвищило б роздільну здатність, але одночасно збільшило б розмірність задачі, і без збільшення кількості вимірювань система стала б ще більш невизначеною.

Третя складова впливає з прийнятих спрощень прямої моделі. Джерела вважаються ізотропними, детектор — неколімованим, кутова залежність чутливості не враховується, а перевірка екранування виконується наближено, шляхом групування джерел за напрямками замість точного трасування променів. Наближеність перевірки екранування діє в один бік: джерело, помилково визнане видимим, додає внесок, якого в дійсності немає, що призводить до завищення прогнозованих показань і компенсується заниженням відновлених активностей сусідніх джерел.

Четверта складова має принциповий, а не технічний характер. Кількість шуканих активностей істотно перевищує кількість вимірювань, тому існує множина розподілів, однаково добре узгоджених із показаннями детекторів. Вибір з-поміж них визначається початковим наближенням і накладеними фізичними обмеженнями — саме тому методи ініціалізації, які дають близькі значення показників на самих вимірюваннях, істотно різняться за точністю на

незалежних контрольних точках. Найбільша невизначеність зосереджена в ділянках, над якими візок не проходив: для них кількість обмежень, накладених вимірюваннями, мінімальна.

Розглянуті складові неоднакові за можливістю усунення. Власна похибка вимірювального каналу закладена в самих вихідних даних, тому може бути зменшена лише застосуванням детектора з кращими метрологічними характеристиками. Похибки, пов'язані з усередненням показань у межах комірки та зі скінченням часом відгуку приладу, піддаються частковій корекції за рахунок уточнення моделі відгуку або зменшення швидкості переміщення детектора. Складові, зумовлені дискретизацією розрахункової області та спрощеннями прямої моделі, усуваються переходом до дрібнішої сітки, точного трасування променів і врахування спрямованості випромінювання, проте кожне з цих уточнень збільшує обчислювальні витрати, а зменшення кроку сітки додатково потребує більшої кількості вимірювань. Невизначеність системи, зумовлена перевищенням кількості невідомих над кількістю рівнянь, є принциповою для оберненої задачі та знімається лише залученням додаткових вимірювань або апіорних обмежень на шуканий розподіл.

Окремий аспект практичної придатності технології — обчислювальні витрати на відновлення поля. У підрозділі 1.5 зниження трудомісткості названо однією з переваг застосування інформаційних технологій, тому оцінка часу оброблення потрібна не лише як технічна характеристика реалізації, а і як кількісне підтвердження цієї тези.

Розрахунки виконано на трьох обчислювальних платформах, що відрізняються архітектурою процесора, кількістю ядер та обсягом оперативної пам'яті (таблиця 4.2). Мета вимірювань — не порівняння платформ між собою, а визначення порядку величини часу оброблення та перевірка відтворюваності результату на різному апаратному забезпеченні.

Умови обчислювального експерименту однакові для всіх платформ: той самий набір вхідних даних, 7000 ітерацій, те саме початкове значення генератора псевдовипадкових чисел. Обчислення виконувалися в однопотоковому режимі —

кількість потоків бібліотек лінійної алгебри примусово обмежено одиницею, щоб виключити вплив різних налаштувань за замовчуванням. Для кожної конфігурації виконано три запуски, у підсумок узято медіанні значення.

Таблиця 4.2 — Конфігурації обчислювальних платформ

Характеристика	Платформа 1	Платформа 2	Платформа 3
Процесор	Intel Core i5-10300H	AMD Ryzen 7 7735HS	Apple M1 Max
Архітектура	x86-64	x86-64	ARM64
Ядра, фізичні / логічні	4 / 8	8 / 16	10 / 10
Оперативна пам'ять, ГБ	16	32	32
Операційна система	Windows 11	Windows 11	macOS 26.6
Python / NumPy	3.13.15 / 2.2.5	3.13.3 / 2.2.5	3.13.7 / 2.2.5
Бібліотека лінійної алгебри	OpenBLAS 0.3.28	OpenBLAS 0.3.28	Accelerate

Результати вимірювань наведено в таблиці 4.3. Повний цикл відновлення поля виконується менш ніж за дві хвилини навіть на найповільнішій із розглянутих конфігурацій — процесорі 2020 року випуску з чотирма фізичними ядрами. Понад 95 % часу припадає на ітераційний пошук, тоді як підготовка даних, побудова моделі видимості та формування початкової популяції разом потребують від двох до чотирьох секунд. Оскільки обчислення однопотокові, кількість ядер на результат не впливає, і різниця між платформами визначається швидкодією одного обчислювального ядра: найшвидша конфігурація випереджає найповільнішу у 2,6 рази.

Пікове використання оперативної пам'яті становить 921,5 МБ і збігається на всіх трьох платформах з точністю до десятків кілобайтів. Це підтверджує, що обсяг потрібних ресурсів визначається розмірністю задачі, а не архітектурою обчислювальної системи, і дає змогу виконувати реконструкцію на звичайному персональному комп'ютері без спеціалізованого обладнання.

Таблиця 4.3 — Час виконання етапів реконструкції

Етап	Платформа 1	Платформа 2	Платформа 3
Підготовка даних і побудова моделі видимості, с	2,95	1,59	1,14
Формування початкової популяції, с	1,19	0,67	0,63
Ітераційний пошук (7 000 ітерацій), с	123,2	60,9	46,8
Загальний час, с	128,2	63,6	48,8
Пікове використання пам'яті, МБ	921,5	921,5	921,5

Відтворюваність результату перевірено окремо. У межах кожної платформи три послідовні запуски дають ідентичні значення відновлених активностей. Обидві платформи архітектури x86-64 дали побітово однаковий результат, тоді як платформа архітектури ARM64 відрізняється на 0,25 % за нормою вектора активностей. Розбіжність зумовлена не архітектурою процесора, а реалізацією бібліотеки лінійної алгебри: на платформах 1 і 2 використано OpenBLAS, на платформі 3 — Accelerate, що визначає порядок операцій із рухомою комою під час накопичення похибки за сім тисяч ітерацій. Отримана розбіжність приблизно в сімдесят разів менша за власну похибку детектора і не впливає на висновки щодо точності реконструкції.

Отриманий порядок величини має практичне значення для організації робіт. Побудова цифрової карти радіаційного забруднення експертним способом потребує залучення групи фахівців і триває дні, тоді як розглянута процедура виконується одним оператором за одну-дві хвилини на звичайному персональному комп'ютері. Це дає змогу отримувати оновлену оцінку обстановки в тому самому робочому циклі, у якому зібрано вимірювання.

Отже, застосування еволюційних алгоритмів до оберненої задачі радіаційного картографування дає точніші, стійкіші та фізично обґрунтованіші результати, ніж класична інтерполяція; а ініціалізація початкової популяції з урахуванням фізичних законів додатково підвищує точність порівняно з випадковим та інтерполяційним методами.

4.4 Перспективи подальшого розвитку

Напрями подальшого розвитку роботи поділяються на дві групи: уточнення моделі, покладеної в основу реконструкції, та розширення сфери застосування розробленого програмного комплексу.

Перша група впливає з аналізу джерел похибки, наведеного в підрозділі 4.3. Найбільший резерв зосереджений у прямій моделі переносу випромінювання. Заміна наближеної перевірки екранування точним трасуванням променів усунула б хибне зарахування закритих джерел до видимих, а введення кутової залежності чутливості детектора наблизило б модель до умов реального вимірювання. Обидва уточнення підвищують обчислювальні витрати на підготовчому етапі, який виконується одноразово перед пошуком, тому їх вплив на тривалість самої реконструкції залишається обмеженим.

Окремої уваги потребує розширення області пошуку. Оператори збурення застосовуються лише до елементів із ненульовою активністю, тому ділянки, яким на етапі ініціалізації не було призначено жодного значення, зберігають його незмінним до кінця розрахунку. Наслідком є неможливість відновити джерела в зонах, не охоплених початковим наближенням, навіть якщо вимірювання свідчать про наявність там випромінювання. Періодичне залучення таких елементів до процесу пошуку усунуло б це обмеження, проте потребує механізму, який не руйнував би вже узгоджені ділянки розподілу.

Третій напрям стосується режиму роботи алгоритму. У наведених експериментах реконструкція виконується одноразово, за повним набором наявних вимірювань. Використання результату попередньої реконструкції як початкового наближення для нового набору даних, розглянуте в підрозділі 2.5, дало б змогу перейти до інкрементного режиму, за якого кожне наступне обстеження уточнює вже побудовану картину, а не будує її наново. Такий режим особливо доцільний для об'єктів із повільною зміною радіаційної обстановки, до яких належить і об'єкт «Укриття»: розподіл джерел між послідовними

обстеженнями змінюється незначно, і повторне відновлення з довільного наближення означало б відмову від уже накопиченої інформації.

Друга група напрямів пов'язана з розширенням сфери застосування розробленого комплексу.

Перспективним напрямком розвитку запропонованого еволюційного алгоритму є його інтеграція з роботизованими системами радіаційної розвідки, що розробляються в межах досліджень Інституту проблем безпеки атомних електростанцій (ІПБ АЕС) НАН України та Інституту проблем математичних машин і систем НАН України.

Зокрема, у роботі [12] запропоновано концепцію багатороботної системи радіаційної розвідки, побудованої за принципом «system of systems» — мережі автономних платформ різних типів, які обмінюються даними через Robot Operating System (ROS) та формують колективну картину радіаційної обстановки. Можливість застосування окремих типів роботизованих платформ для радіаційного картографування досліджено також у роботах [11] та [12]. Зазначені дослідження проводилися у співпраці з Університетом Брістоля (Велика Британія), зокрема в межах грантового проєкту НАТО G-5913 «Enhanced radiation detection for nuclear security and incident response», а також цільової науково-технічної програми оборонних досліджень НАН України «Сучасні технології створення автоматизованої системи радіаційної розвідки із застосуванням дистанційно керованих засобів з урахуванням стандартів НАТО».

Розроблений у дисертації програмний комплекс може бути інтегрований у зазначені системи як обчислювальний модуль, що виконує такі функції: реконструкція просторового розподілу джерел гамма-випромінювання за поточними даними, що надходять від роботизованих платформ; уточнення координат та інтенсивності локальних радіаційних аномалій («гарячих точок»); прогнозування рівнів потужності еквівалентної дози у зонах, які ще не були досліджені платформами.

