

Голові спеціалізованої вченої ради

ДФ 206.204.006

в Інституті проблем математичних машин і систем
НАН України

доктору фізико-математичних наук, професору
КЛИМЕНКУ Віталію Петровичу

ВІДГУК

офіційного опонента **ТАЛЕРКА Миколи Миколайовича**, доктора технічних наук, завідувача відділу радіаційної екології Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України, на дисертаційну роботу **ПАНТІНА Максима Андрійовича «Інформаційна технологія оцінювання радіаційного забруднення ЧАЕС на основі даних дистанційного зондування»**, подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Отримання достовірної інформації про просторовий розподіл радіаційних характеристик є необхідною передумовою планування та безпечного виконання робіт на ядерно та радіаційно небезпечних об'єктах. Особливо складною ця задача є для об'єктів, що виводяться з експлуатації, де можливості безпосереднього доступу персоналу обмежуються радіаційною обстановкою, геометрією та станом конструкцій.

До таких об'єктів належить об'єкт «Укриття» Чорнобильської АЕС. Для планування демонтажу нестабільних конструкцій, застосування дистанційно керованої техніки та інших робіт у межах Нового безпечного конфайнменту необхідна актуальна інформація про просторовий розподіл потужності дози.

Водночас отримати детальну картину лише шляхом прямих вимірювань практично неможливо, оскільки вимірювання виконуються в доступних точках або за технологічно обумовленими маршрутами, а мережа спостережень залишається неповною та нерегулярною.

За таких умов особливого значення набувають методи, які дозволяють отримувати додаткову просторову інформацію на основі обмеженої кількості фактичних вимірювань. У дисертаційній роботі М. А. Пантіна задачу сформульовано як обернену: за результатами вимірювання необхідно знайти модельний просторовий розподіл, що найкраще узгоджується з наявними даними. Для її розв'язання використано еволюційний алгоритм, а запропоновані методи реалізовано у складі інформаційної технології.

Актуальність такого підходу посилюється розвитком робототехнічних та безпілотних засобів радіаційної розвідки. Їх ефективне використання потребує не лише дистанційного отримання вимірювань, але й автоматизованого оброблення неповних просторово розподілених даних. Тому тема дисертаційної роботи є актуальною як для розвитку інформаційних технологій, так і для практичного інформаційного забезпечення робіт на радіаційно небезпечних об'єктах.

2. Зв'язок теми дисертаційної роботи з науковими планами, програмами, фундаментальними та прикладними дослідженнями

Дослідження виконувалося у безпосередньому зв'язку з науковими роботами ІПММС НАН України зі створення засобів автоматизованої радіаційної розвідки із застосуванням дистанційно керованих платформ. Окремі результати отримано під час реалізації міжнародного проєкту НАТО G-5913 «Enhanced radiation detection for nuclear security and incident response» у співпраці з Університетом Брістоля (Велика Британія) та Інститутом проблем безпеки АЕС НАН України. Такий контекст роботи є принциповим: розроблювана технологія від початку орієнтована не на абстрактну тестову задачу, а на оброблення даних, які можуть надходити від реальних систем дистанційного контролю радіаційно небезпечних об'єктів.

3. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень і результатів

Поставлена мета досягається шляхом послідовного розв'язання взаємопов'язаних завдань: від аналізу існуючих методів цифрового радіаційного картографування та формалізації оберненої задачі до розроблення еволюційного алгоритму, методу формування початкової популяції, інформаційної технології та її експериментальної перевірки. У прийнятій моделі об'єкт представлено сукупністю модельних точкових джерел, а виміряне значення — як результат суперпозиції їх внесків з урахуванням відстані та екранування. Оскільки кількість невідомих суттєво перевищує кількість вимірювань, задача зводиться до недовизначеної системи лінійних рівнянь з обмеженнями, для розв'язання якої застосовано еволюційний алгоритм.

Позитивної оцінки заслуговує робота автора з вихідними натурними даними. Використано фактичні вимірювання потужності еквівалентної дози, виконані на об'єкті «Укриття» за допомогою детектора БДБГ-09. Враховано просторову прив'язку даних та встановлену затримку реакції вимірювального каналу близько 8 с. Це є важливим, оскільки достовірність результату оберненої задачі визначається не тільки алгоритмом, а й якістю та коректністю підготовки первинних вимірювань.