Суттєвою перевагою такої інтеграції є можливість адаптивного планування маршрутів роботизованих платформ на основі поточних результатів

реконструкції. Еволюційний алгоритм, отримуючи нові вимірювання, перебудовує модель радіаційного поля, що дає змогу спрямовувати платформи до зон із найбільшою невизначеністю або найвищими прогнозованими рівнями забруднення. Це сприяє підвищенню ефективності розвідки та зменшенню часу перебування обладнання в зонах високої радіації.

Отже, поєднання потокових дозиметричних даних від мобільних роботизованих платформ із розробленим еволюційним алгоритмом реконструкції створює передумови для побудови інтелектуальної системи радіаційного картографування, здатної працювати в умовах Чорнобильської зони відчуження, наслідків бойових дій або інших аварійних ситуацій, де пряме перебування персоналу є неможливим або недоцільним.

4.5 Висновки до розділу 4

У розділі наведено результати експериментальної верифікації запропонованого еволюційного алгоритму реконструкції гамма-випромінювання від об'єкта «Укриття». Основні результати полягають у такому.

1. Сформовано унікальний набір первинних даних про розподіл ПЕД у площині руху СОК над ОУ, отриманий під час введення в експлуатацію НБК за допомогою інтелектуального детектора БДБГ-09. Зафіксовані значення — від 230 до 28 490 мкЗв/год. Особливістю набору є нерегулярність і неповнота просторового покриття: переміщення СОК підпорядковувалися програмі випробувань, а не потребам радіаційного обстеження, тому над окремими ділянками детектор проходив багаторазово, тоді як значні частини поверхні залишилися поза зоною його руху. Саме такий характер вихідних даних визначає постановку задачі відновлення розподілу за неповними вимірюваннями. Побудована «теплова карта» показала, що зона з найбільшою потужністю гамма-випромінювання розташована поблизу західної частини ОУ, що узгоджується з

історичними дослідженнями 2002 року [137] та пояснюється особливостями очищення покрівлі після аварії 1986 року.

2. Виконано реконструкцію розподілу активності джерел на зовнішній оболонці ОУ запропонованим еволюційним алгоритмом з ініціалізацією на основі фізичних законів. За 7 000 ітерацій значення САВП зменшується приблизно до 13 % (з ≈ 19 % на початковій ітерації) і виходить на рівень власної відносної похибки вхідних вимірювань (близько 17 %); тобто апроксимація досягає точності, обмеженої похибкою самих даних. Наведені показники характеризують узгодженість відновленого розподілу з вимірюваннями, що беруть участь у формуванні цільової функції, тому остаточну перевірку методу виконано окремо, на незалежній вибірці контрольних наземних точок.

3. На вибірці з 91 контрольної точки наземних вимірювань проведено порівняння класичного методу інтерполяції та еволюційного алгоритму з трьома методами ініціалізації початкової популяції — випадковою, інтерполяційною та на основі фізичних законів. Усі еволюційні варіанти переважили класичний метод за СКП у 1,7–2,3 рази. Найкращі результати показала ініціалізація на основі фізичних законів: САП = 0,173, СКП = 0,237, частка грубих помилок — 6,6 % проти 24,2 % у класичного методу (майже вчетверо менше). Ініціалізація з фізично коректного наближення виявилася точнішою і за випадковий, і за інтерполяційний методи, що підтверджує значущість урахування фізичних законів на етапі формування початкової популяції.

4. Показано, що перевага еволюційного підходу зумовлена самою постановкою задачі: алгоритм розв'язує обернену задачу з урахуванням фізичної моделі переносу випромінювання, тоді як інтерполяція є суто математичною процедурою згладжування. Це пояснює як меншу середню похибку, так і суттєво вищу стійкість методу до екстремальних відхилень — критичний фактор у задачах радіаційної безпеки.

5. Проаналізовано склад похибок, що формують досягнутий рівень точності. Установлено, що власна похибка вимірювального каналу становить нескоротну частину загальної похибки, а решта визначається дискретизацією

розрахункової області, прийнятими спрощеннями прямої моделі — ізотропністю джерел, відсутністю кутової залежності чутливості детектора, наближеною перевіркою екранування — та принциповою невизначеністю оберненої задачі за перевищення кількості невідомих над кількістю вимірювань. Із цього випливає, що резерв подальшого підвищення точності зосереджений у моделі переносу випромінювання та в повноті вихідних даних, а не в удосконаленні процедури пошуку.

6. Оцінено обчислювальні витрати на відновлення поля. Повний цикл реконструкції за 7 000 ітерацій виконується від 49 до 128 секунд залежно від обчислювальної платформи, потребує близько 920 МБ оперативної пам'яті й не залежить від наявності спеціалізованого обладнання. Понад 95 % часу припадає на ітераційний пошук. Відтворюваність підтверджено на трьох платформах різної архітектури: у межах кожної з них результат ідентичний, а розбіжність між архітектурами не перевищує 0,25 % за нормою вектора активностей і зумовлена реалізацією бібліотеки лінійної алгебри.

7. Окреслено напрями подальшого розвитку роботи. Уточнення моделі передбачає перехід до точного трасування променів замість наближеної перевірки екранування та врахування спрямованості випромінювання; розширення області пошуку — залучення до нього елементів, яким на етапі ініціалізації не було призначено активності; перехід до інкрементного режиму — використання результату попередньої реконструкції як початкового наближення для нових даних. Окремо окреслено перспективи інтеграції запропонованого алгоритму з роботизованими системами радіаційної розвідки, що розробляються в межах спільних досліджень ІПБ АЕС НАН України та ІПММС НАН України (грант НАТО G-5913, цільова програма оборонних досліджень НАН України). Таке поєднання створює передумови для побудови інтелектуальної системи радіаційного картографування для умов Чорнобильської зони відчуження та інших ситуацій, де пряме перебування персоналу неможливе.

Основні результати розділу викладено автором у публікаціях [5–8, 11, 12, 134].

ВИСНОВКИ

У підсумку дисертаційного дослідження, виконаного автором, вирішено актуальне наукове завдання підвищення ефективності побудови цифрових карт радіаційного забруднення складних об'єктів в умовах неповних даних та нерегулярних спостережень шляхом розроблення інформаційної технології на основі даних дистанційного зондування з використанням еволюційного алгоритму. Зазначене наукове завдання має суттєве значення для підвищення радіаційної безпеки та забезпечення безпеки проведення персоналом робіт у зоні відчуження.

У дисертаційному дослідженні отримано такі основні результати:

1. На підставі проведеного аналізу встановлено, що інформаційні технології є дієвим інструментом підвищення безпеки персоналу та збереження його здоров'я під час виконання завдань на об'єкті «Укриття». Планування заходів з безпеки та прийняття відповідних управлінських рішень забезпечується на основі цифрових карт радіаційного забруднення — цифрових двійників поверхні об'єкта. Створення достовірних та адекватних обстановці карт в умовах фізичних обмежень та невизначеності є актуальною науково-практичною задачею. У результаті проведеного дослідження в інтересах розв'язання задачі дослідження отримано такі наукові результати.

2. Уперше запропоновано інформаційну технологію оцінювання радіаційного забруднення складних об'єктів на основі даних дистанційного зондування з використанням вдосконаленого еволюційного алгоритму, що полягає у формалізації задачі у вигляді невизначеної системи лінійних рівнянь із фізичними обмеженнями. На відміну від існуючих технологій і методів, що базуються переважно на методах просторової інтерполяції за умови регулярної мережі спостережень, запропонована технологія дає змогу оцінювати радіаційне забруднення в умовах неповних даних на нерегулярній мережі спостережень.

3. Уперше запропоновано метод формування початкової популяції еволюційного алгоритму для побудови цифрових карт радіаційного забруднення, який полягає у використанні апріорної інформації про фізичний закон зменшення інтенсивності іонізуючого випромінювання залежно від відстані від точки вимірювання до джерела випромінювання. На відміну від типової випадкової ініціалізації, такий метод забезпечує спрямованість пошуку в області фізично обґрунтованих розв'язків, що дає змогу отримати краще початкове наближення та підвищити підсумкову якість апроксимації.

4. Удосконалено методологію використання статистичних методів оброблення даних радіаційного контролю, що полягає у застосуванні регресійного аналізу вимірювань для врахування часової динаміки радіаційного поля. На відміну від відомих рішень, запропонована методологія дає змогу інтегрувати архівні дані в процес оцінювання без проведення додаткових дозиметричних обстежень, зменшуючи розмірність простору пошуку за рахунок часткової фіксації змінних.

5. Набув подальшого розвитку метод еволюційного пошуку розв'язків невизначених систем лінійних рівнянь з обмеженнями на абсолютні значення змінних шляхом адаптації операторів відбору та мутації з урахуванням специфіки радіаційних вимірювань. На відміну від класичних еволюційних схем, удосконалений метод забезпечує підвищення стійкості рішень в умовах високого рівня шуму та неповноти даних.

6. На основі отриманих наукових результатів розроблено інформаційну технологію цифрового радіаційного картографування, що охоплює процеси збирання, оброблення, зберігання, передавання дозиметричних даних, доступу до них і представлення результатів у вигляді цифрової карти. Перевагою запропонованої інформаційної технології є автоматизоване оброблення даних, що дає змогу оновлювати оцінку з періодичністю надходження вимірювань і відстежувати динаміку радіаційної обстановки, а не отримувати разову оцінку.

7. Експериментальна перевірка на реальних дозиметричних даних об'єкта «Укриття» підтвердила ефективність запропонованої інформаційної

технології. Її застосування дає змогу відмовитися від перебування персоналу в зоні підвищеної радіації, знизити трудомісткість оцінювання радіаційної обстановки та підвищити точність побудови цифрових карт радіаційного забруднення.

8. Основні наукові результати дослідження реалізовані у практичній діяльності Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України та Державного спеціалізованого підприємства «Чорнобильська АЕС», що підтверджено відповідними актами впровадження (додаток А).

9. Напрями подальших досліджень в зазначеній галузі можуть ґрунтуватись на уточненні моделі переносу випромінювання, підвищенні обчислювальної ефективності та інтеграції запропонованої інформаційної технології з робототехнічними системами радіаційної розвідки, зокрема з обробленням даних безпілотних літальних апаратів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nosovskij A. V., Vasil'chenko V. N., Klyuchnikov A. A. et al. Accident on the Chernobyl Nuclear Power Plant. Getting over the Consequences and Lessons Learned. Ukraine, Kyiv: Tekhnika, 2006. 296 p. Also available online, URL: <https://inis.iaea.org/records/ejkn-35664> (accessed 04.01.2026).
2. European Bank for Reconstruction and Development. Making Chornobyl safe. *European Bank for Reconstruction and Development*. URL: <https://www.ebrd.com/home/what-we-do/focus-areas/nuclear-safety/making-chornobyl-safe.html> (accessed 21.05.2026).
3. Про Загальнодержавну програму зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта "Укриття" на екологічно безпечну систему. (Перша редакція 15.01.2009). №886–VI. 300 с. (Відомості Верховної Ради України) Також доступний за URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/886-17> (дата звернення: 19.05.2026).
4. Nemchinov Y. Y., Bambura A. M., Sazonova Y. P. et al. Assessment of the Shelter Structures to Be Dismantled after NSC Installation. Comparative Analysis of Dismantling Options. *Yaderna ta Radyatsyijna Bezpeka*. 2019. Issue 1. P. 17–22.
5. Истомин Н., Пантин М., Савельев М. Пример импортозамещения в автоматизированном радиационном контроле. *Матеріали IV-ої Міжнародної конференції "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECО 19*. (24.04.2019). Славутич, Україна: Славутиська міська рада, 2019. С. 102–106.
6. Савельев М. В., Краснов В. А., Евстигнеев А. Ю. та ін. Измерение мощности экспозиционной дозы над объектом "Укрытие" после сдачи Нового Безопасного Конфаймента. *Матеріали V Міжнародної конф. "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECО 20*. (27.04.2020). Славутич, Україна, 2020. Також

доступний за посиланням: <https://inudeco.pro/> (збірник INUDECO 2020) С. 194–196.

7. Saveliev M. V., Krasnov V. A., Levchenko A. P. et al. Measuring the equivalent dose rate over the Shelter object after completion of the New Safe Confinement. *Nuclear power and the environment*. 2020. Vol. 4, Issue 19. P. 50–56. DOI:10.31717/2311-8253.20.4.6.

8. Saveliev M. V., Pantin M. A., Skiter I. S. et al. Implementation of Novel Evolutional Algorithm for 3-Dimensional Radiation Mapping and Gamma-Field Reconstruction within the Chernobyl Sarcophagus. *MDPI Algorithms*. 2023. Vol. 16, Issue 4. Article 204. DOI:10.3390/a16040204.

9. Saveliev M. V., Godun R. L., Pantin M. A. et al. The nuclear safety monitoring system for fuel-containing materials located in destroyed Unit No. 4 of the Chernobyl NPP and proposals for its modernization. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2022. Vol. 23, Issue 3. P. 172–181. DOI:10.15407/jnpae2022.03.172.

10. Михайлов О. В., Савельєв М. В., Пантін М. А. Результати контролю потужності еквівалентної дози γ -випромінювання у приміщеннях об'єкта “Укриття” ЧАЕС. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2024. Вип. 2, № 30. С. 51–60. DOI:10.31717/2311-8253.24.2.6.

11. Khomenko D., Pantin M., Saveliev M. et al. Autonomous quadruped robotic systems for radiation mapping. *XVIII International Scientific-Practical Conference, 13–15 November 2023 MODS 2023*. (13.11.2023). Chernihiv, Ukraine, 2023. P. 10–12.

12. Saveliev M. V., Shtefan V., Proskurin O. V. et al. Multi-robot radiation reconnaissance in the Chernobyl NPP Exclusion Zone. *Nuclear and Radiation Safety*. 2024. Vol. 4, Issue 104. P. 41–49. DOI:10.32918/nrs.2024.4(104).05.

13. Saveliev M., Shtefan V., Scott T. B. et al. UAV-Based Survey of the Equivalent Dose Rate Distribution Above the Outer Cladding of the Chernobyl New Safe Confinement Following Damage. *Drones*. 2026. Vol. 10, Issue 8. Article 562. DOI:10.3390/drones10080562.

14. Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010.
15. IAEA. Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2003. Also available online, URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1363_web.pdf (accessed 22.02.2021).
16. IAEA. Radioelement Mapping. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2010. Also available online, URL: <https://www.iaea.org/publications/7649/radioelement-mapping> (accessed 30.03.2020).
17. Tsoulfanidis N., Landsberger S. Measurement and Detection of Radiation. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015. Also available online, URL: <https://books.google.co.uk/books?hl=en&lr=&id=zRjSBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1> (accessed 19.05.2016).
18. Nishizawa Y., Yoshida M., Sanada Y. et al. Distribution of the $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ ratio around the Fukushima Daiichi nuclear power plant using an unmanned helicopter radiation monitoring system. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2015. Vol. 53, 2015. P. 468–474. DOI:10.1080/00223131.2015.1071721.
19. Sanada Y., Torii T. Aerial radiation monitoring around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol. 139, 2015. P. 294–249. DOI:10.1016/j.jenvrad.2014.06.027.
20. Shikaze Y., Nishizawa Y., Sanada Y. et al. Field test around Fukushima Daiichi nuclear power plant site using improved $\text{Ce:Gd}_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}$ scintillator Compton camera mounted on an unmanned helicopter. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016. Vol. 53, 2016. P. 1907–1918. DOI:10.1080/00223131.2016.1185980.
21. Lazna T., Gabrlik P., Jilek T. et al. Cooperation between an unmanned aerial vehicle and an unmanned ground vehicle in highly accurate localization of gamma radiation hotspots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2018. Vol. 15, 2018. P. 1729881417750787. DOI:10.1177/1729881417750787.

22. Peterson J., Li W., Cesar-Tondreau B. et al. Experiments in unmanned aerial vehicle/unmanned ground vehicle radiation search. *Journal of Field Robotics*. 2019. Vol. 36, 2019. P. 818–845. DOI:10.1002/rob.21867.
23. Coletti M., Hultquist C., Kennedy W. G. et al. Validating Safecast data by comparisons to a U. S. Department of Energy Fukushima Prefecture aerial survey. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 171, 2017. P. 9–20. DOI:10.1016/j.jenvrad.2017.01.005.
24. Hajagos T. J., Liu C., Cherepy N. J. et al. High-Z Sensitized Plastic Scintillators: A Review. *Advanced Materials*. 2018. Vol. 30, 2018. P. e1706956. DOI:10.1002/adma.201706956.
25. Jeon B., Kim J., Lee E. et al. Pseudo-Gamma Spectroscopy Based on Plastic Scintillation Detectors Using Multitask Learning. *Sensors*. 2021. Vol. 21, 2021. P. 684. DOI:10.3390/s21030684.
26. Kaburagi M., Shimazoe K., Kato M. et al. Gamma-ray spectroscopy with a CeBr₃ scintillator under intense γ -ray fields for nuclear decommissioning. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2021. Vol. 988, 2021. P. 164900. DOI:10.1016/j.nima.2020.164900.
27. Ye M., Gong P., Wu S. et al. Lightweight SiPM-based CeBr₃ gamma-ray spectrometer for radiation-monitoring systems of small unmanned aerial vehicles. *Applied Radiation and Isotopes*. 2021. Vol. 176, 2021. P. 109848. DOI:10.1016/J.APRA-DISO.2021.109848.
28. Bilton K. J. Data-driven Approaches to Spectral Gamma-Ray Source Detection and Identification: Ph.D. thesis. Berkeley, CA, USA: University of California, Berkeley, 2020.
29. Flanagan R. R., Brandt L. J., Osborne A. G. et al. Detecting nuclear materials in urban environments using mobile sensor networks. *Sensors*. 2021. Vol. 21, 2021. P. 10. DOI:10.3390/s21062196.
30. Marques L., Vale A., Vaz P. State-of-the-Art Mobile Radiation Detection Systems for Different Scenarios. *Sensors*. 2021. Vol. 21, 2021. P. 1051. DOI:10.3390/s21041051.

31. Bandstra M. S., Hellfeld D., Vavrek J. R. et al. Improved Gamma-Ray Point Source Quantification in Three Dimensions by Modeling Attenuation in the Scene. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2021. Vol. 68, 2021. P. 2637–2646. DOI:10.1109/TNS.2021.3113588.
32. Henderson K., Liu X., Stadnikia K. et al. Proximity-Based Sensor Fusion of Depth Cameras and Isotropic Rad-Detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2020. Vol. 67, 2020. P. 840–857. DOI:10.1109/TNS.2020.2967214.
33. Pavlovsky R., Cates J. W., Vanderlip W. J. et al. 3D Gamma-ray and Neutron Mapping in Real-Time with the Localisation and Mapping Platform from Unmanned Aerial Systems and Man-Portable Configurations. 2019. URL: <http://arxiv.org/abs/1908.06114> (accessed 29.01.2021).
34. Salathe M., Bandstra M. S., Quiter B. J. et al. Using 3D-Scene Data from a Mobile Detector System to Model Gamma-Ray Backgrounds. *2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)* (2019). Manchester, UK, 2019. DOI:10.1109/NSS/MIC42101.2019.9059835. P. 4.
35. Sasaki M., Sanada Y., Katengeza E. W. et al. New method for visualizing the dose rate distribution around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant using artificial neural networks. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, 2021. P. 11. DOI:10.1038/s41598-021-81546-4.
36. Vetter K., Barnowski R., Cates J. W. et al. Advances in Nuclear Radiation Sensing: Enabling 3-D Gamma-Ray Vision. *Sensors*. 2019. Vol. 19, 2019. P. 2541. DOI:10.3390/s19112541.
37. Pavlovsky R., Haefner A., Joshi T. et al. 3-D Radiation Mapping in Real-Time with the Localization and Mapping Platform LAMP from Unmanned Aerial Systems and Man-Portable Configurations. 2018. URL: <http://arxiv.org/abs/1901.05038> (accessed 29.01.2021).
38. Bandstra M. S., Quiter B. J., Curtis J. C. et al. Attribution of gamma-ray background collected by a mobile detector system to its surroundings using panoramic video. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2020. Vol. 954, 2020. P. 161126. DOI:10.1016/j.nima.2018.08.085.