Особливо переконливою є незалежна верифікація отриманого результату. Для перевірки використано 91 контрольну точку дозиметричних вимірювань, які не входили до цільової функції алгоритму. Найкращий результат отримано для еволюційного алгоритму з фізично обґрунтованою ініціалізацією: середня абсолютна похибка становила 0,173, середньоквадратична — 0,237, частка грубих помилок — 6,6 %. Для класичної просторової інтерполяції відповідні значення становили 0,360, 0,551 та 24,2 %.

При цьому отриманий результат слід інтерпретувати саме як ефективний модельний розподіл, що дає змогу оцінювати радіаційне поле у практично значущих точках простору. Метою роботи не є фізична ідентифікація реального

розподілу радіонуклідів усередині об'єкта «Укриття». Така постановка відповідає меті дослідження та підтверджується результатами незалежних контрольних вимірювань.

4. Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Основним науковим результатом є запропонована інформаційна технологія оцінювання радіаційного забруднення складних об'єктів за неповними даними дистанційного зондування з використанням вдосконаленого еволюційного алгоритму. Її суттєвою відмінністю є використання оберненої математичної постановки замість безпосередньої просторової інтерполяції вимірюваних значень.

Уперше запропоновано метод формування початкової популяції еволюційного алгоритму з використанням апріорної інформації про закономірність зменшення внеску джерела з відстанню. Наукове значення цього результату полягає не у використанні відомої фізичної закономірності як такої, а у способі її включення до алгоритмічного процесу формування початкового наближення. Експериментально підтверджено перевагу такого підходу над випадковою та інтерполяційною ініціалізацією.

Подальшого розвитку набув метод еволюційного пошуку розв'язків недовизначених систем лінійних рівнянь з обмеженнями шляхом адаптації операторів відбору та мутації до структури задачі.

Удосконалено методологію використання статистичних методів оброблення даних радіаційного контролю, що полягає у застосуванні регресійного аналізу вимірювань для врахування часової динаміки радіаційного поля, що створює можливість залучати накопичені результати попередніх обстежень до поточного розрахунку.

Важливо підкреслити, що фізичні закономірності та методи радіаційного контролю в дисертації не є самостійним предметом наукової новизни. Вони виступають джерелом апріорної інформації та предметними обмеженнями для

розроблення методів автоматизованого оброблення даних. Науковий результат полягає у формалізації інформаційної задачі, розробленні алгоритмічних засобів її розв'язання та побудові відповідної інформаційної технології.

5. Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення роботи полягає у створенні програмно реалізованої інформаційної технології, яка дає змогу формувати цифрове просторове представлення радіаційного стану об'єкта за умов неповної мережі безпосередніх вимірювань. Технологія охоплює підготовку і зберігання даних, формування геометричної моделі, виконання реконструкції та представлення результатів у вигляді цифрової карти.

Практична спрямованість дослідження підтверджується його зв'язком із розробленням дистанційних засобів радіаційного контролю. Окремі результати отримано під час виконання міжнародного проєкту НАТО G-5913 «Enhanced radiation detection for nuclear security and incident response» у співпраці з Університетом Брістоля та Інститутом проблем безпеки АЕС НАН України. Результати дисертації впроваджено в Інституті проблем безпеки АЕС НАН України та на ДСП «Чорнобильська АЕС». Перспективним є подальше поєднання розробленої технології з робототехнічними та безпілотними системами радіаційної розвідки для планування робіт і уточнення просторової інформації без необґрунтованого збільшення присутності персоналу в небезпечних зонах.

6. Оцінка змісту та завершеності дисертації

Дисертаційна робота має логічну структуру та складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг становить 186 сторінок, з яких 152 сторінки основного тексту.

У першому розділі проаналізовано сучасні методи цифрового радіаційного картографування, дистанційного контролю та інформаційні системи підтримки прийняття рішень. У другому сформовано математичну постановку задачі, розроблено еволюційний алгоритм, способи формування початкової популяції та підхід до використання історичних даних. У третьому розділі розроблено

функціональну модель та програмну архітектуру інформаційної технології. У четвертому проведено експериментальну перевірку на реальних даних, порівняння з класичною інтерполяцією та оцінювання результату на незалежних контрольних вимірюваннях.