39. White S. R., Wood K. T., Martin P. G. et al. Radioactive Source Localisation via Projective Linear Reconstruction. *Sensors*. 2021. Vol. 21, 2021. P. 15. DOI:10.3390/s21030807.
40. Zabulonov Y. L., Popov O. O., Iatsyshyn A. V. et al. Modern technical and software-analytical tools for solving problems of radiation and technogenic-ecological safety of Ukraine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (2022). DOI:10.1088/1755-1315/1049/1/012013. P. 012013.
41. Aghamiri S. S., Amin R., Isavand P. et al. Digital Twin Technology In Radiology. *Journal of Imaging Informatics in Medicine*. 2025. Vol. 39, 04.08.2025. P. 1816–1833. DOI:10.1007/s10278-025-01597-1.
42. Anger H. O. Use of a Gamma-Ray Pinhole Camera for in vivo Studies. *Nature*. 1952. Vol. 170, 1952. P. 200–201. DOI:10.1038/170200b0.
43. Everett D. B., Fleming J. S., Todd R. W. et al. Gamma-radiation imaging system based on the Compton effect. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1977. Vol. 124, 1977. P. 995. DOI:10.1049/piee.1977.0203.
44. Phillips G. W. Gamma-ray imaging with Compton cameras. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*. 1995. Vol. 99, 1995. P. 674–677. DOI:10.1016/0168-583X(95)80085-9.
45. Carrel F., Khalil R. A., Colas S. et al. GAMPIX: A new gamma imaging system for radiological safety and Homeland Security Purposes. *2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* (2011). DOI:10.1109/NSSMIC.2011.6154706. P. 4739–4744.
46. Fenimore E. E., Cannon T. M. Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays. *Applied Optics*. 1978. Vol. 17, 1978. P. 337. DOI:10.1364/AO.17.000337.
47. Boardman D. A., Sarbutt A., Flynn A. et al. Single pixel compressive gamma-ray imaging with randomly encoded masks. *Journal of Instrumentation*. 2020. Vol. 15, 2020. P. P04014. DOI:10.1088/1748-0221/15/04/P04014.
48. IAEA. Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005.

49. IAEA. Monitoring for Protection of the Public and the Environment. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2025. DOI:10.61092/iaea.i7sy-xqd1.
50. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014. ("General Safety Requirements" Series). DOI:10.61092/iaea.u2pu-60vm.
51. IAEA. Decommissioning of Facilities. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014.
52. IAEA. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2018.
53. IAEA. Remediation Strategy and Process for Areas Affected by Past Activities or Events. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022.
54. Lazna T., Cabrlík P., Sládek P. та ін. Unmanned Aircraft System-Based Radiological Mapping of Buildings. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (10.2022). IEEE, 2022. DOI:10.1109/IROS47612.2022.9981415. С. 1794–1801.
55. IAEA. In Situ Analytical Characterization of Contaminated Sites Using Nuclear Spectrometry Techniques. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020.
56. International Atomic Energy Agency (IAEA). Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. Also available online, URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1239_web.pdf (accessed 03.09.2025).
57. Автоматизовані системи. Терміни та визначення. (1993). Київ: Держстандарт України, 1993. 1993.
58. Information technology — Governance of IT for the organization. (2015). Geneva: International Organization for Standardization, 2015. 2015.
59. Про захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах : Закон України від 05.07.1994 № 80/94-ВР. (Перша редакція 05.07.1994). №80/94-

ВР. (Відомості Верховної Ради України)Також доступний за URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80/94-вр> (дата звернення: 20.05.2026).

60. International Nuclear Safety Advisory Group. The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1. A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1992. Also available online, URL: <https://www.iaea.org/publications/3786/the-chernobyl-accident-updating-of-insag-1> (accessed 21.05.2026).

61. Information Technology Impact on Nuclear Power Plant Documentation. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002. Also available online, URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1284_prn.pdf (accessed 20.05.2026).

62. Qi B., Liang J., Tong J. Fault Diagnosis Techniques for Nuclear Power Plants: A Review from the Artificial Intelligence Perspective. *Energies*. 2023. Vol. 16, Issue 4. P. 1850. DOI:10.3390/en16041850.

63. Sethu M., Kotla B., Russell D. et al. Application of Artificial Intelligence in Detection and Mitigation of Human Factor Errors in Nuclear Power Plants: A Review. *Nuclear Technology*. 2022. Vol. 209, 2022. P. 276–294. DOI:10.1080/00295450.2022.2067461.

64. Елбордані А. А., Канділь М. М., Юнесс Х. А. та ін. Система аварійного реагування для атомних електростанцій на базі штучного інтелекту: інтеграція алгоритмів машинного навчання з симптомо-орієнтованими процедурними настановами. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2026. 1 (109). С. 77–96. DOI:10.32918/nrs.2026.1(109).07.

65. Xiao X., Liang J., Tong J. et al. Emergency Decision Support Techniques for Nuclear Power Plants: Current State, Challenges, and Future Trends. *Energies*. 2024. Vol. 17, Issue 10. P. 2439. DOI:10.3390/en17102439.

66. ARGOS Decision Support System. *Prolog Development Center*. URL: <https://pdc-argos.com/Articles/argos.html> (accessed 20.05.2026).

67. About the National Atmospheric Release Advisory Center. *Lawrence Livermore National Laboratory*. URL: <https://narac.llnl.gov/about> (accessed 20.05.2026).
68. National Research Council. Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety of U.S. Nuclear Plants. Washington, DC: The National Academies Press, 2014. DOI:10.17226/18294.
69. Visualising Data for Emergency Response: IAEA Launches International Radiation Mapping System. *International Atomic Energy Agency*. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/visualising-data-for-emergency-response-iaea-launches-international-radiation-mapping-system> (accessed 20.05.2026).
70. Donovan J. Robots, AI and 3D Models: How High-tech Breakthroughs Help Nuclear Decommissioning. *IAEA Bulletin*. URL: <https://www.iaea.org/bulletin/robots-ai-and-3d-models-how-high-tech-breakthroughs-help-nuclear-decommissioning> (accessed 20.05.2026).
71. N-Visage® Fusion. *Createc Ltd*. URL: https://createc.co.uk/n-visage_fusion/ (accessed 20.05.2026).
72. Чумаченко О. В., Савельєв М. В., Іммонен Е. та ін. Концепція модернізації автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки з інтеграцією безпілотних роботизованих платформ. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2026. 2 (110). С. 63–71. DOI:10.32918/nrs.2026.2(110).06.
73. Барбашев С., Прістер Б. Автоматизовані системи контролю радіаційної обстановки. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2013. 1 (57). С. 41–47. DOI:10.32918/nrs.2013.1(57).08.
74. У ДСНС відбулася презентація системи “РОДОС-Україна”. *Урядовий портал*. 30.06.2016. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/249152554> (дата звернення: 20.05.2026).
75. RODOS — European System for Decision-making Support in Case of Radiation Accidents. *ДСП “Чорнобильська АЕС”*. 2018. URL: <https://chnpp.gov.ua/en/infocenter/news/5079-rodos-european-system-for-decision-making-support-in-case-of-radiation-accidents> (accessed 20.05.2026).

76. Чала М., Кудряшова Є., Іванов З. та ін. Діяльність з аварійної готовності і реагування із залученням мобільної лабораторії радіаційної розвідки. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. Спец. вип. С. 62–70.

77. Radiation Protection, Safety and Monitoring Systems. ДСП “Чорнобильська АЕС”. URL: <https://chnpp.gov.ua/en/shelter-object-transformation/project-implementation-phase-2/474-2011-05-11-13-24-35474> (accessed 20.05.2026).

78. Skiter I., Saveliev M., Molitor N. et al. Selection of the Optimal Option for the Transformation of the “Shelter” Object into an Environmentally Safe System Using the Factor-Criterion Model of Scenario Analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (2023). DOI:10.1088/1755-1315/1254/1/012101. P. 012101.

79. Skiter I. S., Derenhovskyi V. V. Analysis of Scenarios for Transforming the Object “Ukryttya” into an Environmentally Safe System by the Method of Multicriteria Optimization. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2024. Vol. 25, Issue 1. P. 47–57. DOI:10.15407/jnpae2024.01.047.

80. Zabulonov Yu., Popov O., Burtniak V. et al. Innovative Developments to Solve Major Aspects of Environmental and Radiation Safety of Ukraine. *Systems, Decision and Control in Energy II*. Cham: Springer, 2021. P. 273–292. DOI:10.1007/978-3-030-69189-9_16.

81. Partnerships That Matter: A New Chapter with Orano to Advance Digital Transformation in the Nuclear Sector. *Dassault Systèmes*. 13.11.2025. URL: <https://blog.3ds.com/industries/infrastructure-energy-materials/orano-dassault-systemes-digital-innovation-nuclear/> (accessed 20.05.2026).

82. Yisheng H., Zhen W., Yanheng P. et al. Validation of the Neural Network for 3D Photon Radiation Field Reconstruction under Various Source Distributions. *Frontiers in Energy Research*. 2023. Vol. 11, 2023. P. 1151364. DOI:10.3389/fenrg.2023.1151364.

83. Hansen P. C. Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems: Numerical Aspects of Linear Inversion. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied

Mathematics, 1998. 247 p. ("SIAM Monographs on Mathematical Modeling and Computation" Series). DOI:10.1137/1.9780898719697.

84. Снитюк В., Сіпко О. Технологія еволюційного формування розкладів у закладах вищої освіти. Київ, Україна: ФОП Піча Ю.В., 2022. 136 с. ISBN 978-966-96915-2-1.

85. Снитюк В. Прогнозирование. Модели, методы, алгоритмы. Учебное пособие, содержащее элементы классических и современных технологий прогнозирования, предназначенное для студентов и специалистов по интеллектуальным информационным системам. Киев, Украина: Маклаут, 2008. Также доступно онлайн, URL: https://www.researchgate.net/publication/281110176_PROGNOZIROVANIE_Modeli_Metody_Algoritmy

86. Bäck T. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice. Oxford: Oxford University Press, 1996.

87. Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Cambridge: MIT Press, 1992. 211 p.

88. Michalewicz Z. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Berlin: Springer, 1996. 387 p.

89. Eiben A. E., Smith J. E. Introduction to Evolutionary Computing. 2. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. 287 p. ("Natural Computing Series" Series). DOI:10.1007/978-3-662-44874-8.

90. Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M. P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*. 1983. Vol. 220, Issue 4598. P. 671–680. DOI:10.1126/science.220.4598.671.

91. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 — International Conference on Neural Networks* (Perth, WA, Australia, 1995). Perth, WA, Australia: IEEE, 1995. DOI:10.1109/ICNN.1995.488968. P. 1942–1948.

92. Storn R., Price K. Differential Evolution — A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*. 1997. Vol. 11, Issue 4. P. 341–359. DOI:10.1023/A:1008202821328.
93. Engelbrecht A. P. Computational Intelligence: An Introduction. 2. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2007. Also available online, URL: <https://books.google.co.uk/books?hl=en&lr=&id=IZosIcgJMjUC&oi=fnd&pg=PR7> (accessed 30.03.2023).
94. Hill R. R. A Monte Carlo Study of Genetic Algorithm Initial Population Generation Methods. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. 2000. 2000. DOI:10.1145/324138.324430.
95. Borhan Kazimipour, Li X., Qin A. K. A Review of Population Initialization Techniques for Evolutionary Algorithms. *2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. (2014). Beijing, China: IEEE, 2014. DOI:10.1109/CEC.2014.6900618. P. 2585–2592.
96. Friedrich T., Wagner M. Seeding the Initial Population of Multi-Objective Evolutionary Algorithms: A Computational Study. *Applied Soft Computing*. 2015. Vol. 33, 2015. P. 223–230. DOI:10.1016/j.asoc.2015.04.043.
97. Li Q., Liu S.-Y., Yang X.-S. Influence of Initialization on the Performance of Metaheuristic Optimizers. *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 91, 2020. P. 106193. DOI:10.1016/j.asoc.2020.106193.
98. Geelen S., Camps J., Olyslaegers G. та ін. Radiological Surveillance Using a Fixed-Wing UAV Platform. *Remote Sensing*. 2022. Вип. 14, № 16. С. 3908. DOI:10.3390/rs14163908.
99. Kunze C., Preugschat B., Arndt R. та ін. Development of a UAV-Based Gamma Spectrometry System for Natural Radionuclides and Field Tests at Central Asian Uranium Legacy Sites. *Remote Sensing*. 2022. Вип. 14, № 9. С. 2147. DOI:10.3390/rs14092147.
100. Molnár A., Domozi Z., Lovas I. Drone-Based Gamma Radiation Dose Distribution Survey with a Discrete Measurement Point Procedure. *Sensors*. 2021. Вип. 21, № 14. С. 4930. DOI:10.3390/s21144930.

101. Malehmir A., De Smet T., Brodie R. The Guidelines for Drone Geophysics: Radiometric UAV-Borne Guidelines. European Association of Geoscientists and Engineers, 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/384836990_The_Guidelines_for_Drone_Geophysics_Radiometric_UAV-Borne_Guidelines
102. Van Der Veeke S., Koomans R. L., Van Egmond F. M. та ін. A Drone as Platform for Airborne Gamma-Ray Surveys to Characterize Soil and Monitor Contaminations. *24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* (09.2018). European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE), 2018. DOI:10.3997/2214-4609.201802510.
103. Rutherford E., Soddy F. Radioactive Change. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1903. Vol. 5, Issue 29. P. 576–591. DOI:10.1080/14786440309462960.
104. Defense Acquisition University. Systems Engineering Fundamentals. Fort Belvoir, VA: Defense Acquisition University Press, 2001. 222 p.
105. Yourdon E. Modern Structured Analysis. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989. 672 p. ISBN 978-0-13-598624-0.
106. Савельев М. Объектно-ориентированное проектирование программных продуктов. Раздел II. г. Славутич, Украина: Филиал НТУУ “КПІ” в городе Славутич, 2009.
107. Bass L., Clements P., Kazman R. Software Architecture in Practice. 3. Boston: Addison-Wesley, 2013. 624 p. ISBN 978-0-321-81573-6.
108. Shaw M., Garlan D. Software Architecture: Perspectives on an Emerging Discipline. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. 269 p. ISBN 978-0-13-182957-2.
109. Sommerville I. Software Engineering. 10. Boston: Pearson Education Limited, 2015. 816 p. ISBN 978-0-13-394303-0.
110. Hennessy J. L., Patterson D. A. Computer Architecture: A Quantitative Approach. 6. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2017. 936 p. ISBN 978-0-12-811905-1.

111. Kruchten P. Architectural Blueprints — The “4+1” View Model of Software Architecture. *IEEE Software*. 1995. Vol. 12, Issue 6. P. 42–50. DOI:10.1109/52.469759.
112. ISO/IEC/IEEE 42010:2022. Systems and software engineering — Architecture description. (2022). Geneva: ISO, 2022. ISBN 978-0-539-24940-8. 2022.
113. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. The Unified Modeling Language User Guide. 2. Addison-Wesley, 2005.
114. Fowler M. UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language. 3. Addison-Wesley, 2004.
115. PlantUML Documentation. *PlantUML*. URL: <https://plantuml.com/> (accessed 22.01.2026).
116. Unified Modeling Language (UML) Specification. *Object Management Group (OMG) Specifications*. URL: <https://www.omg.org/spec/UML/> (accessed 22.01.2026).
117. Bezanson J., Edelman A., Karpinski S. et al. Julia: A Fresh Approach to Numerical Computing. *SIAM Review*. 2017. Vol. 59, Issue 1. P. 65–98. DOI:10.1137/141000671.
118. Oliphant T. E. Python for Scientific Computing. *Computing in Science & Engineering*. 2007. Vol. 9, Issue 3. P. 10–20. DOI:10.1109/MCSE.2007.58.
119. Harris C. R., Millman K. J., Walt S. J. van der et al. Array programming with NumPy. *Nature*. 2020. Vol. 585, 2020. P. 357–362. DOI:10.1038/s41586-020-2649-2.
120. DeJonghe D. NGINX Cookbook: Advanced Recipes for High-Performance Load Balancing. 2. Sebastopol, CA: O’Reilly Media, 2022. 524 p. ISBN 978-1-0981-2624-7.
121. Soni R. Nginx: From Beginner to Pro. Berkeley, CA: Apress, 2016. 376 p. ISBN 978-1-4842-1657-6.
122. Hohpe G., Woolf B. Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions. Boston: Addison-Wesley Professional, 2003. 736 p. Also available online, URL: <https://martinfowler.com/books/eip.html>

123. Videla A., Williams J. J. W. *RabbitMQ in Action: Distributed Messaging for Everyone*. Shelter Island, NY: Manning Publications, 2012. 320 p. Also available online, URL: <https://www.manning.com/books/rabbitmq-in-action>
124. Dobbelaere P., Esmaili K. S. *Kafka versus RabbitMQ: A comparative study of two industry reference publish/subscribe implementations: Industry Paper. Proceedings of the 11th ACM International Conference on Distributed and Event-based Systems* (Barcelona, Spain, 2017). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2017. DOI:10.1145/3093742.3093908. P. 227–238.
125. Django Documentation. *Django Project*. 2024. URL: <https://docs.djangoproject.com/en/stable/> (accessed 22.01.2026).
126. Eby P. J. PEP 3333 – Python Web Server Gateway Interface (WSGI). (2010). Python Software Foundation, 2010. URL: <https://peps.python.org/pep-3333/2010>.
127. Greenfeld D. R., Greenfeld A. R. *Two Scoops of Django 3.x: Best Practices for the Django Web Framework*. Self-published: Leanpub, 2022. Also available online, URL: <https://www.feldroy.com/two-scoops-of-django>
128. Vincent W. S. *Django for APIs: Build Web APIs with Python and Django*. Self-published: WelcomeToCode, 2025. Also available online, URL: <https://djangoforapis.com/>
129. McKinney W. *Data Structures for Statistical Computing in Python. Proceedings of the 9th Python in Science Conference (SciPy)* (2010). Also available online, URL: <https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a> P. 56–61.
130. Plotly Python Documentation. *Plotly*. 2024. URL: <https://plotly.com/python/> (accessed 22.01.2026).
131. Appropriate Uses For SQLite. *SQLite Documentation*. URL: <https://sqlite.org/whentouse.html> (accessed 30.07.2026).
132. Hunter J. D. *Matplotlib: A 2D Graphics Environment. Computing in Science & Engineering*. 2007. Vol. 9, Issue 3. P. 90–95. DOI:10.1109/MCSE.2007.55.

133. Ahrens J., Geveci B., Law C. ParaView: An End-User Tool for Large-Data Visualization. *Visualization Handbook*. ed. C. D. Hansen., C. R. Johnson. Burlington: Elsevier, 2005. P. 717–731. DOI:10.1016/B978-012387582-2/50038-1.

134. Pantin M. A., Saveliev M. V., Skiter I. S. An approach of use evolutionary algorithms for radiation mapping. *Матеріали VII Міжнародної конф. “Проблеми зняття з експлуатації об’єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища” INUDECO 22. (27.04.2022). Slavutych, Ukraine, 2022.* Also available online, URL: <https://www.youtube.com/live/Ppf0YwdMWtE?si=TwnpBpbVbkF7i5wp&t=20312>

135. Пантін М. А. Інформаційна система оцінок радіаційного забруднення в умовах неповних даних на нерегулярній мережі спостережень (У друці). *Математичні машини і системи*. 2026. Вип. 3, 2026.

136. ECOTEST Group. Intelligent Detecting Unit of Gamma Radiation BDBG-09. 05.01.2023. URL: <https://ecotestgroup.com/products/bdbg-09/> (accessed 05.01.2023).

137. Боровой А. А., Велихов Е. П. Опыт Чернобыля (работы на объекте “Укрытие”). Часть 4. Москва: НИЦ “Курчатовский институт”, 2015. 138 с.

138. Ramachandran P., Varoquaux G. Mayavi: 3D visualization of scientific data. *Computing in Science & Engineering*. 2011. Vol. 13, 2011. P. 40–51. DOI:10.1109/MCSE.2011.35.

139. Павловський Л. І., Хоменко Д. О., Єгоров В. В. Визначення радіаційних умов у зонах робіт з демонтажу нестабільних конструкцій об’єкта “Укриття”. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2022. Вип. 25, № 3. С. 16–23. DOI:10.31717/2311-8253.22.3.2.

ІНСТРУМЕНТИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Anthropic, Claude 3 Opus — Opus 5, дата використання: січень 2025 — серпень 2026.