Структура роботи відповідає логіці дослідження, поставленим завданням і сформульованим висновкам, що дає підстави вважати дисертацію завершеним науковим дослідженням.

7. Повнота викладення результатів у наукових публікаціях та особистий внесок здобувача

За темою дисертації опубліковано 9 наукових праць: 6 статей та 3 публікації у матеріалах конференцій. Чотири статті опубліковано у виданнях, що індексуються Scopus і належать до кuartилів Q1–Q4, дві — у фахових наукових виданнях України категорії «Б». У публікаціях представлено основні результати, пов'язані з радіаційними вимірюваннями об'єкта «Укриття», розробленням еволюційного підходу, аналізом історичних даних та застосуванням робототехнічних і безпілотних засобів контролю. Особистий внесок здобувача у роботи, виконані у співавторстві, визначено в дисертації. Отже, основні результати дисертаційного дослідження достатньо повно оприлюднені у наукових працях.

8. Відповідність дисертації спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»

Окремо вважаю необхідним зупинитися на відповідності дисертаційної роботи спеціальності, за якою вона подана до захисту. Предметна область роботи безпосередньо пов'язана з радіаційним станом об'єкта атомної енергетики, а експериментальною базою є результати дозиметричних вимірювань на об'єкті «Укриття» Чорнобильської АЕС. Це природно обумовлює використання понять радіаційної безпеки, фізичних моделей формування гамма-поля та спеціалізованих вимірювальних даних.

Разом з тим дисертація не спрямована на встановлення закономірностей міграції радіонуклідів у навколишньому середовищі, оцінювання

радіоекологічних наслідків забруднення, розроблення заходів екологічної безпеки або дослідження впливу іонізуючого випромінювання на компоненти екосистем. Таким чином, її науковий результат не належить до предмета радіаційної екології чи спеціальності «Екологічна безпека». Так само предметом дослідження не є фізичні процеси в ядерних установках, питання експлуатації АЕС або обґрунтування ядерної безпеки.

Радіаційні вимірювання та фізичні закономірності виступають у роботі предметними даними й апіорною інформацією. Безпосереднім змістом дослідження є формалізація задачі оброблення неповних просторових даних, розроблення еволюційного алгоритму та способу формування його початкової популяції, статистичне опрацювання історичних даних, функціональне й програмне проектування та створення інформаційної технології отримання, оброблення, зберігання і представлення інформації.

Фізична модель у цьому випадку є складовою математичного забезпечення інформаційної технології, а об'єкт «Укриття» — реальною предметною областю та експериментальною базою для верифікації запропонованих методів. Відповідно, наукову новизну визначають не відомі закономірності радіаційного поля, а способи їх використання під час побудови алгоритмів автоматизованого оброблення неповних даних.

Отже, за об'єктом і предметом дослідження, характером поставлених завдань, використаними методами та отриманими результатами дисертаційна робота М. А. Пантіна відповідає спеціальності 122 «Комп'ютерні науки».

9. Дотримання принципів академічної доброчесності

За результатами ознайомлення з дисертаційною роботою та публікаціями здобувача ознак академічного плагіату, фабрикації або фальсифікації результатів не виявлено. Використані положення інших дослідників супроводжуються відповідними посиланнями, а особистий внесок у роботи, виконані у співавторстві, визначено в тексті дисертації. У роботі також наведено декларацію

щодо використання засобів штучного інтелекту під час мовного та редакційного опрацювання тексту.

10. Зауваження до дисертаційної роботи

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, вважаю за необхідне висловити такі зауваження.

1. *Щодо фізичного змісту модельних змінних.* У математичній моделі невідомі величини x_i у кількох фрагментах дисертації визначено як «активності точкових джерел». Разом з тим ці величини не визначаються безпосередньо в одиницях активності радіонуклідів і фактично характеризують ефективний внесок модельного джерела у формування потужності дози. Для уникнення неоднозначності доцільно було б окремо визначити фізичний зміст та розмірність відповідної модельної величини або використовувати термін, наприклад «ефективна інтенсивність модельного джерела».