ДОДАТКИ

Додаток А

Акти та довідки впровадження результатів дисертаційного дослідження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з наукової
роботи ІПБ АЕС НАН УкраїниВіктор КРАСНОВ
«03» 08 2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Пантіна Максима Андрійовича на тему «Інформаційна технологія оцінювання
радіаційного забруднення ЧАЕС на основі даних дистанційного зондування»

Комісія у складі: голови комісії — Краснова Віктора Олександровича, членів комісії — Михайлова Олександра Вікторовича та Скітера Ігоря Семеновича — склала цей акт про те, що результати, отримані в дисертаційному дослідженні аспіранта Інституту проблем математичних машин і систем НАН України Пантіна Максима Андрійовича, реалізовано у звіті ІПБ АЕС про НДР «Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації нового безпечного конфайнмента (НБК) об'єкта "Укриття" (моніторинг паливовмісних матеріалів)» (№ держреєстрації 0125U003087, період виконання 07.2025 – 12.2025).

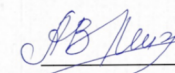
У межах зазначеної НДР здобувачем розроблено інформаційну технологію, що забезпечує побудову цифрових карт радіаційного забруднення покрівлі об'єкта «Укриття» з просторовою роздільною здатністю до 1 м² та оцінювання поточного рівня гамма-фону. Розроблена інформаційна технологія є основою системи підтримки прийняття рішень для фахівців з планування робіт у зонах обмеженого доступу.

Завідувач ВЯБ ВЯРБ

ІПБ АЕС НАН України

с. н. с. ВЗЕАЕС ВПОРЯТ

ІПБ АЕС НАН України

 Олександр МИХАЙЛОВ
«03» 08 2026 р.

 Ігор СКІТЕР
«03» 08 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор технічний (головний
інженер) ДСН ЧАЕС

Олександр ТІТАРЧУК

« 13 » 08 2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Пантіна Максима Андрійовича на тему «Інформаційна технологія оцінювання
радіаційного забруднення ЧАЕС на основі даних дистанційного зондування»

Результати, отримані в дисертаційному дослідженні аспіранта Інституту проблем математичних машин і систем НАН України Пантіна Максима Андрійовича, реалізовано під час виконання НДР «Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації нового безпечного конфайнмента (НБК) об'єкта "Укриття" (моніторинг паливовмісних матеріалів)» (№ держреєстрації 0125U003087, період виконання 07.2025 – 12.2025).

Розроблена здобувачем інформаційна технологія забезпечує побудову цифрових карт радіаційного забруднення покрівлі об'єкта «Укриття» з просторовою роздільною здатністю до 1 м² та оцінювання поточного рівня гамма-фону. Це також дало змогу побудувати карти поточного рівня гамма-фону на поверхні покрівлі комплексу НБК-ОУ після удару ворожого БПЛА у лютому 2025 року. Розроблена інформаційна технологія є основою системи підтримки прийняття рішень для фахівців з планування робіт у зонах обмеженого доступу.

Заступник директора технічного
(з інфраструктури)

Сергій КОНДРАТЕНКО

« 11 » 08 2026 р.

Додаток Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Saveliev M. V., Pantin M. A., Skiter I. S. et al. Implementation of Novel Evolutional Algorithm for 3-Dimensional Radiation Mapping and Gamma-Field Reconstruction within the Chornobyl Sarcophagus. *MDPI Algorithms*. 2023. Vol. 16, Issue 4. Article 204. DOI:10.3390/a16040204. Базу: SCOPUS Q2, CrossRef, Google Scholar.
2. Saveliev M., Krasnov V., Levchenko A., Novikov A., Evstigneev A., Pantin M. Measuring the equivalent dose rate over the Shelter object after completion of the New Safe Confinement. *Nuclear power and the environment*. 2020. Vol. 4, Issue 19. P. 50–56. DOI:10.31717/2311-8253.20.4.6. Базу: CrossRef, Google Scholar.
3. Михайлов О. В., Савельєв М. В., Пантін М. А. Результати контролю потужності еквівалентної дози γ -випромінювання у приміщеннях об'єкта “Укриття” ЧАЕС. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2024. Вип. 2, № 30. С. 51–60. DOI:10.31717/2311-8253.24.2.6. Базу: CrossRef, Google Scholar.
4. Saveliev M. V., Godun R. L., Pantin M. A. et al. The nuclear safety monitoring system for fuel-containing materials located in destroyed Unit No. 4 of the Chornobyl NPP and proposals for its modernization. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2022. Vol. 23, Issue 3. P. 172–181. DOI:10.15407/jnpae2022.03.172. Базу: SCOPUS Q4, CrossRef, Google Scholar.
5. Saveliev M., Shtefan V., Proskurin O., Pantin M., Martin P. G., Grechaninov V., Havrylko Y. Multi-robot radiation reconnaissance in the Chornobyl NPP Exclusion Zone. *Nuclear and Radiation Safety*. 2024. Vol. 4, Issue 104. P. 41–49. DOI:10.32918/nrs.2024.4(104).05. Базу: SCOPUS Q3, CrossRef, Google Scholar.
6. Saveliev M., Shtefan V., Scott T. B., Grechaninov V., Mykhailov O., Doroshenko A., Pantin M. UAV-Based Survey of the Equivalent Dose Rate Distribution Above the Outer Cladding of the Chornobyl New Safe Confinement

Following Damage. *Drones*. 2026. Vol. 10, Issue 8. Article 562. DOI:10.3390/drones10080562. Базу: SCOPUS Q1, CrossRef, Google Scholar.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Савельев М. В., Краснов В. А., Евстигнеев А. Ю., Пантин М.А. Измерение мощности экспозиционной дозы над объектом “Укрытие” после сдачи Нового Безопасного Конфаймента. *Матеріали V Міжнародної конф. “Проблеми зняття з експлуатації об’єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища” INUDECO 20*. (27.04.2020). Славутич, Україна, 2020. Також доступний за посиланням: <https://inudeco.pro/> (збірник INUDECO 2020) С. 194–196.

8. Истомин Н., Пантин М., Савельев М. Пример импортозамещения в автоматизированном радиационном контроле. *Матеріали IV-ої Міжнародної конференції “Проблеми зняття з експлуатації об’єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища” INUDECO 19*. (24.04.2019). Славутич, Україна: Славутиська міська рада, 2019. С. 102–106.

9. Khomenko D., Pantin M., Saveliev M. et al. Autonomous quadruped robotic systems for radiation mapping. *XVIII International Scientific-Practical Conference, 13–15 November 2023 MODS 2023*. (13.11.2023). Chernihiv, Ukraine, 2023. P. 10–12.

Додаток В

Запропонована схема еволюційного алгоритму мовою візуального програмування DRAKON

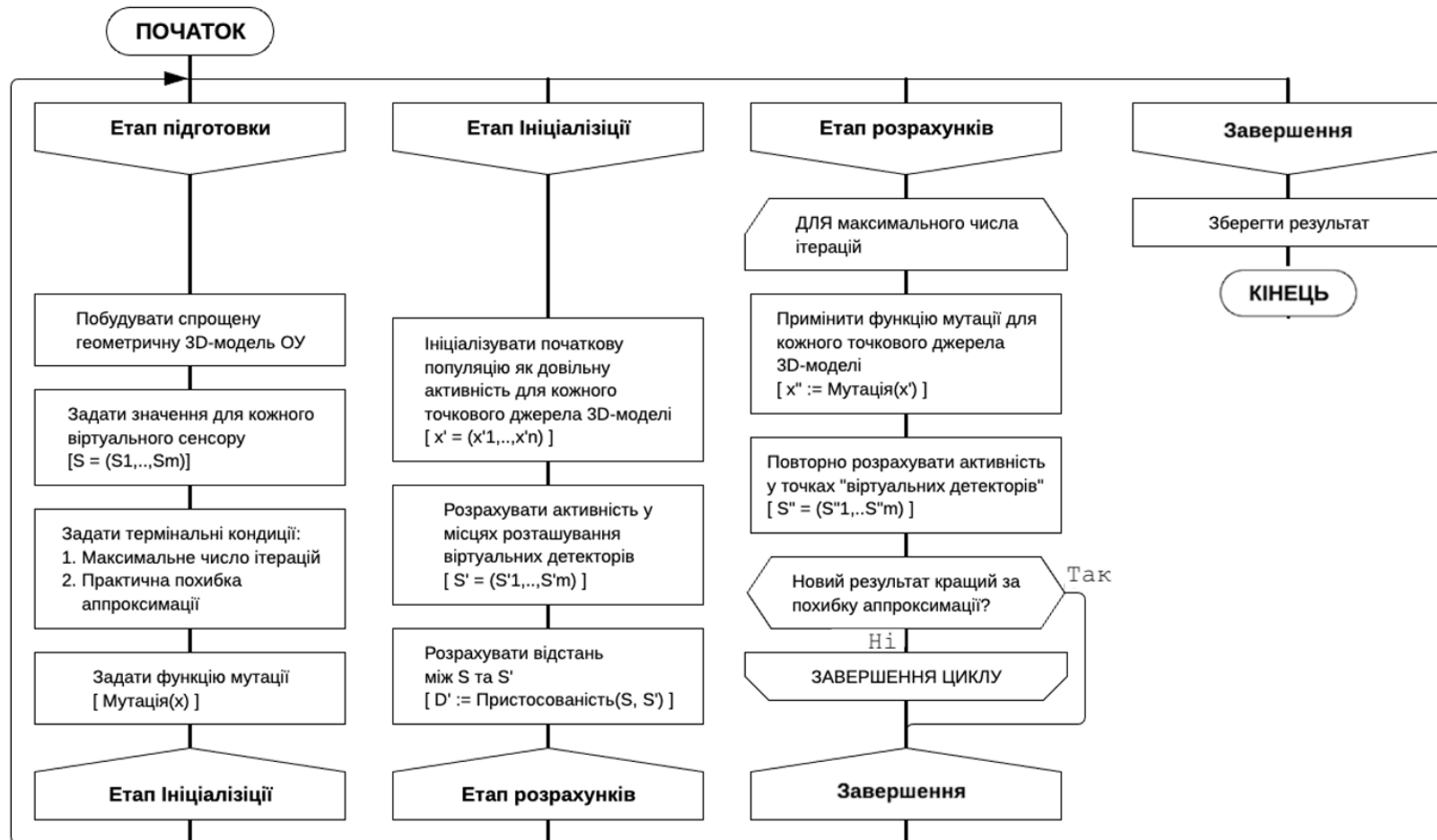


Рисунок В.1 — Запропонована схема еволюційного алгоритму мовою візуального програмування DRAKON

Додаток Г

Схеми функціонального моделювання інформаційної технології



Рисунок Г.1 — Модель інформаційної технології: склад даних на кожному шарі

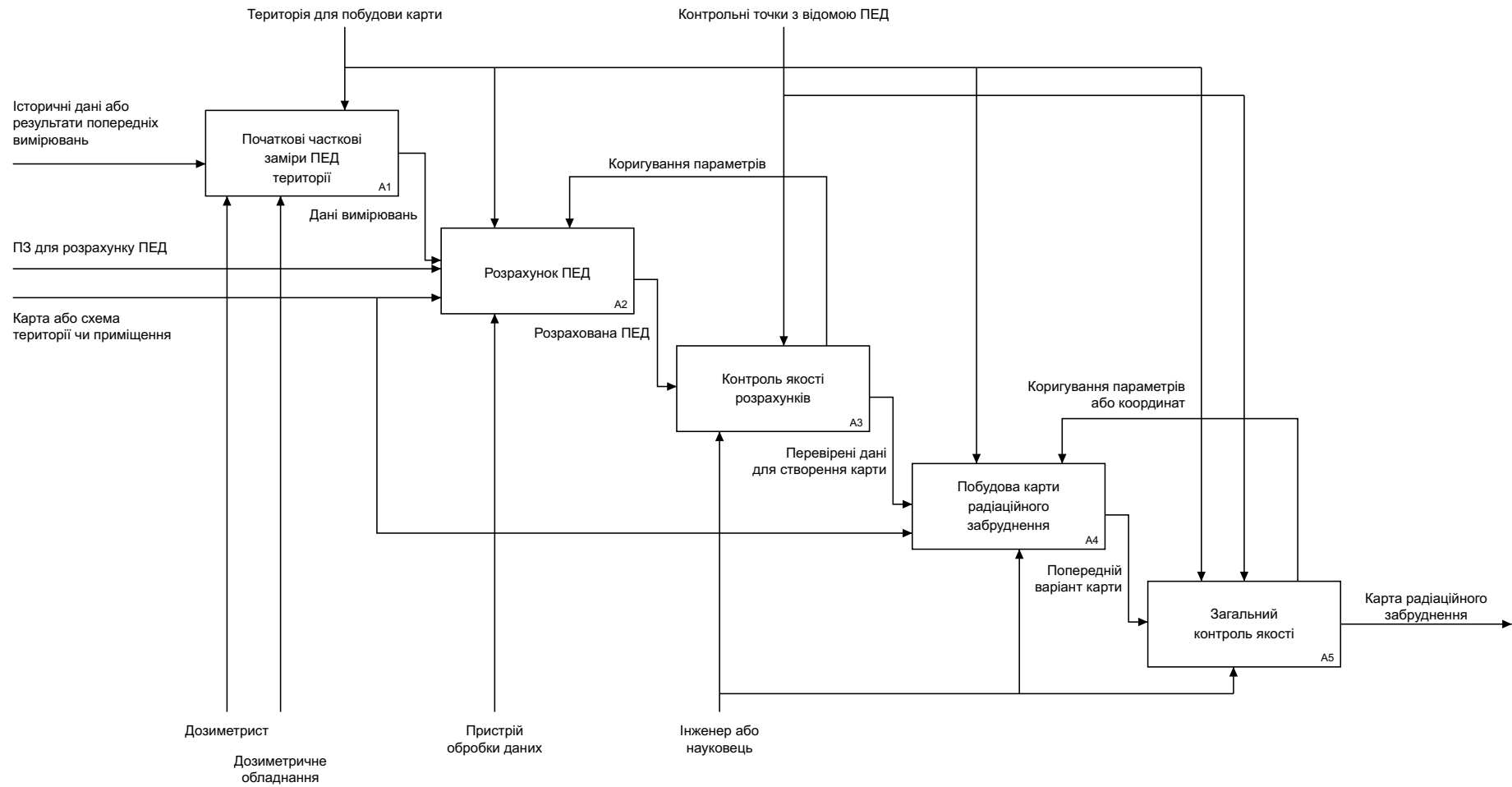


Рисунок Г.2 — Діаграма декомпозиції інформаційної технології

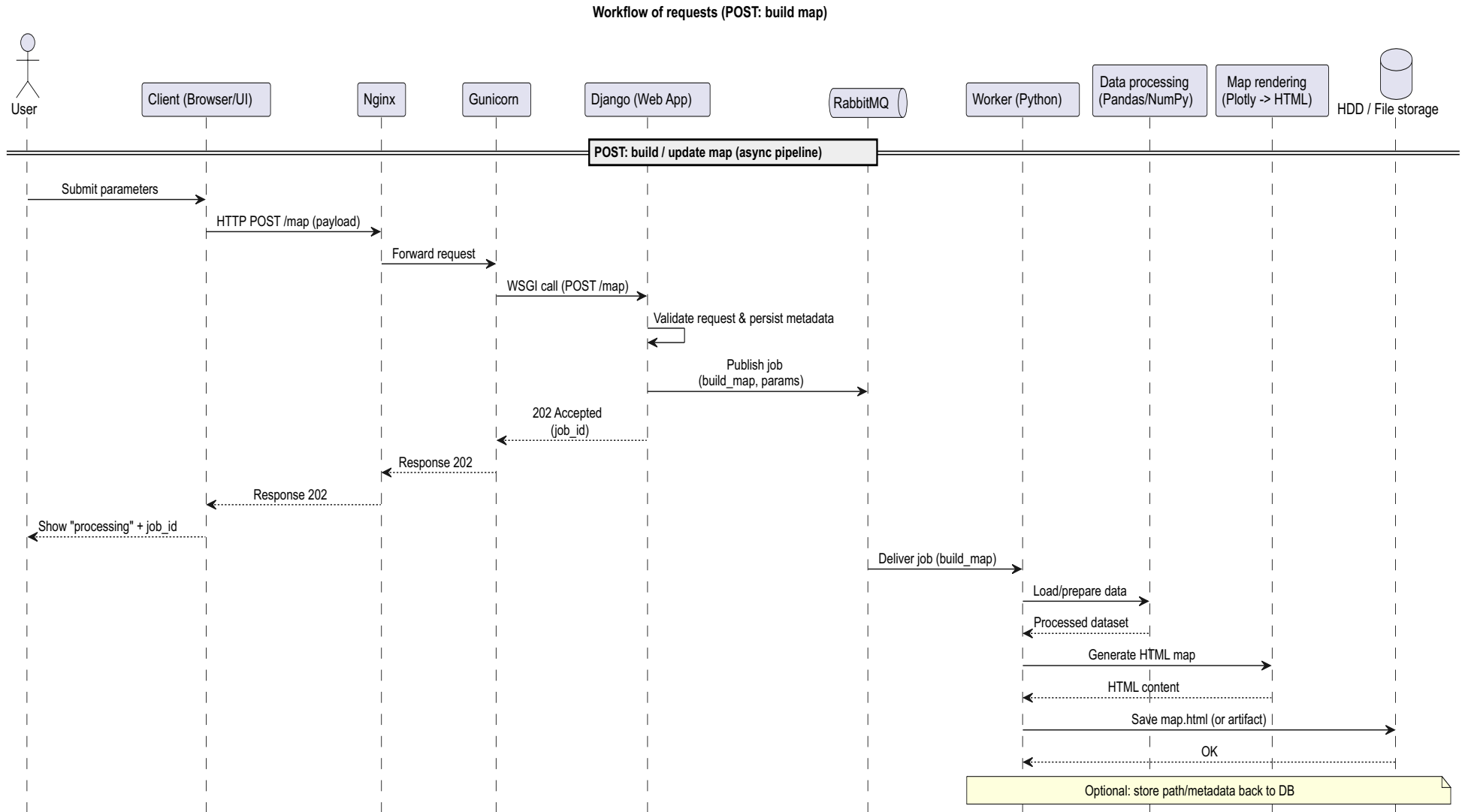


Рисунок Г.3 — Діаграма послідовностей. Запит на оброблення даних

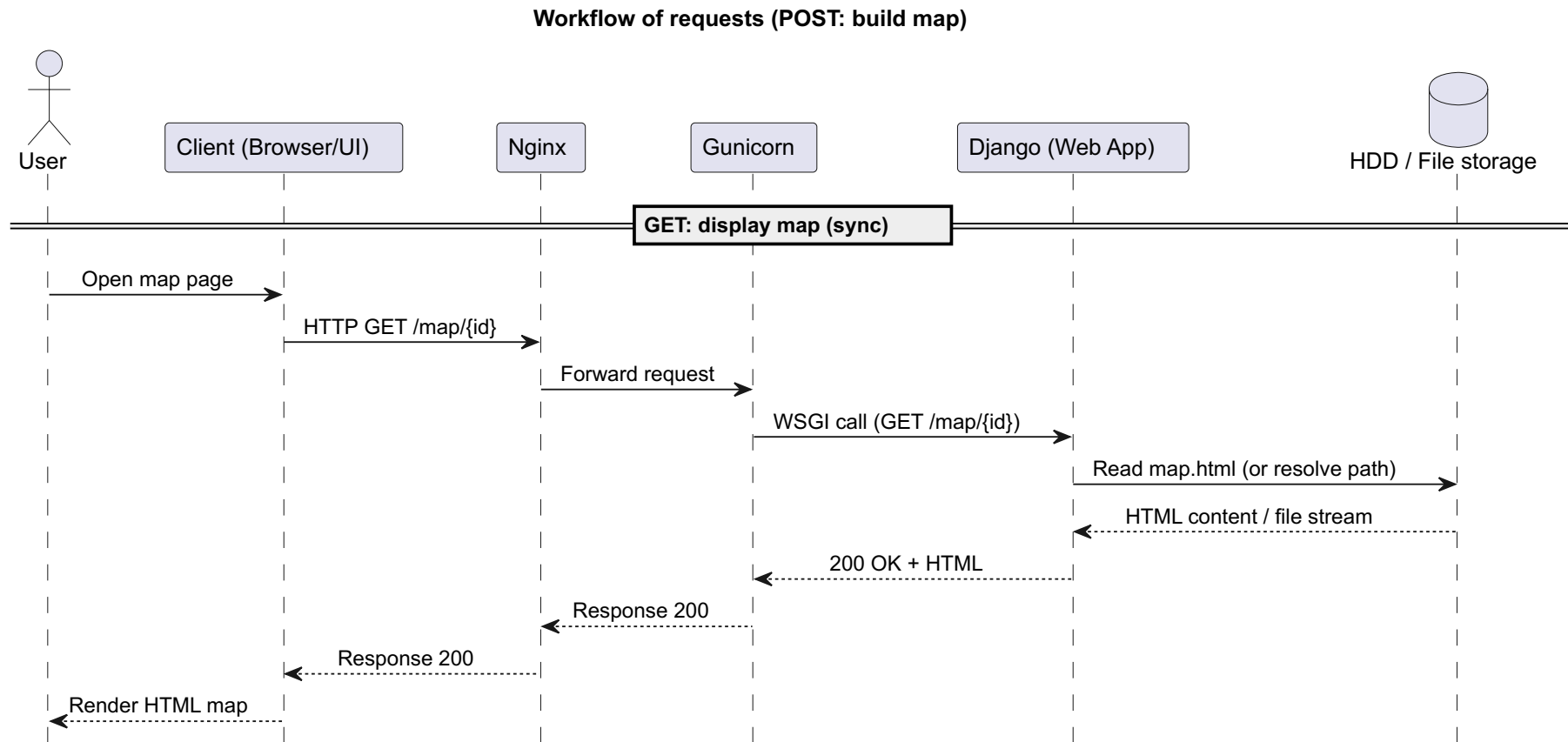


Рисунок Г.4 — Діаграма послідовностей. Запит на результат оброблення даних



Рисунок Г.5 — Діаграма класів

Додаток Д

Програмний код класу Point

```

1  from uuid import uuid4
2
3
4  def squared_distance(x1 : {__sub__} , y1 : {__sub__} , z1 : {__sub__} , x2, y2, z2): 1 usage new *
5      return (x1 - x2) ** 2 + (y1 - y2) ** 2 + (z1 - z2) ** 2
6
7
8  class Point: 2 usages new *
9      __slots__ = ("x", "y", "z", "Activity", "ComputedActivity",
10                  "pervComputed", "nearestSensor", "id")
11
12      def __init__(self, activity: float | int = 0, x: int = 0, y: int = 0, z: int = 0): new *
13          self.x = x
14          self.y = y
15          self.z = z
16          self.Activity = activity
17          self.ComputedActivity = activity
18          self.pervComputed = 0
19          self.nearestSensor = None
20          self.id = str(uuid4())
21
22      def get_distance_sq(self, other : {x, y, z} ) -> float | int : new *
23
24          return squared_distance(other.x, other.y, other.z,
25                                  self.x, self.y, self.z)
26
27      def to_dict(self) -> dict: new *
28          return {
29              "x": self.x,
30              "y": self.y,
31              "z": self.z,
32              "activity": self.Activity,
33              "ComputedActivity": self.ComputedActivity,
34              "pervComputed": self.pervComputed,
35          }

```


Додаток Ж

Програмний код класу Surface

```

68 class Surface: new *
69     def __init__(self): new *
70         self.points: list[Point] = []
71         self.sensors: list[Sensor] = []
72
73     def addPoint(self, p: Point) -> None: new *
74         self.points.append(p)
75
76     def addSensor(self, s: Sensor) -> None: new *
77         self.sensors.append(s)
78
79     def make_pandas_model(self) -> pd.DataFrame: new *
80         n_points = len(self.points)
81         px_arr = np.empty(n_points, dtype=np.int16)
82         py_arr = np.empty(n_points, dtype=np.int16)
83         pz_arr = np.empty(n_points, dtype=np.int16)
84         a_arr = np.empty(n_points, dtype=np.float64)
85         ca_arr = np.empty(n_points, dtype=np.float64)
86     >     for i, p in enumerate [Point] (self.points):...
92     >     dfp = pd.DataFrame({...})
101     dfp["s"] = "na"
102     dfp["sA"] = np.float32 [_32Bit] (0)
103     dfp["sAC"] = np.float32 [_32Bit] (0)
104     dfp["sD"] = np.float32 [_32Bit] (0)
105     dfp["px"] = np.float32 [_32Bit] (0)
106     dfp["py"] = np.float32 [_32Bit] (0)
107     dfp["pz"] = np.float32 [_32Bit] (0)
108     X = dfp["X"].to_numpy()
109     Y = dfp["Y"].to_numpy()
110     Z = dfp["Z"].to_numpy()
111     new_cols: dict = {}
112     dist_col_names: list[str] = []
113     >     for sid, s in enumerate [Sensor] (self.sensors, start=1):...
166     dfp = pd.concat( objs: [dfp, pd.DataFrame(new_cols, index=dfp.index)], axis=1)
167     d_mins = dfp[dist_col_names].min(axis=1, skipna=True)
168     dfp["sD"] = d_mins
169     s_min_cols = dfp[dist_col_names].idxmin(axis=1, skipna=True).astype(str)
170     dfp["s"] = s_min_cols.str[:-1]
171     mask_assigned = dfp["s"] != "na"
172     >     if mask_assigned.any():...
176     dfp = dfp.copy()
177     return dfp

```

Додаток И

**Результати реконструкції потужності еквівалентної дози в 91 контрольній
точці різними методами**

Еволюційний алгоритм (запропонований)	Класичний метод	Еволюційний алгоритм (інтерполяція)	Еволюційний алгоритм (випадкова популяція)
0.698083826	0.750463	0.92369833	0.874795757
0.685234392	0.323153441	0.849585857	0.714907255
0.570390847	0.182557127	0.667375706	0.588132132
0.539050368	0.164277823	0.613603366	0.541293654
0.478879946	0.109313406	0.551012287	0.475095369