2. *Щодо використаної термінології.* У тексті дисертації в окремих випадках як близькі за змістом використовуються поняття «радіаційне забруднення», «радіаційне поле», «розподіл джерел» та «просторовий розподіл потужності еквівалентної дози». З позиції термінології радіаційної безпеки ці поняття не є тотожними. Доцільно було б чіткіше розмежувати фізичний параметр, який безпосередньо вимірюється та оцінюється, і модельну характеристику джерел, яка використовується під час розв'язання оберненої задачі.

3. *Щодо прийнятої моделі формування гамма-поля.* У роботі свідомо використано спрощену модель на основі ізотропних точкових джерел, закону обернених квадратів та спрощеного врахування екранування. Таке рішення є зрозумілим з огляду на значну невизначеність внутрішньої геометрії об'єкта «Укриття» та поставлену обчислювальну задачу. Разом з тим доцільно було б чіткіше визначити межі застосовності такого спрощення та зазначити фізичні фактори, які в подальшому можуть потребувати врахування при застосуванні методу до інших геометрій та умов вимірювання.

4. *Щодо актуалізації історичних даних.* При обґрунтуванні необхідності коригування архівних результатів значну увагу приділено радіоактивному розпаду як причині часової зміни радіаційного поля. Для такого складного об'єкта, як об'єкт «Укриття», часова динаміка може визначатися також зміною конфігурації та екранування, переміщенням радіоактивних матеріалів, виконанням технологічних робіт та іншими факторами. Тому коректніше пов'язувати запропоновану статистичну актуалізацію з часовою динамікою радіаційного поля в цілому, розглядаючи радіоактивний розпад як один із її чинників.

5. *Щодо інтерпретації похибки вимірювального каналу.* У дисертації похибка дозиметричного вимірювання близько 17 % в окремих випадках характеризується як нижня межа точності, якої може досягти метод реконструкції. Така інтерпретація потребує уточнення, оскільки метрологічна характеристика окремого вимірювання і статистичні показники похибки реконструкції мають різний зміст. Похибку вимірювального каналу доцільніше розглядати як характеристику невизначеності вихідних даних та орієнтир при оцінюванні результатів реконструкції.

Наведені зауваження стосуються переважно точності спеціальної термінології, інтерпретації модельних величин та визначення фізичних передумов запропонованої інформаційної технології. Вони не ставлять під сумнів отримані алгоритмічні результати, достовірність експериментальної перевірки та загальну наукову цінність дисертаційної роботи.

11. Загальний висновок

Дисертаційна робота ПАНТИНА Максима Андрійовича «Інформаційна технологія оцінювання радіаційного забруднення ЧАЕС на основі даних дистанційного зондування» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне завдання розроблення інформаційної технології оцінювання просторового стану складного об'єкта за неповними та нерегулярними даними дистанційного зондування. Запропонована постановка

оберненої задачі має фізично змістовні передумови, а практична ефективність підходу підтверджена незалежними реальними дозиметричними вимірюваннями.

Водночас, незважаючи на використання даних радіаційного контролю об'єкта «Укриття» та фізичних моделей формування гамма-поля, наукові результати роботи не належать до розв'язання задач радіаційної екології, екологічної безпеки або атомної енергетики. Вони стосуються методів автоматизованого оброблення неповних даних, алгоритмічного забезпечення та побудови інформаційної технології, а радіаційна безпека виступає предметною областю її застосування та експериментальної перевірки.

За актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю і достовірністю результатів, практичним значенням та рівнем виконання дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, за своїм змістом відповідає спеціальності 122 «Комп'ютерні науки», а її автор — ПАНТІН Максим Андрійович — заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук,
завідувач відділу радіаційної екології
Інституту проблем безпеки атомних
електростанцій НАН України



Микола Миколайович ТАЛЕРКО

Підпис М. М. ТАЛЕРКА ЗАВІРЯЮ

Учений секретар ІПБ АЕС НАН України,
Д.Т.Н.



К.В. Сімейко