0.441130933	0.102623235	0.534853103	0.481255725
0.411655765	0.090210261	0.437946139	0.460589358
1.009299182	1.012611634	1.327523892	1.16077189
1.244845504	0.623094296	1.469804432	1.276322077
1.211570643	0.552225774	1.346599077	1.164036476
0.947857751	0.275337241	1.049126837	0.873712144
0.883819925	0.228571223	1.080977917	0.904252737
0.737662751	0.184540578	0.864462751	0.801063206
0.730590237	1.0668	0.99933834	0.908425099
0.955617996	0.833155109	1.239553497	1.029062079
0.907744263	0.514876215	1.052881944	0.896858001
1.167223486	0.585566026	1.296428614	1.13012133
1.099199923	0.520260066	1.326700308	1.099365602
1.186345605	0.363242799	1.498907987	1.234279584
1.49106256	0.450291667	1.621637923	1.667286071
1.103791615	1.201934821	1.470097464	1.293160921
1.154162777	0.890446556	1.459320231	1.195689574
1.154877096	0.666027232	1.320260016	1.096090994
0.972458296	0.5598672	1.154598609	0.973605217
0.967735753	0.520745871	1.20450493	0.990782919
0.738062144	0.253509052	0.884925037	0.82328081
1.235602104	2.214298992	1.559227069	1.490488079
0.899470572	0.901109838	1.123263366	0.9557531
1.026180784	0.82901596	1.206943051	0.949997632
1.024153103	0.75161485	1.142161353	0.965005574
1.005003804	0.777643973	1.092504348	0.941711724
0.935954121	0.6996375	1.035066848	1.010307563
1.162378261	0.506910833	1.095863551	1.386056667
1.149662478	1.575384247	1.390661108	1.329361763

0.969871693	1.07115625	1.210493247	1.043170675
0.997809636	0.868621284	1.093394595	0.959039914
0.932412779	0.827926304	0.991295766	0.910961437
0.988302218	0.840273342	0.999667436	0.969970009
0.981225096	0.716551899	0.901958393	1.039819373
2.017891304	4.1038725	2.161830062	2.528421118
1.150756785	1.623205682	1.453928656	1.372730567
0.927157715	0.999565931	1.039115772	0.949582182
0.848525733	0.803000102	0.8599228	0.807711912
0.827744688	0.851251739	0.833579395	0.815049376
1.080051449	0.967380449	1.007680769	1.082701895
0.982065084	0.660581923	0.93884709	1.296229164
0.912825973	1.73881875	1.048392277	1.183129863
0.857283743	1.163152989	0.987912382	0.924962193
0.938739758	1.010802644	0.934597533	0.932866639
0.85677971	0.964122115	0.769442401	0.772310962
1.050009014	1.216611738	0.964775292	1.086399523
0.996093448	1.011515411	0.916030256	1.158397379
1.061435598	2.087517383	1.050062976	1.328937636
0.940544887	1.52976919	1.118985119	1.188121372
1.079074085	1.41641875	1.144367162	1.179897941
1.060582609	1.237724444	0.915080242	1.046767198
0.857009275	1.033483452	0.706633789	0.837572174
0.952182821	1.059170274	0.808130912	1.052461453
0.788095819	0.637938782	0.608551505	1.016920513
1.202317925	2.003169737	1.285027689	1.477251411
0.766219432	1.089628061	0.79239228	0.851415484
0.683616932	0.830594207	0.638474196	0.673281725
0.773382609	0.954343534	0.608065105	0.768685907
1.025988057	1.202790665	0.807777766	1.051271051
0.927395423	1.011792928	0.608088501	1.079700801
0.843525206	1.436867563	0.804905504	1.03385311
0.717848498	1.075977062	0.764666248	0.834779337
0.624432643	0.801002778	0.60397412	0.629290338
0.703743372	0.852425508	0.584686462	0.644895546
0.744097614	0.810332522	0.55750354	0.73133359
0.927810789	0.932800926	0.613737413	0.969383897
0.723766977	0.736610119	0.368193427	0.902324172
1.002589957	1.378062852	0.960101776	1.138390753
0.802157278	1.06028519	0.816300425	0.769694754
0.899780789	0.958303488	0.854742164	0.887070677
0.935843635	1.078793223	0.798175013	0.896257412
0.918926829	0.911449695	0.657086161	0.96258701

0.937027312	0.962943134	0.514745989	1.108393141
1.606235539	1.990272011	1.296095747	1.697134405
1.46140942	1.87137474	1.516861775	1.589229891
1.089413478	1.173612679	1.084557143	1.006034472
0.975691042	0.956955572	0.835705186	0.904469408
0.869786232	0.906991369	0.677419306	0.913720549
1.038416789	1.117073269	0.678294181	1.136781204
0.822558428	0.873260959	0.359490113	1.017816736
0.957182203	1.088938667	0.934760174	1.038053855
0.899584348	0.975299118	0.911984962	0.886039386
0.744332469	0.679767202	0.680894535	0.663980574
0.91416445	0.917580735	0.746427059	0.845029105
0.84886817	0.909566204	0.586272249	0.913043961
0.997882539	1.135009677	0.482406346	1.174844741